

2



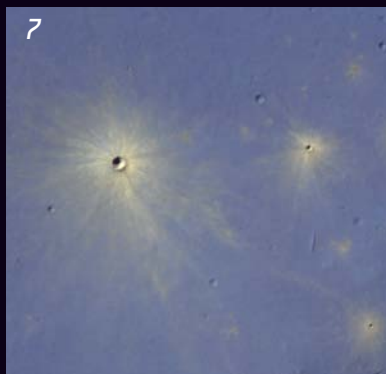
© NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASI (à droite)/UMI (à gauche)



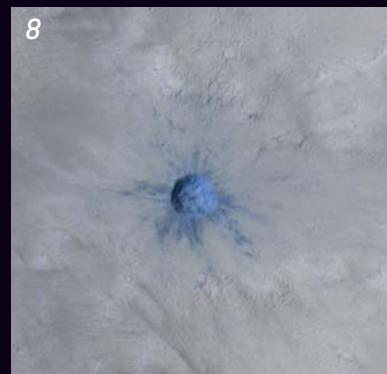
6



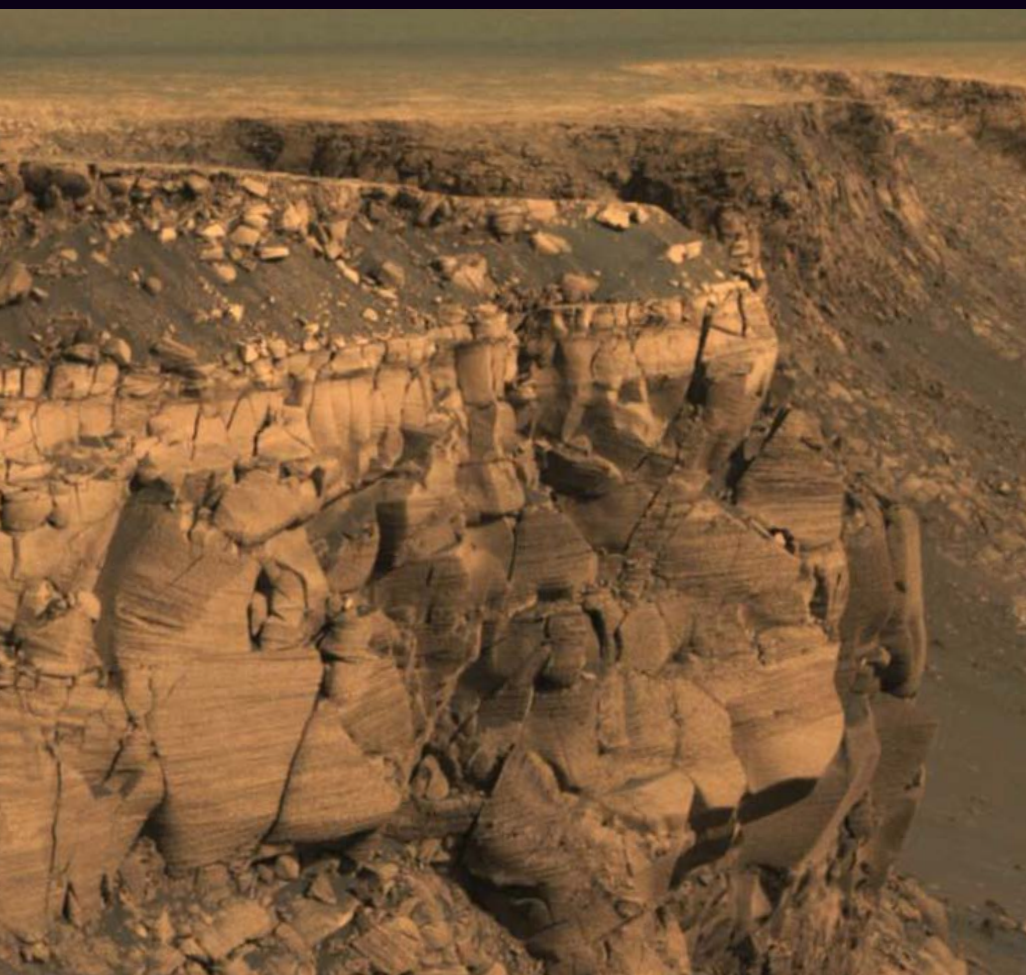
7



8

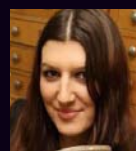


© NASA/JPL Université d'Arizona



© NASA/JPL/Cornell

■ LES AUTEURS



Jessica FLAHAUT est postdoctorante à la Faculté des sciences de la Terre et du vivant de l'Université libre d'Amsterdam.

