

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

UNE VIRALITÉ PARFOIS UTILE

Les réseaux sociaux propagent à grande vitesse des messages pas toujours vrais. Mais n'oublions pas que cette viralité de l'information peut aussi servir la prévention des risques et la sécurité civile.



La sécurité de nos territoires est-elle sensible à l'activité des réseaux sociaux? Avec le succès contagieux de l'application Twitter, les espaces numériques et physiques apparaissent de plus en plus interdépendants. En cause, la grande réactivité des usagers face aux événements soudains et la propagation fulgurante de ces contenus qui fait la marque de ce réseau social. La viralité de l'information par le «retweet», le partage en cascade d'un même message, a un impact direct sur le monde physique.

L'actualité de janvier en donne la démonstration. Le président de la République, Emmanuel Macron, et son épouse ont été évacués du théâtre parisien Les Bouffes du Nord pendant quelques instants à la suite d'un tweet signalant leur présence par un journaliste militant qui assistait à la même représentation. Avec, pour conséquence, le rassemblement rapide de manifestants aux abords du théâtre, puis l'intervention des forces de l'ordre qui ont mis en place un périmètre de sécurité.

Dans cet exemple, la communication numérique a porté atteinte à la sûreté présidentielle. Mais, inversement, la réactivité des internautes peut renforcer la sécurité des territoires. Des recherches en intelligence artificielle se sont appuyées sur cette propriété afin de

La réactivité des internautes peut renforcer la sécurité des territoires

mettre au point des systèmes collaboratifs de prévention des risques environnementaux. Le réseau Twitter est en effet fortement mobilisé par les victimes de catastrophes naturelles pour diffuser des témoignages inquiets, souvent accompagnés de photos et de vidéos. Ces contenus sont précieux, car ils rendent compte de l'ampleur en temps réel d'un séisme ou d'une inondation, et de la

façon dont l'événement est ressenti par la population.

De ce point de vue, la plateforme numérique Suricate-Nat installée l'année dernière par le BRGM, l'agence géologique française, constitue un outil de veille qui analyse automatiquement d'immenses volumes de données issues de Twitter grâce à des algorithmes de tri. En identifiant les pics d'activité et la géolocalisation des tweets collectés, les chercheurs déduisent le périmètre des zones de perception des secousses sismiques en quelques minutes. Leur objectif est de perfectionner cette vigie citoyenne pour que les autorités puissent communiquer directement avec les victimes et envoyer rapidement des secours sur place. Véritable sentinelle du territoire, le média numérique soutient la gestion de crise par son accès à l'information en temps réel.

Facilitant tantôt des attroupements improvisés et potentiellement incontrôlables, tantôt des suivis précis de catastrophes, Twitter est ainsi un outil ambivalent en matière de sécurité.

Si la nature de l'information émise joue un rôle clé dans sa capacité à être retweetée, à apaiser ou non un contexte instable, il faut également porter attention à la sociologie des groupes d'utilisateurs de ce média. Ainsi, une étude récente de chercheurs sud-coréens (D. Choi *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 10, 310, 2020) a mis en évidence l'importance des «chambres d'échos» (ou bulles d'opinion politique) dans la propagation profonde de rumeurs.

Une chambre d'écho désigne un système fermé d'utilisateurs réunis par des convictions communes, qui favorise ainsi la répétition de mêmes messages par plusieurs sources, ou la diffusion de contenus semblables par une source unique. La détection de ces architectures d'utilisateurs au sein de la twittosphère pourrait freiner la propagation de messages toxiques à un stade précoce ou, au contraire, amplifier toute information de terrain, utile à la résolution des crises. ■

VIRGINIE TOURNAY biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET

15H / 17H LE SAMEDI



*DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE*



ABONNEZ-VOUS AU PODCAST  DE L'ÉMISSION

L'ESSENTIEL

> L'état quantique d'un système physique peut être une superposition d'états distincts, correspondant chacun à une valeur différente de la même grandeur physique.

> Pour expliquer pourquoi une mesure donne toujours un résultat univoque, l'interprétation « orthodoxe » de la mécanique quantique suppose que l'appareil de mesure, macroscopique, échappe aux lois quantiques.

> Cette exclusion du domaine quantique de l'appareil de mesure étant difficile à justifier, plusieurs interprétations concurrentes ont été proposées.

> L'auteur a récemment proposé le « solipsisme convivial », interprétation d'après laquelle chaque observateur ne peut percevoir que l'un des états d'une superposition, et sans que des observateurs distincts puissent constater un désaccord entre eux.

L'AUTEUR



HERVÉ ZWIRN
directeur de recherche au CNRS,
physicien et épistémologue à l'IHPST,
à Paris, et au Centre de mathématiques
et de leurs applications à l'École normale
supérieure Paris-Saclay

L'observateur, un défi pour la physique quantique

La théorie quantique est-elle compatible avec l'existence d'une réalité objective, indépendante de l'observateur ? Cette question reste en suspens depuis la naissance de la mécanique quantique. Une interprétation récente, le « solipsisme convivial », propose une réponse originale, qui confère à l'observateur un rôle essentiel.

La mécanique quantique, élaborée dans les années 1920, est l'une des théories les plus précises dont nous ayons jamais disposé. Elle permet de décrire quantitativement une très grande variété de phénomènes naturels, de la structure de l'atome à la supraconductivité. Mais elle pose des problèmes difficiles quand on veut comprendre la signification profonde de son formalisme mathématique.

