

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

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

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

H. Zwiirn, **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



Des expériences, dont les premières ont été réalisées en 2004 par l'équipe d'Yves Couder et Emmanuel Fort, à l'université Paris-Diderot, ont montré qu'une goutte rebondissant sur un liquide dont la surface est parcourue par une onde se comporte de façon analogue à une particule dans la théorie de De Broglie-Bohm : l'onde pilote la goutte et lui confère un comportement semblable à celui d'une particule obéissant aux lois de la mécanique quantique. De telles expériences illustrent, sur un système de nature classique, des comportements quantiques.

> prononce comme «de Breuil»), avec ses travaux précurseurs de 1924-1927, et de David Bohm, le physicien américain qui l'a développée dans les années 1950 (voir l'encadré page ci-contre). Appelée aussi théorie de l'onde pilote, ou mécanique bohmienne, la théorie dBB revient à l'actualité et fait l'objet d'actives recherches, à la faveur du renouveau des réflexions sur l'interprétation de la mécanique quantique.

UNE EXPÉRIENCE QUI RÉSUME L'ÉTRANGÉTÉ QUANTIQUE

Avant d'y venir, expliquons quelles difficultés d'interprétation la mécanique quantique soulève. On peut commencer par considérer une expérience simple et exemplaire, celle dite des fentes de Young. Elle consiste à diriger des particules, par exemple des électrons, vers un écran opaque percé de deux fentes parallèles et proches. Après avoir traversé les fentes, les particules sont détectées sur un deuxième écran. On peut envoyer les particules une par une et les détecter une par une, ce qui se traduit par l'accumulation, avec le temps, de points d'impact sur l'écran de détection.

Si, au lieu d'électrons, on envoie sur les fentes des objets plus gros, de petites billes par exemple, ces objets suivront approximativement des lignes droites et formeront donc, en s'accumulant sur l'écran de détection, deux petites taches situées dans le prolongement des deux lignes droites reliant la source d'électrons aux fentes. Or ce n'est pas du tout ce que l'on observe avec des électrons ou d'autres particules très microscopiques : sur l'écran de détection, on voit se former des franges, c'est-à-dire une alternance de régions à densité d'impacts faible et élevée (voir la figure page 38).

Un tel motif est une figure d'interférence, caractéristique des phénomènes ondulatoires. Par exemple, des vaguelettes se propageant à la surface de l'eau produisent une figure d'interférence similaire – des régions où l'amplitude des vagues est alternativement petite et grande – lorsqu'elles traversent une barrière comportant deux ouvertures proches.

Comment la mécanique quantique rend-elle compte de l'expérience de la double fente ? Elle décrit l'électron comme une onde, représentée mathématiquement par une «fonction d'onde». Comme pour une onde classique, l'onde de l'électron arrive sur les deux fentes, dont chacune devient alors la source d'une onde secondaire, et ce sont les deux ondes secondaires ainsi produites qui interfèrent.

Mais l'analogie avec une onde classique s'arrête là. Alors que l'onde de l'électron qui atteint l'écran de détection s'étale sur une assez grande région, comme avec les vaguelettes à la surface de l'eau, l'électron ne laisse qu'une trace ponctuelle sur l'écran : à ce stade,



Louis de Broglie (1892-1987), physicien français, a émis entre 1924 et 1927 les premières idées selon lesquelles le comportement quantique des particules peut s'expliquer en supposant l'existence d'une onde qui les guide.



L'Américain David Bohm (1917-1992) a développé dans les années 1950 les idées de Louis de Broglie, ce qui a donné la mécanique bohmienne, ou théorie dBB.

il n'est plus du tout étalé. Afin de rendre compte de cette détection très localisée, la mécanique quantique postule que la fonction d'onde subit un effondrement instantané. Autrement dit, quand l'onde de l'électron atteint l'écran de détection, elle se réduit instantanément à quelque chose de très localisé. Cette réduction est censée se produire lors de la mesure et la probabilité d'observer l'impact en un point de l'écran est déterminée par l'amplitude de l'onde en ce point. Plus cette amplitude est élevée au point considéré, plus il est probable que l'onde s'y réduise.

La mécanique quantique explique ainsi la figure d'interférence qui se construit au fil du temps, avec l'accumulation des impacts d'électrons. Il y a toutefois un problème. On a supposé que l'effondrement de l'onde se produit une fois l'écran de détection atteint. Mais est-ce vraiment le cas ? Il se peut aussi que l'effondrement se fasse à un moment ultérieur, par exemple lorsque quelqu'un regarde l'écran. Dans la version orthodoxe de la mécanique quantique, l'effondrement est supposé se produire lors de la mesure. Mais quels processus physiques faut-il exactement pour qu'on puisse parler de «mesure» ? Faut-il que l'appareil de mesure soit d'un type particulier ? Une mesure implique-t-elle nécessairement un observateur humain ? Et cet observateur doit-il être suffisamment qualifié, par exemple titulaire d'un doctorat en physique ? Tant qu'on ne précise pas en quoi consiste exactement une mesure, on ne sait pas exactement quand l'effondrement se produit et les prévisions sont alors ambiguës.

LA MESURE, UN PROBLÈME ÉPINEUX

En 1935, le physicien autrichien Erwin Schrödinger a mis en exergue le problème de la mesure en imaginant un scénario impliquant un chat. Cette expérience de pensée aujourd'hui célèbre consiste à placer un chat bien vivant dans une boîte contenant un atome radioactif et un dispositif qui, si l'atome se désintègre, libère un poison mortel. Le couplage entre l'état du félin et celui de l'atome fait que la fonction d'onde du système atome-chat ne correspond pas à un état bien défini de l'animal, mais à une somme (une superposition, voir l'article d'Hervé Zwirn dans ce numéro) de l'état «chat vivant» et de l'état «chat mort». Mais alors, avant l'effondrement de la fonction d'onde du chat vers l'état vivant ou vers l'état mort, que peut ressentir cet animal ? Et quand l'effondrement se produit-il ? L'effondrement se produit-il juste au moment où un observateur humain ouvre la boîte et regarde à l'intérieur ?

Le problème de la mesure n'est pas le seul obstacle à la compréhension de la nature du monde quantique. Un autre exemple de difficulté est que le type d'onde introduit en