



La décohérence livrera-t-elle tous ses secrets ?

Le passage du monde surprenant des particules au monde classique de notre quotidien est intimement lié à la disparition des superpositions d'états quantiques. Nombre d'équipes cherchent aujourd'hui à observer en direct cette « décohérence » pour mieux la maîtriser. Objectif : permettre le traitement quantique de l'information.

Harold Ollivier,
ingénieur du Corps des télécommunications, prépare un doctorat à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria).

Philippe Pajot
est journaliste scientifique.

À la fin des années 1930, le physicien américain George Gamow, soucieux d'expliquer les avancées de la mécanique quantique, écrit une série de récits mettant en scène M. Tompkins, un bureaucrate londonien évoluant dans des mondes étranges. Jouant par exemple une partie de billard quantique, il rencontre des boules dont « vous ne pouvez pas indiquer exactement la position (...), le mieux que vous puissiez dire est que la boule est "surtout là" et "en partie ailleurs" [1] ».

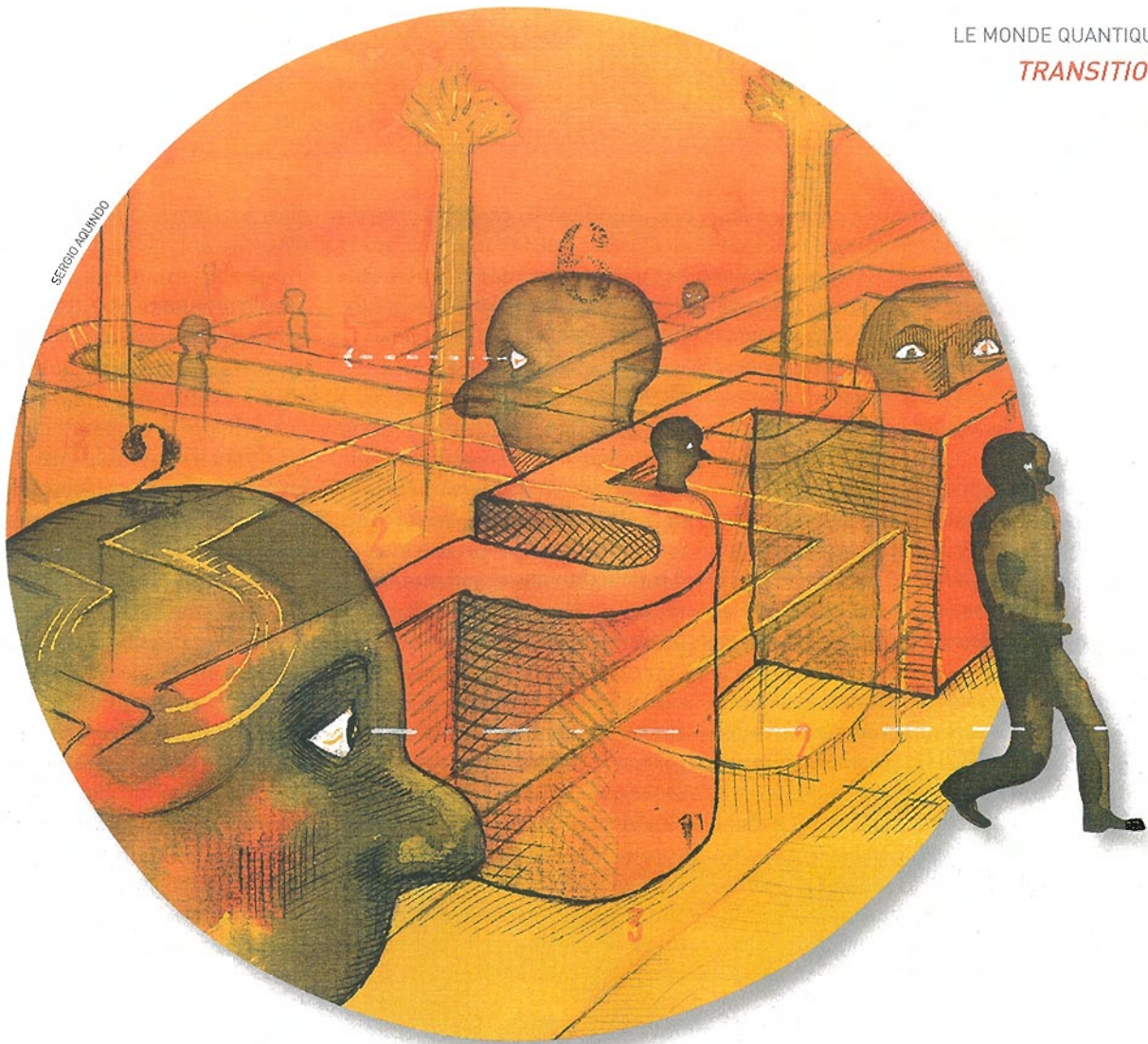
Mais nous ne vivons pas dans le monde de M. Tompkins, et personne n'a encore vu une boule de billard en deux endroits à la fois. Alors que la mécanique quantique décrit le comportement des particules, constituants fondamentaux de la nature, nous n'en percevons que rarement les effets à notre échelle. Comment assurer la transition



