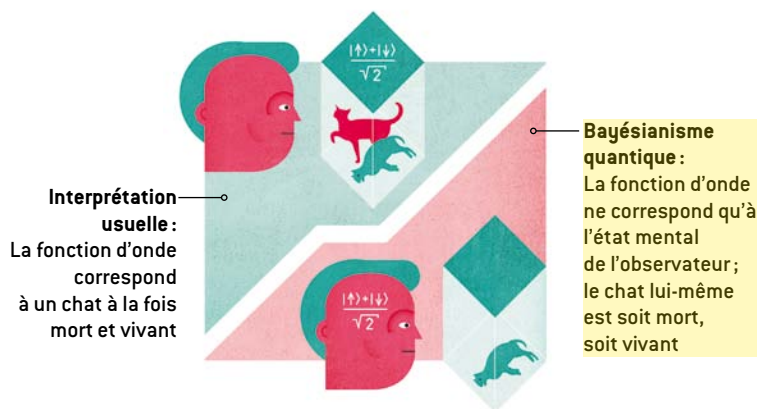


LE REMÈDE À UNE ABSURDITÉ QUANTIQUE

Pour illustrer la différence entre le bayésianisme quantique et l'interprétation orthodoxe de la théorie quantique, prenons l'exemple du chat de Schrödinger. Dans la version usuelle, un chat et une fiole de poison sont enfermés dans une boîte hermétique. Un événement quantique qui se produit avec une probabilité de 50 pour cent brise (ou ne brise pas) la fiole, et tue (ou ne tue pas) le chat. Avant qu'un observateur ne regarde à l'intérieur de la boîte, la fonction d'onde décrivant le système est une superposition des états *vivant* et *mort*, comme devrait l'être le chat lui-même. L'acte d'observation projette le chat dans l'un ou l'autre état. En revanche, dans le QBisme, la fonction d'onde est simplement une description de l'état mental de l'observateur. La superposition s'applique à cet état et à rien d'autre. Le chat est soit mort, soit vivant ; l'observation révèle dans quel cas il se trouve.



En 2001, quelques physiciens ont commencé à développer un modèle qui élimine les paradoxes quantiques ou, du moins, les présente sous une forme moins troublante. Le modèle, nommé bayésianisme quantique, ou QBisme en abrégé, réinterprète l'entité qui se trouve au cœur de l'étrangeté quantique : la fonction d'onde.

Dans la vision usuelle de la théorie quantique, un objet tel qu'un électron est représenté par sa « fonction d'onde », une fonction $\psi(x, t)$ qui assigne à chaque instant t une valeur à tout point x de l'espace et qui décrit les propriétés de l'objet. Pour prédire le comportement de l'électron, il faut calculer l'évolution de sa fonction d'onde au cours du temps. Le résultat du calcul fournira la probabilité que l'électron ait une certaine propriété (par exemple celle de se trouver à tel ou tel endroit). Mais des problèmes surgissent lorsqu'on suppose que la fonction d'onde a une réalité.

Le QBisme, qui combine la théorie quantique avec une interprétation particulière des probabilités, affirme que la fonction d'onde n'a pas de réalité objective. En fait, pour le QBisme, la fonction d'onde est une sorte de manuel de l'utilisateur, un outil mathématique dont se sert l'observa-

teur pour prendre des décisions éclairées concernant le monde qui l'entoure. Plus précisément, selon cette interprétation, l'observateur utilise la fonction d'onde pour traduire sa conviction personnelle qu'un système quantique possède telle ou telle propriété, sachant que les choix et actions propres de l'individu modifient le système d'une manière par nature incertaine.

La fonction d'onde, une abstraction

Un autre observateur, utilisant une fonction d'onde qui décrit le monde tel que cette personne le voit, peut parvenir à une conclusion totalement différente sur le même système quantique. À un système donné (un événement donné) peuvent ainsi correspondre autant de fonctions d'onde différentes qu'il y a d'observateurs. C'est lorsque les observateurs ont communiqué entre eux et modifié leurs fonctions d'onde personnelles pour rendre compte des connaissances nouvellement acquises qu'une vision du monde cohérente émerge.