Pierre THOMAS est géologue au Laboratoire de géologie de Lyon (LGL-TPE) et professeur à l'École normale supérieure de Lyon. Il est le responsable scientifique d'un site traitant de l'actualité scientifique et géologique sur Mars.

<http://planetterre.ens-lyon.fr/planetterre/ressources/dossiers-thematiques/nouvelles-mars>

Par-delà l'horizon

À ses débuts, la théorie quantique a semblé imposer des limites à la science et aux techniques.

L'exemple du calcul quantique montre qu'au contraire, de nouveaux horizons s'ouvrent.

Au XIX^e siècle, quelqu'un, probablement Camille Flammarion, a représenté la quête de la connaissance par une gravure. Agenouillé dans un paysage terrestre stylisé, un voyageur passe la tête à travers le firmament, là où ciel et terre se rencontrent, et contemple l'inconnu (*voir la figure page 53*). Un temps réputée issue de la Renaissance, la « gravure sur bois de Flammarion » invite à deux interprétations diamétralement opposées de ce qu'est la connaissance.

Selon la première, elle n'est limitée que par une barrière imaginaire que l'activité scientifique finit toujours par franchir ; selon la seconde, la connaissance est limitée par une barrière véritable que l'on ne peut franchir que par l'imagination. Dans cette dernière vision, nous serions donc enfermés à l'intérieur de la bulle finie de ce qui nous est familier. Nous ne pouvons

donc espérer comprendre que le monde de notre expérience directe, tandis que ce qui se trouve à l'extérieur de la barrière reste inaccessible à la compréhension et à l'explication. L'activité scientifique ne fait-elle que nous dévoiler l'impossibilité de dépasser notre horizon habituel, ou transcende-t-elle la bulle du familier pour révéler des horizons nouveaux ? Nous allons voir que, dans le domaine du calcul, elle nous a amenés à franchir la barrière infranchissable que semblait constituer l'horizon quantique derrière lequel se trouve le monde microscopique.

Pour beaucoup, la théorie quantique montrerait clairement que c'est la seconde vision – la vision pessimiste de la connaissance – qui s'impose. Les théoriciens ont très tôt enseigné à son propos une irrationalité délibérée : « Si vous pensez que vous comprenez la théorie quantique, c'est que vous

ne la comprenez pas. » « Vous n'avez pas le droit de poser cette question. » « La théorie est insondable, et donc le monde aussi. » « Les choses sont comme cela, sans raison ni explication. » Voilà le genre de phrases qu'on lisait dans les manuels de physique quantique et les textes de vulgarisation...

Pour autant, les avancées des dernières décennies contredisent ces allégations. Depuis que la théorie quantique existe, les physiciens ont souvent pensé que des obstacles en découlent, qui empêchent d'exploiter la nature quantique aussi facilement que la physique classique (non quantique) nous a habitués à le faire. Toutefois, aucun de ces obstacles ne s'est jamais concrétisé. Au contraire, la théorie quantique s'est révélée libératrice. Loin d'être limitantes, les propriétés fondamentalement quantiques telles que la superposition des états, leur intrication, la quantification et l'aléatoire se sont montrées d'une grande fécondité. Grâce à elles, toutes sortes de dispositifs aux effets presque miraculeux, tels les lasers, les circuits intégrés, les horloges atomiques, etc., ont été mis au point.

Et ce n'est que le début. Nous allons exploiter de plus en plus les phénomènes quantiques au sein de systèmes de communications et de calcul d'une puissance

quantique

David Deutsch et Artur Ekert

jusque-là inconcevable. Nous sommes en train de découvrir de nouvelles façons d'exploiter la nature et de produire du savoir.