LE PHYSICIEN WOJCIECH ZUREK a proposé dans les années 1980 une explication de la décohérence fondée sur l'interaction entre le système quantique et son environnement. © COURTESY OF W. ZUREK

entre, d'un côté, le monde quantique aux comportements surprenants et, de l'autre, le monde « classique » qui nous est familier ? Question qui a tourmenté plus d'un physicien, y compris

les fondateurs de la mécanique quantique. En une vingtaine d'années, sous l'impulsion du physicien américain d'origine polonaise Wojciech Zurek, la compréhension de ce phénomène s'est considé-



SERGIO AQUINO

ablement améliorée. La décohérence, responsable de la transition quantique/classique, peut être expliquée par la mécanique quantique. La réalité classique que nous percevons émergerait naturellement d'une description fondamentalement quantique, réconciliant ces deux visions d'un même monde.

La théorie quantique, élaborée dans les années 1920, explique le comportement des particules microscopiques : atomes, électrons ou photons. Comme toute théorie aspirant à décrire une réalité expérimentale, elle doit répondre à trois questions : comment décrire l'état des systèmes physiques étudiés ? ; comment calculer leur évolution temporelle ? ; comment prédire le résultat d'une expérience mettant en jeu un système dans un état donné ?

Sans entrer dans les détails relatifs aux axiomes qui définissent la mécanique quanti-

que [2], il faut retenir qu'il s'agit d'une théorie linéaire et probabiliste. D'une part, il existe un principe de superposition pour les états quantiques : on peut toujours additionner deux états quantiques d'un système et obtenir un autre état autorisé par la théorie (lire « Le principe de superposition », p. 19). C'est l'équivalent quantique du principe de superposition des ondes acoustiques : les vibrations d'un orchestre sont la somme des vibrations dues à chacun des instruments qui le composent. D'autre part, la mécanique quantique ne peut pas prédire le résultat d'une mesure effectuée une seule fois : elle fournit seulement la probabilité d'obtenir un résultat particulier. C'est une situation identique à celle du pile ou face : on ne peut savoir quel sera le résultat du prochain tirage, mais on sait qu'en moyenne on aura 50 % de « pile » et 50 % de « face ».

Depuis les années 1930, ces diverses propriétés sont utilisées avec bonheur pour décrire l'infiniment petit. La mécanique quantique a peu à peu révolutionné notre compréhension de la matière. Grâce à elle, sont nés les lasers, la supraconductivité et les semi-conducteurs. Avec de tels succès, pourquoi diable Richard Feynman affirmait-il que personne ne comprend vraiment la mécanique quantique ? En raison de son universalité et de son incompatibilité avec la mécanique classique. En effet, en tant que théorie du microscopique, la mécanique quantique explique le comportement de la matière et des objets qui nous entourent. Or, à notre échelle, cette matière obéit aux lois classiques et non aux lois quantiques. Le principe de superposition évoqué plus haut pour les ondes acoustiques n'est qu'une approximation linéaire ▷

[1] G. Gamow, M. Tompkins, Dunod, 1992 (Cambridge University Press, 1940 et 1945 pour les premières éditions).