Ces difficultés ne s'opposent heureusement en rien à son utilisation pratique quand il s'agit de prédire des résultats expérimentaux et de calculer les valeurs des grandeurs physiques. Les physiciens sont tous d'accord quant à la façon d'utiliser le formalisme à ces fins. La plupart des physiciens se satisfont d'ailleurs de cette situation et ne s'intéressent que de très loin aux problèmes conceptuels posés par les fondements de la théorie quantique.

Cependant, la réflexion autour de ces fondements touche à des problèmes philosophiques

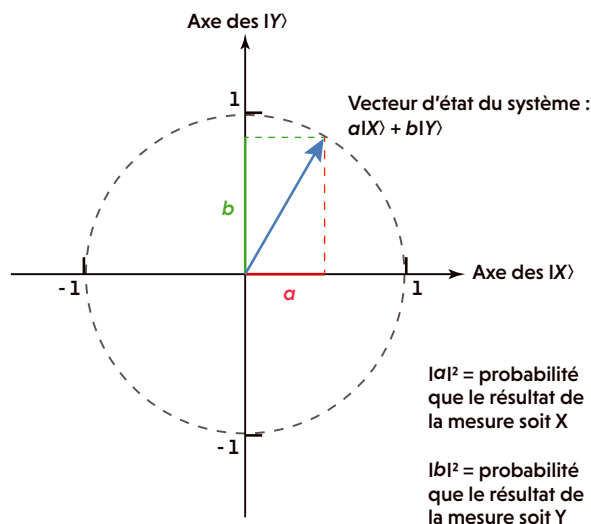
parmi les plus anciens et les plus profonds, tels que le problème du réalisme ou celui de la conscience. Ce que la mécanique quantique a apporté de nouveau est le fait que, si l'on considère que c'est la bonne théorie pour décrire le monde microscopique et qu'elle s'applique aussi au monde macroscopique, alors certaines positions philosophiques concernant la réalité qui nous entoure ne sont plus tenables.

Grâce aux nombreux articles de vulgarisation publiés ces dernières années dans de multiples médias, tout un bestiaire de mots étranges est associé à la théorie quantique dans l'esprit du grand public : indéterminisme, superposition, dualité onde-corpuscule, chat de Schrödinger, principe d'incertitude, non-localité, intrication, etc. Chacun d'eux se réfère à un aspect particulier et souvent contre-intuitif de la mécanique quantique. Nous allons ici nous intéresser à un problème qui est sans doute le plus fondamental de tous, qui provient à la fois de la superposition des états quantiques, de l'indéterminisme des résultats de mesure, de l'intrication des systèmes >



LA RÈGLE DE BORN

La théorie quantique décrit l'état d'un système physique par un vecteur d'un certain espace abstrait. En général, ce vecteur s'écrit comme la somme de plusieurs vecteurs (ou états) de base orthogonaux entre eux et de norme (ou longueur) égale à 1, chacun correspondant à une valeur bien déterminée d'une même grandeur physique (position ou énergie par exemple) et étant affecté d'un certain coefficient. La règle



de Born donne la probabilité de trouver telle ou telle valeur lors d'une mesure en fonction des coefficients des vecteurs

de base dans la somme décrivant l'état du système. Elle stipule que la probabilité de trouver une valeur est égale

au carré du coefficient de l'état de base correspondant (plus précisément au carré du module du coefficient, qui peut être un nombre complexe). La somme des carrés des coefficients représente la somme des probabilités des résultats possibles, et doit donc être égale à 1. C'est pourquoi on demande que le vecteur d'état soit de norme égale à 1. Ainsi, si l'on mesure la position d'un électron dans l'état $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$, on le trouvera soit en X, soit en Y avec une probabilité $1/2$. Si l'on mesure la position d'un électron dont l'état est $1/\sqrt{3}|X\rangle + \sqrt{2/3}|Y\rangle$, on le trouvera en X avec la probabilité $1/3$ et en Y avec la probabilité $2/3$. Le schéma ci-contre illustre la règle de Born pour un système à deux états de base et avec des coefficients réels a et b (en toute généralité, ils sont complexes).

> et qui est souvent exemplifié par le fameux chat de Schrödinger à la fois mort et vivant: le problème de la mesure des grandeurs physiques.

Cette question de la mesure est étroitement liée à celle de la réalité. La plupart des physiciens considèrent que l'on devrait pouvoir comprendre le monde quantique de façon objective, c'est-à-dire sans faire aucune référence à nous-mêmes: nous sommes supposés être des observateurs passifs, qui se contentent de prendre acte de phénomènes se déroulant dans une réalité extérieure et indépendante de nous. Cette attitude est naturelle. La mécanique classique nous a habitués à raisonner ainsi et, dans l'attitude scientifique traditionnelle, on considère l'objectivité comme une valeur déterminante.

Mais si le concept de mesure ne pose aucun problème en physique classique, il soulève de grandes difficultés en physique quantique. Ce sont ces difficultés que je vais analyser. Elles conduisent à remettre en cause l'existence objective, en l'absence de tout observateur, de valeurs définies pour les grandeurs caractérisant un système physique. Je vais ensuite présenter et défendre une idée plutôt surprenante: c'est seulement lorsqu'un observateur prend conscience de sa mesure qu'une valeur définie de la grandeur mesurée émerge, et celle-ci n'implique aucun changement dans l'état physique du système, mais est relative à l'observateur lui-même.

D'une certaine manière, les difficultés d'interprétation de la mécanique quantique ont pour origine fondamentale le «principe de superposition». Expliquons en quoi celui-ci consiste.