Vue ainsi, la fonction d'onde « pourrait bien être l'abstraction la plus puissante que l'on ait jamais trouvée », selon David Mermin,

un physicien théoricien de l'Université Cornell récemment converti au QBisme.

L'idée selon laquelle la fonction d'onde ne serait pas une entité réelle remonte aux années 1930 et aux écrits de Niels Bohr, l'un des fondateurs de la mécanique quantique. Ce physicien danois considérait qu'elle faisait partie du formalisme « purement symbolique » de la théorie quantique : un outil de calcul, et rien de plus. Le QBisme est le premier modèle à donner un ancrage mathématique à l'affirmation de Bohr. Il fusionne la théorie quantique avec les statistiques bayésiennes, un domaine vieux de 200 ans qui considère la probabilité comme le reflet d'une croyance subjective.

Les statistiques bayésiennes fournissent également des règles mathématiques formelles sur la façon de mettre à jour ses croyances subjectives à la lumière d'informations nouvelles. En interprétant la fonction d'onde comme une croyance subjective, sujette à être révisée par les règles de la statistique bayésienne, on fait disparaître les mystérieux paradoxes de la physique quantique, affirment les partisans du QBisme.

Considérons à nouveau l'électron. Quand nous détectons un électron, nous le trouvons en un endroit particulier. Mais quand nous ne regardons pas, la fonction d'onde de l'électron peut s'étaler, ce qui représente la possibilité que l'électron soit en de nombreux endroits à la fois. À ce stade, effectuons à nouveau une mesure. On trouvera encore l'électron en un endroit particulier. Selon le discours usuel, l'acte d'observation réduit instantanément la fonction d'onde à une fonction d'onde correspondant à une seule valeur, particulière, de la position.

Comme cette réduction semble se produire partout exactement au même moment, on a une violation apparente du principe de localité (l'idée que tout changement d'un objet doit être provoqué par un autre objet de son voisinage immédiat). Cela conduit à son tour à une des énigmes qu'Albert Einstein qualifiait d'« action fantomatique à distance ».

Depuis la naissance de la théorie quantique, les physiciens ont vu la réduction de la fonction d'onde comme une caractéristique paradoxale et troublante de la théorie. Cela a poussé les physiciens à développer des versions alternatives de la mécanique quantique, avec un succès mitigé (voir l'encadré page 34).

Pour le QBisme, en revanche, il n'y a pas de paradoxe. L'effondrement de la fonction d'onde signifie juste qu'un observateur a subitement et de manière discontinue révisé les probabilités qu'il attribue au système, sur la base de nouvelles informations, de la même façon qu'un médecin modifierait le pronostic d'un malade sur la base d'une nouvelle analyse de sang. Le système quantique n'a pas subi de changement étrange et inexplicable; le changement est dans la fonction d'onde, choisie par l'observateur pour traduire ses attentes.

On peut appliquer cette façon de penser au célèbre paradoxe du chat de Schrödinger. Le physicien autrichien Erwin Schrödinger avait imaginé une enceinte close contenant un chat vivant, une fiole de poison et un atome radioactif ayant une chance sur deux de se désintégrer dans l'heure qui suit, d'après les lois quantiques. Si l'atome se désintègre, un marteau brise la fiole et libère le poison, qui tue le chat. S'il ne se désintègre pas, le chat survit.

Neutraliser les paradoxes

Faisons l'expérience, mais sans regarder à l'intérieur de l'enceinte. Au bout d'une heure, la théorie quantique usuelle stipule que la fonction d'onde de l'atome est une superposition de deux états : l'état désintégré et l'état non désintégré. Mais comme nous n'avons pas regardé à l'intérieur de la boîte, la superposition va plus loin. Le marteau est également dans une superposition d'états, tout comme la fiole de poison. Et, ce qui est plus grotesque, le formalisme usuel de la mécanique quantique implique que le chat aussi soit dans une superposition d'états : il est simultanément mort et vivant, ce qui nous paraît absurde.

En considérant la fonction d'onde comme une propriété subjective de l'observateur, et non comme une propriété objective du chat dans l'enceinte, le QBisme résout le paradoxe. La théorie affirme que, bien sûr, le chat est soit mort, soit vivant, et pas les deux à la fois. Certes, sa fonction d'onde représente une superposition de *vivant* et *mort*, mais une fonction d'onde n'est qu'une description de ce que pense l'observateur.