[2] Voir « Les axiomes de la mécanique quantique » sur notre site www.larecherche.fr



[3] Voir « Les interprétations de la mécanique quantique » sur notre site www.larecherche.fr

[4] W. Zurek, *Phys. Rev., D* 24, 1516, 1980.

La Recherche a publié

[I] S. Haroche, J.-M. Raimond et M. Brune, « Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience », *n°301*, 50, septembre 1997.

[II] C. Michaut, « Le monde quantique s'éloigne de la réalité », *n°410*, 10, juillet-août 2007.

▷ valable aux faibles puissances. De même, la mécanique classique ne donne généralement pas de résultats probabilistes. On dit : « *Demain le Soleil se lève à 7 h 32.* » Et non : « *Demain le Soleil a 50 % de chances de se lever à 7 h 32 et 50 % de chances de se lever à 8 h 27.* »

Afin d'éviter cette schizophrénie, on en appelle depuis Niels Bohr à la « décohérence » : phénomène qui annule le principe de superposition et permet d'assurer la transition entre le monde quantique et le monde classique. La raison pour laquelle elle se produit effectivement a toujours été sujette à interprétations. Bohr propose à la fin des années 1920 de suspendre le principe de superposition « par décret ». Il fait de la décohérence un phénomène fondamental, l'élevant au rang d'axiome de la théorie quantique. En 1957, Hugh Everett III tente, au contraire, d'en supprimer l'uti-

lité. Il donne une explication – partiellement satisfaisante – de notre perception classique d'un Univers décrit entièrement par la mécanique quantique [3].