Dans la théorie quantique, on représente les états des systèmes physiques par des objets

mathématiques qui sont des vecteurs dans un certain espace aux propriétés convenables (un «espace de Hilbert»). On utilise aussi parfois le terme de «fonction d'onde» pour désigner le vecteur caractérisant l'état du système. Par exemple, l'état de position d'un électron qui se situe dans la région X sera représenté par un vecteur qu'on a l'habitude de noter $|X\rangle$; celui d'un électron situé dans la région Y sera $|Y\rangle$.

L'ORIGINE DES DIFFICULTÉS

Or le principe de superposition stipule que si deux états quantiques sont possibles, alors toute combinaison linéaire (c'est-à-dire une somme pondérée) des deux vecteurs d'état correspondants représente elle-même un état possible. Ainsi, selon ce principe, si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont des états possibles (et bien distincts) du système, l'état $a|X\rangle + b|Y\rangle$, où a et b sont des coefficients numériques, est également un état possible.

Prenons l'exemple de la combinaison linéaire $|X\rangle + |Y\rangle$, où les coefficients sont égaux (en fait, pour des raisons de normalisation liées à la règle de Born – voir l'encadré ci-dessus –, un tel vecteur doit avoir une longueur 1 et il faudrait donc l'écrire $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$ si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont eux-mêmes de longueur 1 et orthogonaux; mais, pour simplifier, nous omettrons les facteurs de normalisation). À quoi correspond un tel état? Où se trouve un électron dont l'état est décrit par cette somme?

Aucune réponse conforme à une description usuelle n'est possible. On peut montrer qu'il est tout aussi faux de dire que l'électron est «à la fois» en X et en Y, qu'il est «tantôt» en X et «tantôt» en Y, qu'il est à mi-chemin

LINÉARITÉ ET UNITARITÉ

En mécanique quantique, l'espace des états d'un système est un espace vectoriel aux propriétés adéquates, un « espace de Hilbert ». Ses éléments, qui représentent l'état d'un système, sont des vecteurs. Une fonction linéaire f sur cet espace transforme un vecteur en un autre vecteur avec la propriété suivante : quels que soient les vecteurs V et W et la combinaison linéaire $aV + bW$, où a et b sont des nombres complexes quelconques, on a $f(aV + bW) = af(V) + bf(W)$. L'équation de Schrödinger, qui régit l'évolution au cours du temps du vecteur d'état du système physique considéré, correspond à une transformation linéaire. Cette transformation est de plus unitaire, ce qui signifie qu'elle transforme un vecteur en un autre vecteur de même norme (ou longueur). Il en résulte que l'évolution d'un état superposé (combinaison linéaire de deux vecteurs non proportionnels) ne peut jamais donner un état proportionnel à un seul de ces deux vecteurs. C'est pourquoi l'équation de Schrödinger ne peut « projeter » une superposition d'états sur l'un de ces états, et ne peut donc pas expliquer la « réduction du paquet d'ondes » qui se produit lors d'une mesure et qui assure que le résultat de la mesure soit univoque.

entre X et Y , ou qu'il est en toute autre position définie, quelle qu'elle soit. On est en fait conduit à considérer qu'un tel électron n'a tout simplement aucune position définie, ce qui est très choquant pour notre intuition, laquelle nous a habitués à avoir la certitude que tout objet occupe une position bien définie dans l'espace à tout moment !

Cette conclusion étrange n'est pas réservée à la position, mais s'applique à toutes les grandeurs physiques, par exemple la vitesse, l'énergie ou le moment cinétique. Dans les superpositions d'états, certaines grandeurs n'ont tout simplement aucune valeur définie.

Si l'on observe un électron qui se trouve dans l'état $|X\rangle$, on le détectera en X . Si l'on observe un électron qui se trouve dans l'état $|Y\rangle$, on le détectera en Y . Mais alors, où détectera-t-on un électron qui se trouve dans l'état $|X\rangle + |Y\rangle$? La réponse est que si l'on observe successivement un grand nombre d'électrons, tous dans ce même état, on en détectera statistiquement la moitié en X et l'autre moitié en Y (en raison de l'égalité des coefficients des deux termes entrant dans la superposition – voir l'encadré sur la règle de Born).

Pourtant, cela ne veut pas dire que la moitié des électrons dans cet état sont situés en X et l'autre moitié en Y avant même qu'on les détecte. Les lois quantiques montrent en effet que si c'était le cas, on n'observerait pas les interférences produites dans certaines situations par un état superposé. Il faut donc considérer qu'aucun de ces électrons n'occupe de position définie avant qu'on le détecte : c'est au moment où on fait le nécessaire pour le détecter que la position se détermine, avec une probabilité $\frac{1}{2}$ d'être en X ou en Y .

DEUX PRÉCEPTES QUI NE CONDUISENT PAS AU MÊME RÉSULTAT

Par ailleurs, la théorie quantique énonce deux postulats relatifs à l'évolution d'un système. Le premier est l'équation de Schrödinger, une équation différentielle qui régit la variation de l'état du système au cours du temps. Elle a la particularité d'être linéaire et unitaire (voir l'encadré ci-contre), ce qui a pour conséquence qu'elle transforme toute superposition d'états en une autre superposition contenant les mêmes états. Elle ne fera donc jamais passer l'état $|X\rangle + |Y\rangle$ à l'état $|X\rangle$ ou à l'état $|Y\rangle$, lesquels correspondent à des états de position bien déterminée. Il s'ensuit que l'équation de Schrödinger ne permettra jamais d'expliquer pourquoi, lorsqu'on observe un électron dont l'état est $|X\rangle + |Y\rangle$, on le trouve soit en X , soit en Y avec une probabilité $\frac{1}{2}$.

