

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 endossé 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 irréprensible. 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).

QUATRE INTERPRÉTATIONS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Que se passe-t-il réellement dans le monde quantique ? Les scientifiques ont proposé une dizaine d'interprétations différentes de ce qui est sous-jacent au formalisme mathématique. Le bayésianisme quantique est peut-être la plus radicale d'entre elles ; les quatre alternatives suivantes sont parmi les plus répandues.



L'interprétation dite de Copenhague, surtout due au Danois Niels Bohr et à l'Allemand Werner Heisenberg, est la version orthodoxe de la théorie quantique. Les propriétés mesurables d'un système tel qu'un atome sont déterminées par son « état quantique ». Ce dernier est décrit par une expression mathématique nommée fonction d'onde. Elle permet, à l'aide de la règle dite de Born, de calculer les probabilités des résultats d'une mesure. Lors d'une mesure, l'observateur provoque la réduction de l'état quantique en un nouvel état, qui correspond au résultat effectif de l'expérience. Cette réduction instantanée de la fonction d'onde soulève des difficultés conceptuelles, car elle suppose des effets se propageant plus vite que la lumière.



L'interprétation de l'onde-pilote. Plusieurs physiciens, dont Albert Einstein à un certain moment, ont privilégié une réécriture du corpus mathématique de la mécanique quantique de façon à inclure un champ de force réel, nommé onde-pilote, qui contrôle le mouvement d'une particule. Malheureusement, cette image séduisante échoue dès que plusieurs particules (disons N particules) sont impliquées. Elles ne se déplacent pas dans notre espace familier à trois dimensions, mais dans un espace abstrait à $3N$ dimensions. Plus troublant encore, l'onde-pilote exerce une action à distance, par laquelle des effets physiques sont transmis instantanément à grande distance.



L'interprétation des univers multiples. Selon cette idée radicale, l'état quantique de l'Univers est unique, évolue régulièrement et de manière prévisible. Quand on réalise une expérience pour déterminer par laquelle de deux fentes un électron est passé, par exemple, cet état ne se réduirait pas à l'état correspondant à une seule des fentes ; l'Univers se dédoublerait en deux branches indépendantes, correspondant aux deux résultats. Ainsi, au cours du temps, l'Univers se ramifierait indéfiniment comme un arbre où chacune des branches correspond à la réalisation d'un des résultats possibles. Mais cette théorie des « multivers » est incapable d'expliquer le processus responsable de la ramification et a du mal à justifier la règle de Born.



Théories de la réduction spontanée. Plutôt que d'éliminer la réduction de la fonction d'onde due à l'observateur, ces théories postulent qu'il s'agit d'un processus entièrement naturel : de tels processus ont lieu spontanément, bien que rarement, pour chaque système quantique, mais deviennent prépondérants quand le système quantique interagit avec un objet macroscopique. Ces théories doivent cependant expliquer comment est réalisée la réduction. Des expériences de laboratoire, portant sur des systèmes constitués de quelques atomes ou photons, ont été réalisées ou sont en cours afin d'analyser les mécanismes à l'œuvre et de les élucider.

On pourrait à la rigueur appliquer cette définition à la prévision du temps, en dénombrant les configurations météorologiques réelles ou simulées. Mais l'interprétation fréquentiste est inopérante pour attribuer une probabilité au succès d'une opération commando telle que l'assassinat de Ben Laden, situation manifestement non reproductible.

Le point de vue le plus ancien sur les probabilités est l'interprétation bayésienne. Il tire son nom de Thomas Bayes, pasteur anglais du XVIII^e siècle dont les idées ont été précisées et diffusées par le physicien français Pierre-Simon Laplace.

Des degrés de croyance mis à jour

À l'inverse de la probabilité fréquentiste, la probabilité bayésienne est subjective : elle mesure le degré de croyance qu'un événement se produira. Dans les cas simples tels que les lancers de pièce, les probabilités fréquentistes et bayésiennes sont en accord. Pour les prévisions météorologiques ou portant sur l'issue d'une

action militaire, la probabilité bayésienne, contrairement à la probabilité fréquentiste, a la liberté de combiner des informations statistiques quantitatives avec des estimations intuitives fondées sur l'expérience du passé.

L'interprétation bayésienne traite facilement les cas uniques, à propos desquels l'approche fréquentiste est muette, et évite les pièges de l'infini, mais sa véritable puissance est plus spécifique. Sur la base de cette interprétation, les probabilités attribuées à tel ou tel événement sont sujettes à changement, parce que les degrés de croyance ne sont pas définitifs. Un météorologue fréquentiste n'aurait pas de mal à calculer la probabilité de pluie si la région a un climat stable, prédictible depuis de nombreuses années. Mais dans le cas d'un changement soudain, telle une sécheresse, pour lequel il y a peu de données, un prévisionniste bayésien est mieux armé pour rendre compte de l'information nouvelle et de l'état du climat.

Au cœur de la théorie se trouve une formule explicite, le théorème de Bayes, qui permet de calculer l'effet d'une information

nouvelle sur l'estimation d'une probabilité. Par exemple, quand il soupçonne un cancer chez un patient, le médecin attribue une probabilité initiale, nommé probabilité *a priori*, fondée sur des données telles que l'incidence connue de la maladie dans la population générale, les antécédents médicaux de la famille du patient et d'autres facteurs pertinents. À réception des résultats des analyses du patient, le médecin peut mettre à jour cette probabilité en utilisant le théorème de Bayes. La valeur résultante n'est ni plus ni moins que le degré personnel de croyance du médecin.

La plupart des physiciens affichent leur foi dans les probabilités fréquentistes plutôt que bayésiennes, tout simplement parce qu'on leur a appris à fuir la subjectivité. Mais quand il s'agit de faire une prédiction, l'approche bayésienne prévaut, affirme Marcus Appleby, mathématicien à l'Université de Londres, convaincu par Ch. Fuchs de l'importance des probabilités bayésiennes.

M. Appleby fait remarquer qu'il nous paraîtrait insensé de participer à une loterie si l'on a appris que c'est la même personne