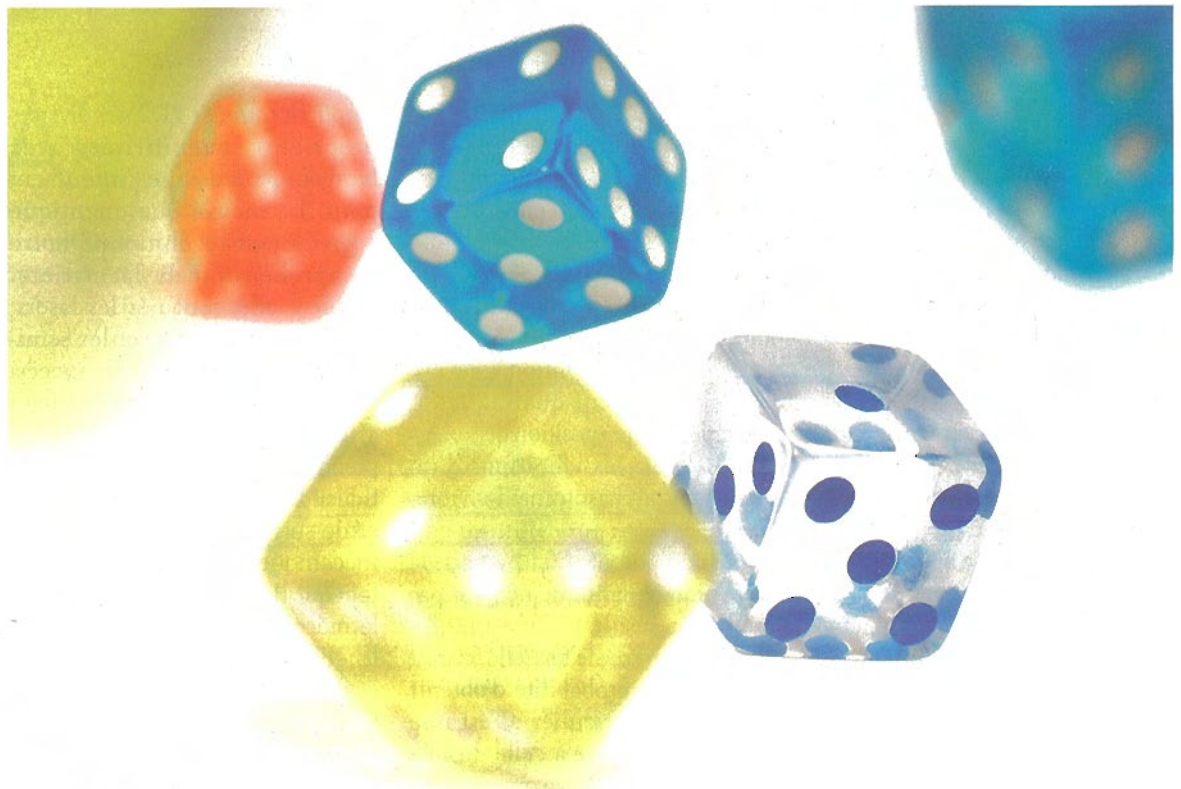
Question d'environnement

Lorsque Zurek reprend cette problématique dans les années 1980, son travail aboutit à une réponse de nature différente : la décohérence s'explique par un mécanisme d'interaction entre systèmes quantiques [4]. Il ne s'agit donc pas d'un phénomène fondamental mais, au contraire, d'une conséquence des axiomes de la mécanique quantique. L'explication qui est avancée est un pas vers la réconciliation de la mécanique quantique et de la mécanique classique : la seconde serait bien une conséquence de la première.

L'élément principal de cette approche est que les axiomes de la mécanique quantique ne s'appliquent

qu'aux systèmes fermés, c'est-à-dire parfaitement isolés. En revanche, lorsque le système interagit avec son environnement – d'autres systèmes quantiques non mesurés par un observateur –, l'équation qui régit l'évolution (« équation de Schrödinger ») ne peut être écrite que pour l'ensemble « système/environnement », et non pour le système seul ou l'environnement seul. Cependant, c'est uniquement l'état du système qui nous intéresse, car c'est lui qui sera observé *in fine*. Son évolution pourrait être calculée, mais cela nous amènerait vite au-delà de ce qu'il serait raisonnable de présenter ici. En revanche, la description des conséquences de l'interaction avec l'environnement peut se faire intuitivement. On assiste à la réduction de l'ensemble des états accessibles au système.

En effet, au cours de l'évolution, l'environnement acquiert de



UNE FOIS QU'UN DÉ ORDINAIRE S'ARRÊTE DE ROULER, il n'y a plus d'ambiguïté sur la valeur de la face qui est apparue. En revanche, un joueur qui voudrait connaître l'état d'un « dé quantique » prendrait le risque de modifier irrémédiablement cet état. © EPC PHOTOGRAPHY/IMAGESTATE/EYEDEA