L'autre moyen fourni par la théorie quantique pour déterminer l'évolution d'un système est le « postulat de réduction du paquet

d'ondes ». Il s'applique à l'acte de mesure, sur le système, de toute grandeur physique.

Ce postulat stipule que si le système est dans une superposition d'états dont chacun correspond à une valeur bien définie d'une grandeur physique, la mesure de cette grandeur fournira l'une de ces valeurs comme résultat, avec une probabilité déterminée par le coefficient de l'état correspondant dans la superposition, conformément à la « règle de Born » (voir l'encadré page précédente).

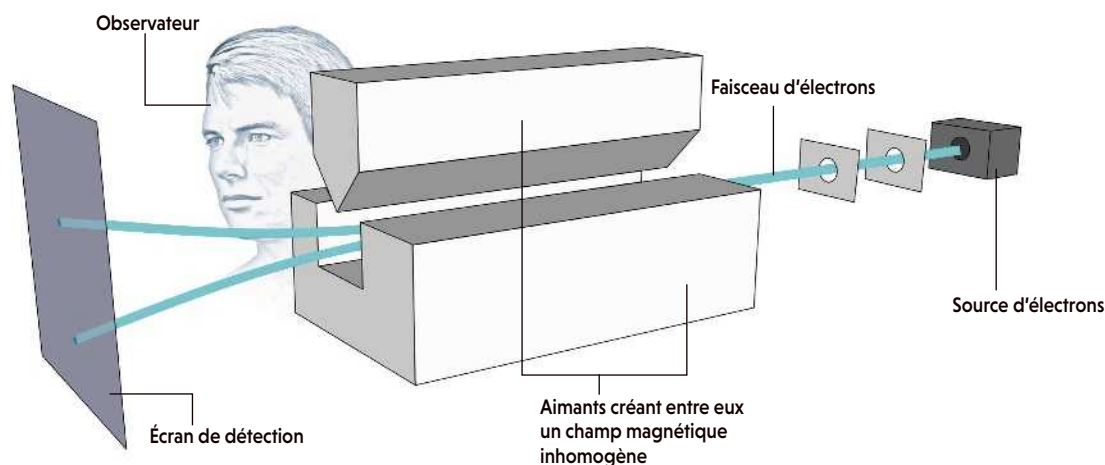
De plus, le même postulat affirme qu'après la mesure, l'état du système se trouve réduit au vecteur qui correspond à la valeur obtenue. C'est la « réduction (ou effondrement) du paquet d'ondes ». Dans notre exemple de superposition d'états de position, les coefficients des deux états étant identiques, le postulat prédit que l'on trouvera l'électron en X ou en Y avec la même probabilité $\frac{1}{2}$, et jamais une autre position, et que si l'on trouve par exemple X , le système passe brutalement, sous l'effet de la mesure, de l'état superposé $|X\rangle + |Y\rangle$ à l'état $|X\rangle$; on dit que l'état superposé est « projeté » sur l'état $|X\rangle$.

Une mesure sur un système physique fait bien sûr intervenir un appareil de mesure. Mais les deux moyens mentionnés ci-dessus de déterminer l'évolution du système fournissent des résultats différents, même lorsqu'on applique l'équation de Schrödinger conjointement au système et à l'appareil qui le mesure. Cela ne serait pas problématique si l'on était capable de dire clairement quand on doit utiliser l'équation de Schrödinger et quand on doit utiliser le postulat de réduction du paquet d'ondes. Au premier abord, la réponse paraît simple : on applique le postulat de réduction du paquet d'ondes lorsqu'on effectue une mesure. Le problème est qu'on ne sait pas définir précisément ce qu'est une mesure dans la théorie quantique !

QU'EST-CE QU'UNE MESURE ?

Or savoir ce qu'est une mesure est la question la plus fondamentale, celle dont la réponse sépare nettement les physiciens en deux camps. Est-ce simplement le fait que la valeur d'une certaine grandeur physique (telle que la vitesse ou la position) soit enregistrée par un appareil indépendamment de tout observateur ? Dans ce cas, l'observateur se contentera de prendre connaissance à un moment ultérieur de la grandeur enregistrée et sera donc un simple témoin passif d'une mesure ; celle-ci ne consiste alors qu'à enregistrer un état de fait préexistant. C'est la situation en mécanique classique, où les valeurs des grandeurs physiques attachées à un système sont à tout moment parfaitement définies et déterminées.

Mais le formalisme de la théorie quantique ne permet ni de penser que la valeur >



> enregistrée était définie avant son enregistrement par l'appareil de mesure, ni de comprendre comment l'interaction avec cet appareil conduit à une valeur définie. La mécanique quantique prédit au contraire qu'après avoir interagi avec le système mesuré, l'appareil de mesure lui-même se retrouve dans un état dit « intriqué » avec le système, ce qui signifie que son état s'est corrélié de manière indissociable avec celui du système (qui est une superposition) et qu'il ne correspond plus à une valeur bien définie de ce que l'appareil de mesure est censé afficher.

UNE RÉALITÉ INDÉPENDANTE DE L'OBSERVATEUR ?

Physiciens et philosophes ont fait un grand nombre de propositions pour tenter de résoudre la question en préservant une objectivité stricte, c'est-à-dire une réalité indépendante de ceux qui l'observent. La plus connue, l'« interprétation de Copenhague », est celle que soutenaient deux des principaux fondateurs de la théorie quantique, le Danois Niels Bohr et l'Allemand Werner Heisenberg. Elle a dominé pendant un demi-siècle.