L'espoir est qu'en éliminant les paradoxes, le QBisme aidera les physiciens à

mieux cerner les véritables caractéristiques fondamentales de la théorie quantique – et les « empêchera de perdre leur temps à se poser des questions stupides sur des énigmes imaginaires », comme le dit D. Mermin.

Le QBisme est né dans un court article publié en janvier 2002 sous le titre « Les probabilités quantiques en tant que probabilités bayésiennes ». Ce texte était signé de Carlton Caves, de l'Université du Nouveau-Mexique, Christopher Fuchs, alors aux Laboratoires Bell dans le New Jersey, et Ruediger Schack, de l'Université de Londres. Tous trois sont des théoriciens de l'information quantique, et leurs affiliations respectives à un département de physique, un laboratoire industriel et un département de mathématiques illustrent la nature interdisciplinaire de leurs réflexions.

Au cours de la décennie écoulée depuis, Ch. Fuchs a rejoint le *Perimeter Institute*,

En considérant la fonction d'onde du chat comme une propriété subjective de l'observateur, et non comme une propriété objective de l'animal, le QBisme résoudrait le paradoxe du chat de Schrödinger.

dans l'Ontario (Canada), et endossa le rôle de principal porte-parole du QBisme. Ce Texan trapu, au tempérament enjoué et aux manières cordiales, a un sens de l'humour irrévérencieux et irrésistible. Ses collègues ne sont pas étonnés quand il commence un article par « Dans cet article, je vais tenter de jeter un trouble de bon aloi ».

La conviction de Ch. Fuchs semble être que la science est essentiellement une activité de communication et qu'une compréhension profonde d'un problème ne s'obtient qu'au prix d'un rude combat intellectuel. Ce physicien est à lui seul un tourbillon d'activité, transportant son ordinateur portable aux quatre coins du globe dans un vieux sac à dos, organisant des conférences, animant des débats scientifiques et donnant des cours dans les universités.

Dans cet esprit, Ch. Fuchs a créé une nouvelle forme de littérature. En 2011, l'éditeur *Cambridge University Press* a publié sa correspondance électronique avec des

scientifiques du monde entier dans un volume de 600 pages intitulé *Coming of Age with Quantum Information* (Le passage à l'information quantique). Faisant la chronique des affres de la naissance du QBisme, l'ouvrage laisse entrevoir comment la physique théorique est créée par des êtres humains bien réels. Le livre témoigne également de la conviction de Ch. Fuchs qui, contrairement à la plupart des scientifiques, estime que la philosophie est importante non seulement en raison de son influence sur la physique, mais aussi en raison des idées profondes que la physique peut lui apporter.

L'ouverture d'esprit de Ch. Fuchs aux préoccupations philosophiques devient claire quand on réfléchit à la manière dont le QBisme nous oblige à reconsidérer ce qu'on entend par une probabilité. Les probabilités, c'est comme le temps : vous savez

ce que c'est, jusqu'à ce qu'on vous demande de le définir. On comprend assez bien que la probabilité de 50 pour cent de tomber sur *face* en lançant une pièce non truquée signifie que, dans une longue série de lancers, on obtiendra *face* dans la moitié des cas. Mais comment faut-il comprendre une affirmation telle que « La probabilité qu'il pleuve ce soir est de 60 pour cent », la situation (« ce soir ») ne pouvant

être reproduite ?

Probabilités subjectives ou objectives ?

Au cours des siècles récents, deux conceptions concurrentes de la probabilité ont été développées, chacune ayant ses variantes. L'interprétation dite fréquentiste définit la probabilité d'un événement comme sa fréquence relative dans une série d'essais. Ce nombre est censé être objectif et vérifiable, ainsi que directement applicable aux expériences scientifiques. L'exemple type est le lancer d'une pièce : dans un grand nombre de lancers, environ la moitié des résultats seront des *face*, de sorte que la probabilité de tomber sur *face* est approximativement égale à $1/2$ (en considérant un nombre infini de lancers, la probabilité est exactement égale à $1/2$; mais cette notion de probabilité devient alors invérifiable et perd sa prétention à l'objectivité).