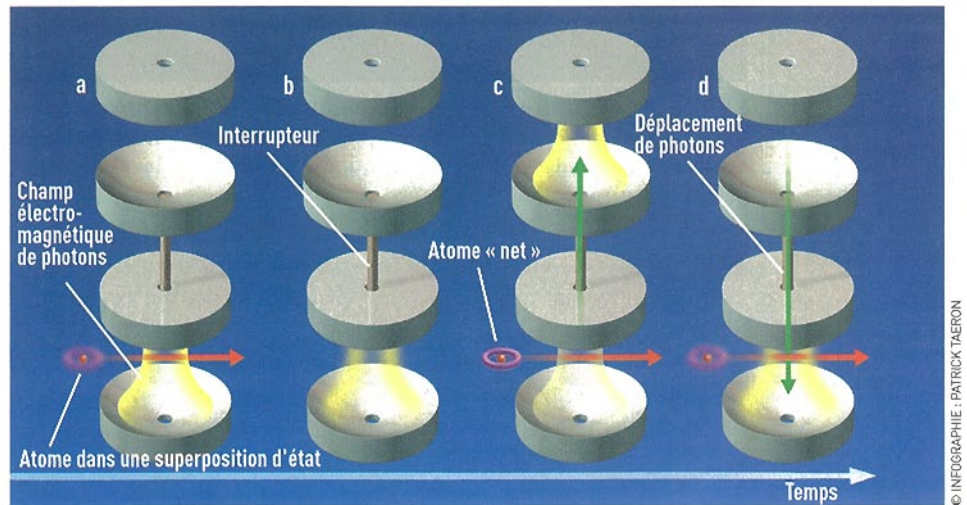
l'information sur le système et, réciproquement, le système acquiert de l'information sur l'état de l'environnement. Or, nous l'avons dit, l'environnement est composé des systèmes physiques qui ne sont pas observés. Ainsi une partie de l'information sur le système est-elle irrémédiablement perdue dans l'environnement. Elle est alors remplacée par du bruit en provenance de ce dernier. Autrement dit, après son interaction avec l'environnement, les états auxquels peut prétendre le système sont des états désordonnés. Ce phénomène se produit un peu à la manière du déplacement d'un grain de pollen flottant à la surface de l'eau, déplacement dû aux chocs avec les molécules du liquide. Il devient impossible de prédire où sera transporté le grain de pollen : sa position devient aléatoire, et l'entropie* relative à sa position augmente. En raison de l'extrême sensibilité des systèmes quantiques aux perturbations extérieures, il ne reste bien souvent après l'interaction qu'un seul état accessible, le plus aléatoire de tous, celui d'entropie maximale.

Systèmes isolés

Heureusement, il existe des exceptions. Pour certains types d'interactions, la situation est intermédiaire entre celle d'un système isolé (pour lequel tous les états sont possibles) et celle que nous venons de décrire (un seul état possible). On observe alors que certains états sont stables quant à l'interaction avec l'environnement, mais que leurs superpositions disparaissent très rapidement. Ce processus sélectionne une classe d'états qui, comme les états classiques, persistent dans le temps et correspondent à des propriétés durables du système quantique. En revanche, leurs superpositions sont transformées en une description probabiliste. On ne peut savoir avec certitude lequel des états stables représente les propriétés du système. Calculer la production d'entropie pour les états du système offre donc

1996 : PREMIÈRE PERCÉE

Hors du champ théorique, les physiciens cherchent à observer en direct la décohérence. Le premier succès a été obtenu en 1996 par l'équipe de Serge Haroche, de l'École normale supérieure de Paris. L'expérience consiste à préparer le champ électromagnétique d'une cavité micro-ondes (deux miroirs se faisant face) dans une superposition de deux états stables, puis à observer la disparition de cette superposition en fonction du temps. Cette équipe a envisagé de fabriquer un environnement sur mesure pour tester d'autres aspects du phénomène. Deux cavités micro-ondes sont reliées par un interrupteur. Une dizaine de photons sont placés dans la cavité du bas, formant un champ gaussien (courbe en cloche). Un atome dans une superposition d'état d'énergie (atome flouté) est envoyé dans la cavité (a). Après interaction entre l'atome et le champ de photons, ce dernier garde la trace de l'interaction, sa phase se retrouvant dans un état superposé : cloche floutée (b). On ouvre ensuite l'interrupteur. Les photons passent dans la cavité supérieure : le champ qui apparaît transporte les informations sur la phase du champ de l'autre cavité. Dès qu'il y a assez d'information (de photons) pour déterminer la phase dans la cavité inférieure, le champ de cette cavité subit la décohérence. Un atome envoyé pour le sonder permettrait de constater qu'il n'est plus dans un état superposé : cloche nette et atome net (c). Si on attend suffisamment longtemps, les photons regagnent la première cavité, et le champ se retrouve à nouveau dans un état superposé (cloche floutée). Cette expérience démontrerait que la décohérence est un phénomène réversible (d).



un critère d'identification des états classiques. La frontière entre le monde classique et le monde quantique semble donc devoir être placée entre les systèmes isolés et ceux en interaction avec leur environnement. Une boule de billard posée sur une table est dans un état stable, observable facilement, tandis qu'on ne l'observe jamais dans une superposition de tels états. La conséquence la plus inattendue de cette description de la transition quantique/classique est qu'il ne s'agit pas d'un phénomène fondamental.