Schématiquement, cette interprétation dite aussi « orthodoxe » consiste à établir une démarcation entre le monde microscopique, où la physique quantique s'applique, et le monde macroscopique, où elle ne s'appliquerait pas. La difficulté évoquée disparaît donc, car l'appareil de mesure, étant macroscopique, n'obéirait pas aux lois quantiques. Mais cette dichotomie microscopique-macroscopique paraît très artificielle et, de nos jours, ce point de vue fait de moins en moins consensus.

C'est pour tenter de rendre compte du fait que l'appareil de mesure finit bien par afficher une valeur définie que le chercheur allemand Dieter Zeh a proposé en 1970 un mécanisme nommé « décohérence ». Étudié plus avant dans les années 1980 par le physicien polonais Wojciech Zurek, du Laboratoire national de Los Alamos, aux États-Unis, ce mécanisme fait

intervenir l'environnement dans lequel sont plongés à la fois le système mesuré et l'appareil de mesure : les interactions avec les très nombreux degrés de liberté du milieu environnant seraient supposées perturber les superpositions d'états au point que celles-ci disparaîtraient en un temps extrêmement court.

Mais en fait, l'idée de décohérence explique seulement pourquoi l'appareil macroscopique ne peut apparaître dans une superposition d'états à aucun observateur, car elle repose essentiellement sur les limites pratiques de nos moyens d'observation, à savoir que nous sommes concrètement incapables de faire toutes les mesures concernant les corrélations du système et de l'appareil avec tous les degrés de liberté de l'environnement. Il faudrait par exemple mesurer toutes les positions de toutes les molécules d'air de la pièce qui contient l'appareil, ce qui est bien entendu totalement irréalisable en pratique.

Le mécanisme de décohérence n'élimine donc nullement le rôle de l'observateur, puisqu'il explique comment apparaît le monde à un observateur dont les moyens sont limités, et non pas comment est « réellement » le monde en l'absence d'un observateur.

En fait, il paraît logiquement inévitable que, sauf à modifier le cadre de la mécanique quantique usuelle, il soit impossible de définir rigoureusement et de façon strictement objective ce qu'est une mesure. L'observateur doit être pris en compte d'une manière ou d'une autre, et il semble que ce ne soit qu'au moment où un observateur prend connaissance du résultat que celui-ci se détermine.

Cela ne devrait pas paraître si choquant. Après tout, la science n'est rien d'autre qu'une description du monde tel qu'ultimement il nous apparaît. Le fait que la mécanique classique qui décrit le monde macroscopique soit compatible avec l'hypothèse que le monde est « réellement » tel qu'il nous apparaît n'est pas une preuve que cela soit encore vrai dans des domaines étrangers à notre expérience quotidienne.

UN EXEMPLE DE MESURE

L'expérience schématisée ici, similaire à la célèbre expérience de Stern-Gerlach réalisée en 1922 et qui a révélé l'existence du spin (un moment cinétique intrinsèque) des électrons, a deux résultats possibles : chaque électron est, selon son état de spin, dévié par le champ magnétique du dispositif soit vers le haut, soit vers le bas, avec la même amplitude. Observer le point d'impact de la particule sur l'écran phosphorescent revient alors à mesurer le spin de cette particule selon la direction verticale. Les règles de la mécanique quantique déterminent sans ambiguïté les probabilités d'observer tel ou tel résultat en fonction de l'état des particules. Mais cette théorie ne définissant pas précisément ce qu'est une mesure, les rôles que tiennent dans le processus l'appareil de mesure et l'observateur restent l'objet d'interprétations divergentes.

LE PROBLÈME DE LA MESURE

Le problème de la mesure en mécanique quantique provient du fait que les trois propositions suivantes semblent incompatibles : (1) Le vecteur d'état (ou fonction d'onde) d'un système physique fournit une description complète de ce système. (2) Le vecteur d'état évolue toujours dans le temps selon l'équation de Schrödinger,

qui est une équation linéaire. (3) Lorsqu'on effectue une mesure sur un système physique, on obtient un unique résultat bien déterminé. Il semble donc nécessaire d'abandonner au moins l'une d'entre elles. L'abandon de (1) conduit aux théories à variables cachées comme celle de David Bohm. L'abandon de (2) conduit aux théories à effondrement spontané telles que celle de Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber. L'abandon de (3) conduit à la théorie des mondes multiples de Hugh Everett. Le solipsisme convivial réconcilie ces trois propositions en réinterprétant le concept de mesure.

Déjà dans la première moitié du xx^e siècle, les chercheurs d'origine hongroise John von Neumann et Eugene Wigner, ainsi que l'Allemand Fritz London et le Français Edmond Bauer, avaient émis l'idée selon laquelle c'est la conscience de l'observateur qui est responsable de la réduction du paquet d'ondes. Mais leur conception avait été accueillie très froidement. Il faut dire qu'elle avait l'inconvénient de rappeler étrangement le dualisme de Descartes, qui postulait une action de l'esprit sur la matière, et elle a été abandonnée.

Autour de 1956, en réaction à l'interprétation de Copenhague et pour éliminer le postulat de réduction du paquet d'ondes qu'il trouvait «quelque peu répugnant», le physicien américain Hugh Everett a développé une autre interprétation. Celle-ci suppose que la mécanique quantique s'applique à la totalité des systèmes, aussi bien microscopiques que macroscopiques, mais qu'il n'est nul besoin d'utiliser le postulat de réduction du paquet d'ondes car, lors de chaque mesure, le monde se duplique en autant de mondes et d'observateurs différents qu'il existe de résultats possibles pour la mesure effectuée.

Cette interprétation (qui se ramifie elle-même en diverses variantes et a donné lieu à de nombreuses manières différentes de la comprendre) présente l'inconvénient majeur d'impliquer l'existence simultanée d'une infinité de mondes différents, d'où le nom de «théorie des mondes multiples» sous lequel elle est plus connue.

Dans son ouvrage *Le Réel voilé*, paru en 1994, le physicien et philosophe français Bernard d'Espagnat a critiqué cette prolifération

incontrôlée qui aboutit à une infinité continue de mondes. À la suite de cette critique, j'ai développé en 2000 dans mon livre *Les Limites de la connaissance*, puis dans une série d'articles plus récents, une autre interprétation, le «solipsisme convivial», qui s'abstient du principe de réduction du paquet d'ondes, mais qui ne suppose nullement que l'Univers se multiplie en plusieurs versions à chaque mesure.

Bien qu'il fasse jouer un rôle essentiel à la perception de l'observateur, le solipsisme convivial n'est pas sujet à l'objection faite à von Neumann, Wigner, London et Bauer, car la conscience de l'observateur n'a aucun effet physique sur le système observé. Comme nous allons le voir, ce dernier reste dans une superposition d'états, et c'est uniquement la façon dont nous le percevons qui sélectionne l'une des possibilités.

LE SOLIPSISME CONVIVIAL

Le solipsisme convivial part de l'idée qu'une mesure est la perception d'un état par un observateur. Une mesure n'est alors pas une action physique, mais un acte perceptif. Elle n'a aucun effet sur l'état du système mesuré : cet état reste le même après la mesure et il n'y a donc aucune réduction du paquet d'ondes. C'est un point commun avec la théorie d'Everett, mais la différence est qu'il n'y est nullement postulé que l'observateur (et le monde qui l'entoure) se scinde en autant de versions de lui-même qu'il y a de résultats possibles. Ici, une seule des possibilités est sélectionnée par la perception de l'observateur, lequel voit donc, d'une certaine manière, une sorte de projection de l'état superposé sur l'une de ses composantes.

Cette sélection se fait à travers un mécanisme d'«accrochage» qui prescrit : 1) que la perception de l'observateur «s'accroche» à l'une des branches possibles de l'état superposé ; 2) que la sélection se fait en respectant les probabilités données par la règle de Born ; 3) qu'une fois accrochée à une branche, la perception d'un observateur donné ne peut s'accrocher qu'à des branches issues de celle-là pour toute mesure ultérieure.

Certaines images animées ou fixes (voir l'illustration page 31), qu'il est possible de voir de différentes façons, peuvent aider à comprendre le phénomène – bien qu'une grande prudence s'impose avec de telles analogies. L'une des plus connues est celle de la danseuse, une silhouette que l'on peut voir tourner sur elle-même tantôt dans le sens des aiguilles d'une montre, tantôt dans le sens inverse (voir par exemple la vidéo www.youtube.com/watch?v=9CEr2GfGilw). C'est une illusion d'optique bistable.

La question «quel est le sens réel dans lequel tourne la danseuse?» n'a dans ce cas pas de sens. Il n'existe pas de direction réelle de rotation. Il y a simplement un ensemble de ➤

DIVERSES INTERPRÉTATIONS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

L'interprétation de Copenhague, ou interprétation orthodoxe

Soutenue presque dès les débuts de la mécanique quantique par Niels Bohr et Werner Heisenberg, elle a longtemps été l'interprétation dominante, adoptée par défaut par la quasi-totalité des physiciens. Elle considère qu'une mesure est une interaction d'un système microscopique avec un appareil macroscopique qui, lui, ne doit pas être décrit par la mécanique quantique. Elle est de moins en moins acceptée en raison de la distinction artificielle et vague faite entre microscopique et macroscopique, et parce qu'il n'y a pas de justification à ce

qu'un système macroscopique échappe aux lois quantiques.

L'interprétation de de Broglie-Bohm

Avancée par David Bohm en 1952 en reprenant des idées de Louis de Broglie, elle fait l'hypothèse que la fonction d'onde ne fournit pas une description complète du système et qu'il est donc nécessaire de lui ajouter des variables supplémentaires, des « variables cachées » dont les valeurs sont supposées toujours bien définies et qui déterminent les résultats des mesures. Longtemps rejetée, la théorie de de Broglie-Bohm commence à être défendue par un nombre croissant de physiciens. Mais elle repose sur l'hypothèse de l'existence d'un potentiel quantique qui a une influence non locale et instantanée sur les trajectoires des particules ; de plus, la question de savoir s'il est possible d'en faire une théorie compatible avec la relativité restreinte d'Einstein reste ouverte.

L'interprétation GRW, ou théorie de l'effondrement spontané

Énoncée en 1986 par les physiciens italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (d'initiales GRW), cette théorie modifie l'équation de Schrödinger en lui ajoutant un terme aléatoire et non linéaire qui a pour effet que tout objet microscopique a une probabilité (très faible) de subir une évolution spontanée qui le localise à une position déterminée dans l'espace, ce qui permet effectivement de résoudre le problème de la mesure. Mais ce processus apparaît très *ad hoc* et nécessite d'être numériquement ajusté de façon artificielle pour reproduire les résultats de la mécanique quantique. Par ailleurs, préciser l'ontologie de cette théorie, c'est-à-dire la nature des objets physiques dont elle postule l'existence, se heurte à d'importantes difficultés.

L'interprétation des mondes multiples, ou théorie d'Everett

Émise par Hugh Everett dans sa thèse de 1957, elle suppose que lorsqu'une mesure est effectuée, toutes les valeurs possibles sont en fait obtenues car l'Univers (et donc

l'observateur lui-même) se scinde en autant de mondes différents qu'il y a de résultats possibles. Outre le côté insatisfaisant de postuler une multiplication de mondes en nombre infini, cette interprétation se heurte au problème fondamental de ne pas pouvoir rendre compte des probabilités qui interviennent de manière essentielle dans la règle de Born.