Au contraire, cette transition résulte de l'évolution du système. La décohérence met donc un certain temps à s'établir. Du coup, on pourrait la voir à l'œuvre, et c'est cette prédiction particulière que l'équipe de Serge Haroche, de l'École normale supérieure de Paris, a testée en 1996 (lire « 1996 : première percée », ci-dessus). Le résultat de son expérience est en parfait accord avec la théorie et il accreditte cette approche opérationnelle de la transition quantique/classique (lire « Aux limites du monde quantique », p. 29) III. ▷

* **L'entropie** est une fonction définissant l'état de désordre d'un système. Sa valeur augmente lorsque celui-ci évolue vers un état de désordre accru.



[5] H. Ollivier,
D. Poulin et
W. Zurek : [www.
arxiv.org/
/abs/quant-
ph/0307229](http://www.arxiv.org/abs/quant-ph/0307229)



LES ORDINATEURS voient leur puissance croître, grâce à la miniaturisation des composants. Mais celle-ci a ses limites. Passer la barrière quantique semble être la seule solution pour continuer à augmenter leurs capacités de calcul. © ALESSANDRO DELLA VALLE/EPASIPA

▷ Malgré ces succès, cette explication ne fait qu'un pas vers le monde classique. Seule la robustesse des états du système vis-à-vis des perturbations induites par l'environnement est prise en compte dans la définition du monde classique que nous avons adoptée. Or, la liste des propriétés classiques d'un

pas d'ambiguïté sur la valeur de la face qui est apparue. En mécanique quantique, et même en présence de la décohérence, la situation est différente. Les systèmes quantiques sont très sensibles aux mesures, et l'état d'un système doit être changé après celles-ci. Chaque observateur qui chercherait à connaître l'état d'un

L'objectivité du monde classique se déduirait des axiomes de la mécanique quantique

système physique ne s'arrête pas là. En particulier, on s'attend que plusieurs observateurs puissent obtenir un consensus sur l'état d'un système classique. C'est ce que l'on nomme une représentation objective. Par exemple, au jeu de dé, plusieurs joueurs peuvent prendre des paris avant le jet, mais une fois que le dé s'arrête de rouler, il n'y a

dé quantique prendrait le risque d'en modifier l'état, et cela irrémédiablement. Des joueurs, même honnêtes, pariant avec un dé quantique soumis à la décohérence, n'observeraient pas forcément tous le même résultat.

Est-ce le signe d'un nouveau paradoxe ? Nous disposons aujourd'hui des outils issus de la théorie de l'information quantique pour répondre à cette question : lorsque l'environnement qui induit la décohérence agit comme un amplificateur, pro-

duisant plusieurs copies de l'information sur le système, une description objective classique émerge naturellement. Pour ceux qui joueraient au dé quantique, l'environnement assure la diffusion du résultat aux différents joueurs. Il n'est donc plus nécessaire de faire une mesure directe sur le dé quantique pour connaître le vainqueur. Il suffit d'extraire le résultat de la copie de l'information obtenue au travers de l'environnement. S'inscrivant dans la lignée des études sur la décohérence, ce nouveau résultat ouvre la voie à une compréhension plus complète de la transition entre quantique et classique [5]. L'apparition de l'objectivité du monde classique se déduirait aussi des axiomes de la mécanique quantique.