Le solipsisme convivial

Développée par l'auteur, cette interprétation pose qu'une mesure n'est pas un processus physique, mais la perception par un observateur d'un résultat, issu de l'observation de l'état superposé d'un système. Comme dans la théorie des mondes multiples, il n'y a donc aucune réduction physique de la fonction d'onde ; en revanche, nul n'est besoin de recourir à une multiplication infinie de mondes. C'est la seule interprétation qui réconcilie les trois propositions du problème de la mesure (voir l'encadré page 29) sans avoir à modifier le formalisme quantique.

> pixels en mouvement que chaque observateur interprète comme une danseuse tournant dans un sens ou dans l'autre selon sa configuration mentale du moment. Avec toutes les précautions qui s'imposent, on pourrait dire que l'état de cette danseuse est l'analogue de la superposition : $|\text{sens horaire}\rangle + |\text{sens antihoraire}\rangle$.

Cet état ne correspond ni à tourner dans un sens ni à tourner dans l'autre, mais représente quelque chose qui n'a pas d'équivalent classique. En revanche, quand nous observons une telle image, nous l'interprétons sous la forme d'une danseuse qui tourne dans un sens déterminé, et ce sens n'est pas forcément le même pour tous les observateurs. Voir la danseuse tourner dans un sens déterminé n'implique nullement que la danseuse tourne réellement dans ce sens et ne modifie en rien l'image elle-même, qui reste une superposition. Cette observation signifie seulement que notre perception a construit une manière déterminée de voir cette image, que nous sommes incapables de percevoir en tant que superposition.

Cette analogie est très limitée, car il y a entre un état quantique superposé et l'état de la danseuse de nombreuses différences, mais cela permet d'avoir une idée approximative de ce qui se passe lorsqu'on perçoit une superposition quantique.

Le solipsisme convivial suppose qu'un état superposé ne peut être perçu en tant que tel et donne lieu, dans l'esprit de l'observateur, à une représentation correspondant à l'une des composantes de la superposition. Mais quelle que soit la composante retenue par la perception de l'observateur, l'état du système n'est en rien modifié et reste une superposition. Dans ce cadre, la perception de chaque observateur n'est pas absolue, mais relative à lui-même. Mais alors, deux observateurs pourraient-ils être en désaccord sur la mesure d'un même système ? La réponse est non, comme je vais l'expliquer.

PAS DE DÉSACCORDS

Pour un observateur donné, disons Alice, tout autre observateur, par exemple Bernard, doit être considéré comme un système quantique susceptible d'être lui-même dans un état superposé. Une communication entre Alice et Bernard est, pour chacun d'eux, l'équivalent d'une mesure de son interlocuteur. Dans ces conditions (et contrairement à ce qui se passe avec l'image animée de la danseuse), les règles du formalisme quantique garantissent qu'il ne sera jamais possible qu'Alice et Bernard, échangeant sur le résultat qu'ils ont chacun constaté après avoir fait une mesure quelconque, puissent être en désaccord même s'il n'est

nullement obligatoire qu'ils aient tous les deux perçu le même résultat. Cela peut paraître étrange, mais c'est l'un des points essentiels du solipsisme convivial, qui amène à renoncer à l'idée que nous pouvons « nous mettre à la place de quelqu'un d'autre pour parler de ses perceptions ». Expliquons-nous.

Alice échangeant avec Bernard, c'est-à-dire mesurant Bernard – qui, du point de vue d'Alice, reste dans un état superposé quel que soit le résultat qu'il a trouvé tant qu'elle n'a pas « mesuré » Bernard – entendra toujours celui-ci lui donner un résultat conforme à ce qu'elle a vu elle-même. Cet état de fait, qui justifie l'adjectif « convivial », provient du fait que, selon le mécanisme d'accrochage, un observateur ne peut obtenir comme résultat possible d'une mesure que ceux qui sont liés à la branche à laquelle il est accroché. Alice ne peut donc obtenir, quand elle parle avec Bernard, qu'un résultat correspondant à « la partie de Bernard » corrélée au même résultat de mesure sur le système que celui qu'elle a déjà obtenu.

Les choses sont même plus strictes que cela, car, compte tenu de la relativité de toute description dans ce cadre, une phrase doit toujours être rapportée à celui qui l'énonce. Il est donc illégitime de parler à la fois de ce qu'Alice et Bernard ont perçu : cela demanderait de se placer du point de vue d'un observateur ayant accès simultanément à leurs deux perceptions, et un tel observateur n'existe pas. L'étrangeté de la phrase selon laquelle Alice et Bernard ne peuvent jamais être en désaccord même s'ils n'ont pas perçu la même chose, est donc due à l'illégitimité, dans ce cadre, de faire référence simultanément à la perception d'Alice et à celle de Bernard. Seule la phrase « Alice a vu ceci et a entendu Bernard lui dire qu'il a vu ceci » est légitime. En revanche, la phrase « Alice a vu ceci alors que Bernard a vu cela » est interdite, car elle n'a pas de sens dans le monde du solipsisme convivial.

DES DIFFICULTÉS APLANIES

Quelle que soit l'étrangeté de cette situation, il est possible de donner un sens mathématique précis à ces idées et de montrer comment elles permettent de résoudre de nombreuses énigmes.

Le formalisme mathématique du solipsisme convivial permet de résoudre le problème de la mesure. Il évite aussi tous les paradoxes liés à la mesure de deux systèmes intriqués, comme la question de savoir laquelle des deux mesures détermine la valeur de l'autre lorsqu'elles sont séparées par un « intervalle du genre espace » (deux mesures séparées dans l'espace et dans le temps de telle façon qu'aucun signal physique, dont la vitesse de propagation est au maximum celle de la lumière, ne puisse relier les deux événements) – un intervalle tel que, selon la théorie



Selon le « solipsisme convivial » développé par l'auteur, l'observateur qui mesure un système ne modifie *a priori* pas l'état quantique de celui-ci. Mais quand cet état quantique est une superposition, l'observateur ne peut percevoir qu'un résultat correspondant à l'un des états de base entrant dans la superposition. Une analogie est donnée par des images telles que celle-ci, qui peut être « lue » de deux façons différentes : soit la danseuse semble nous tourner le dos, soit elle semble nous faire face ; dans une séquence animée, elle semble tourner soit dans un sens, soit dans l'autre.

de la relativité, aucune des deux mesures ne peut être considérée d'une manière absolue comme antérieure à l'autre. Le solipsisme convivial permet aussi de rétablir la localité (l'idée que les influences physiques se font de proche en proche, et non à distance de façon instantanée) en mécanique quantique, alors qu'il est fréquemment admis que cette théorie doit nécessairement être non locale.

Le prix à payer n'est cependant pas négligeable, et c'est principalement cela que beaucoup de physiciens ne sont pas prêts à accepter. Il faut renoncer à penser que le monde est directement conforme à ce que nous percevons et que nous le percevons tous de la même façon. Le monde du solipsisme convivial est étrange : nous n'en avons chacun qu'une perception réduite à une projection ou une coupe et nous ne voyons pas forcément tous la même projection. En ce sens, c'est une sorte de solipsisme, car chacun vit dans un monde de perceptions qui lui sont propres. Mais il est convivial dans la mesure où, contrairement au solipsisme classique, il laisse la place à d'autres esprits et à un monde extérieur, et il est tel que, malgré des perceptions pouvant être différentes, deux observateurs ne pourront jamais constater de désaccord entre eux.

Pour des physiciens attachés à une description plus strictement conforme à nos intuitions habituelles, ce renoncement peut paraître trop important. Pour d'autres, tirant la leçon du constat que la science n'a pas cessé de nous forcer progressivement à renoncer à nos intuitions les plus fortement ancrées, surtout depuis l'avènement de la mécanique quantique, cette nouvelle vision est un moyen de résoudre des énigmes qui résistent depuis longtemps. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Zwrn, **Nonlocality versus modified realism**, *Foundations of Physics*, vol. 50, pp. 1-26, 2020.

H. Zwrn, **Delayed choice, complementarity, entanglement and measurement**, *Physics Essays*, vol. 30(3), pp. 281-293, 2017 (<http://arxiv.org/abs/1607.02364>).

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2^e édition, 2017.

H. Zwrn, **The measurement problem : Decoherence and convivial solipsism**, *Foundations of Physics*, vol. 46, pp. 635-667, 2016.

B. d'Espagnat et H. Zwrn (dir.), **Le Monde quantique**, Éd. Matériologiques, 2014.

H. Zwrn, **Les Limites de la connaissance**, Odile Jacob, 2000.

B. d'Espagnat, **Le Réel voilé**, Fayard, 1994.

L'ESSENTIEL

> La mécanique quantique prédit avec grand succès la statistique des résultats expérimentaux. Mais il n'y a pas de consensus sur la réalité qui la sous-tend.

> Selon la mécanique bohmienne, ou théorie dBB, les particules ont des positions toujours bien définies, mais sont guidées par une onde qui obéit à l'équation

de Schrödinger de la mécanique quantique.

> Cette théorie, qui suppose une réalité univoque et déterministe, donc de type classique, conduit aux mêmes prédictions que la mécanique quantique.

> Les recherches se poursuivent pour la rendre compatible avec la théorie de la relativité et la théorie quantique des champs.

L'AUTEUR



WARD STRUYVE
chercheur postdoctorant
à l'Institut de physique théorique
et au Centre de logique et de
philosophie des sciences de la
KU Leuven (Katholieke Universiteit
Leuven), à Louvain, en Belgique

Une réalité classique derrière l'étrangeté quantique?

Les lois de la mécanique quantique défient l'intuition et l'idée que nous avons de la réalité physique. Mais la théorie de De Broglie-Bohm, proposée il y a plusieurs décennies et revenue dans l'actualité, a l'ambition de les réconcilier.

La mécanique quantique représente l'un des plus grands succès de la physique moderne. Elle a permis d'expliquer et de prévoir avec précision une multitude de phénomènes. Et pourtant, l'interprétation de cette théorie reste toujours débattue: ce qu'elle nous dit sur la nature du monde physique, sur son ontologie en d'autres termes, n'est pas très clair.

On dit parfois que ce n'est pas le rôle de la théorie, qu'elle ne sert qu'à rendre compte des résultats expérimentaux et qu'il est vain de lui demander plus. Mais une telle vision manque

cruellement d'ambition. En effet, nous, scientifiques, cherchons à découvrir à quoi ressemble le monde; nous devrions donc considérer les expériences comme des guides et des tests de nos théories, et non comme leur raison d'être.

Or quand on essaye de comprendre la nature du monde sous-jacent à la mécanique quantique, de grandes difficultés surgissent. Pour les surmonter, l'une des voies les plus prometteuses, et probablement la plus simple, est la théorie de De Broglie-Bohm (ou dBB en abrégé). Cette approche tire son nom du physicien français Louis de Broglie (qui se