Au-delà de ces implications théoriques, l'explication avancée par Zurek a une conséquence pratique de taille : grâce à elle, on peut espérer que le calcul quantique devienne un jour réalité. En effet, depuis 1982 et sous l'impulsion initiale de Feynman, s'est développée



L'idée que la manipulation de l'information peut être bien plus efficace au sein de systèmes quantiques que lorsqu'elle est effectuée par des systèmes classiques, par les ordinateurs que nous utilisons tous les jours. La factorisation d'un grand nombre entier, problème supposé difficile pour les ordinateurs – et au cœur de la sécurité informatique –, peut être accomplie en un nombre d'opérations élémentaires bien plus faible par un ordinateur quantique que par une machine classique. Depuis 1995, date de la découverte par Peter Shor de cet algorithme quantique efficace, de nombreux chercheurs ont accentué leurs efforts pour construire une telle machine (lire « Comment calculer quantique », p. 50 et « Les constructeurs de qubits », p. 60). Mais, pour être efficace, le traitement quantique de l'information a besoin du principe de superposition: le gain de performance ne s'obtient qu'au prix de la superpo-

sition de l'état de milliers, voire de centaines de milliers, de bits quantiques en même temps. Si la décohérence est un phénomène fondamental, il n'y a aucun moyen de la contourner, et jamais de telles superpositions ne verraient le jour.

Codes correcteurs

En revanche, notre explication permet de garder espoir. Vis-à-vis du traitement quantique de l'information, l'effet de la décohérence est résumé par l'introduction d'erreurs au cours du calcul. Si l'on parvient à manipuler l'information plus vite que ne se produisent de telles erreurs, on pourrait tirer parti de la mécanique quantique pour calculer plus efficacement.

Beaucoup de groupes expérimentaux sont arrivés à ce stade. Avec une petite dizaine de bits quantiques, ils montrent qu'il est possible d'effectuer des opérations élémentaires. Pour aller plus loin, des efforts expérimentaux seront nécessaires, mais

aucune difficulté théorique ne s'y oppose. Puisque la décohérence n'est pas fondamentale, on peut compenser ses effets en utilisant des codes correcteurs. Les architectures tolérant les erreurs restent hors de portée de nos capacités technologiques, mais en progrès rapide. La « loi de Moore », qui prévoit un doublement de la puissance de calcul des ordinateurs classiques tous les dix-huit mois, se heurtera en 2020 à la barrière quantique. Éviterons-nous cette fin annoncée? Le traitement quantique de l'information à travers la maîtrise de la décohérence est l'une des rares possibilités qui nous permettra d'accroître nos capacités de calcul à long terme. ■ H. O. et P. P.

POUR EN SAVOIR PLUS

► W. Zurek, « Decoherence and the Transition from Quantum to Classical – Revisited », *Los Alamos Science*, 27, 2002. Et sur www.arxiv.org/abs/quant-ph/0306072 (en anglais).

Cet article est la version revue et mise à jour par ses auteurs du texte paru dans le n° 378 de *La Recherche*.

La réduction du paquet d'ondes

D'après le principe de superposition (lire « Principes et controverses », p. 19), si a et b sont deux états possibles d'une particule, alors $a + b$ est aussi un état possible de cette particule. Mais nous n'observons jamais cet état superposé. Lors de la mesure, nous obtenons soit l'état a , soit le b . Autrement dit, la mesure détruit la superposition et contraint la particule à « choisir » l'état a ou l'état b . Mais juste avant la mesure, aucun des deux états n'était plus probable que l'autre. Werner Heisenberg appelle cela la « réduction du paquet d'ondes ».

Les physiciens se sont longtemps affrontés sur l'interprétation de ce phénomène. Albert Einstein pensait que l'état a ou l'état b préexistait avant la mesure, et que seule notre connaissance insuffisante des particules expliquait qu'on ne sache pas l'identifier. Il devait donc exister des « variables cachées » permettant de déterminer l'état antérieur des particules. Il lui était impossible, en effet, d'admettre que les systèmes physiques n'avaient pas de propriétés définies indépendamment de leur observation. Pour Einstein, la physique quantique était donc incomplète. Niels Bohr était de l'avis contraire: la physique quantique n'a rien à voir avec la physique classique qui régit le monde macroscopique. Elle implique une révision radicale de nos représentations. Les expériences de physique les plus récentes semblent lui donner raison (II). ■ C. M.

PRINCIPES ET CONTROVERSES