En 1965, Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, prédisait que le nombre de transistors par microprocesseur doublerait tous les deux ans environ. Cette «loi de Moore» reste vérifiée depuis plus d'un demi-siècle... Pour autant, il était déjà clair en 1965 qu'elle trouverait une limite physique lorsqu'on s'approcherait de l'échelle atomique. Et après ? Après, les ingénieurs entreraient dans le domaine de l'inconnu.

Par-delà l'incertitude

De même, dans la vision usuelle de la théorie quantique, le principe d'incertitude de Heisenberg est censé représenter un horizon de l'inconnaissable, même avec toute la technique du monde. Il édicte en effet que plus notre connaissance d'une certaine propriété d'un système est précise, plus notre connaissance de certaines autres propriétés du même système sera imprécise. La détermination précise de la position d'une particule, par exemple, implique que celle de sa vitesse devient imprécise. Ce qui ne peut être connu ne pouvant être maîtrisé, les tentatives de

L'ESSENTIEL

- Le caractère quantique des phénomènes microscopiques était censé limiter la précision des observations qui y sont possibles.
- Enracinée dans certaines visions philosophiques, cette idée est erronée.
- Certains traits des phénomènes quantiques peuvent être observés avec une précision absolue, par exemple afin de créer des bits et exécuter des calculs binaires.
- Les phénomènes quantiques peuvent aussi être exploités pour de nouveaux types de calculs, voire de raisonnements.

© Shutterstock/DrHilich

manipulation d'objets microscopiques semblent donc se heurter à un aléa sous-jacent, à des corrélations (des rapports entre phénomènes) inexplicables en physique classique et à d'autres remises en question de la hiérarchie temporelle entre causes et effets. Dès lors, une conclusion incontournable semble s'imposer : la fin du progrès des techniques de l'information ne saurait qu'être proche.

Aujourd'hui pourtant, des physiciens contrôlent de façon routinière divers phénomènes quantiques et ils ne se heurtent pas à de telles barrières. Ils codent de l'information à l'aide d'atomes ou de particules élémentaires, puis, en dépit du principe d'incertitude, la traitent avec une extrême précision. Ils créent ainsi des fonctionnalités qui ne pourraient être réalisées autrement. De quoi s'agit-il ?

Examinons d'abord le bit classique, c'est-à-dire la brique de base de l'information telle qu'on la conçoit classiquement. Pour un physicien, un bit est un système physique qui peut être placé dans l'un de deux états, représentant deux valeurs logiques, oui ou non, vrai ou faux, et que l'on note 1 ou 0. Dans les ordinateurs dits classiques, un bit peut correspondre à la présence ou à l'absence d'une charge dans

un condensateur. Un bit quantique peut par exemple être obtenu à partir d'un atome, en utilisant deux états d'énergie d'un électron atomique : l'état de plus basse énergie, que l'on nomme l'état fondamental, peut jouer le rôle du 0, tandis que celui du 1 peut être joué par un état d'énergie supérieure.

Pour manipuler cette information, les physiciens envoient sur l'atome des impulsions lumineuses π , c'est-à-dire des impulsions ayant la fréquence, la durée et l'amplitude adéquates pour faire passer l'atome de 0 à l'état 1 et *vice-versa*. Les physiciens peuvent aussi ajuster la fréquence pour manipuler deux atomes qui interagissent, afin qu'un atome contrôle ce qui arrive à l'autre. Nous avons ainsi tous les ingrédients nécessaires à la construction des composants élémentaires des ordinateurs classiques que sont les portes logiques à un et à deux bits, et cela sans que le principe d'incertitude ne soit une entrave.

Précisons ce que le principe d'incertitude dit exactement et ce qu'il ne dit pas. Parmi les propriétés mesurables d'un atome ou d'un autre système physique, que l'on appelle « observables », certaines peuvent être déterminées, à un instant donné, de façon précise. Le principe d'incertitude n'exclut donc pas qu'une observable puisse être mesurée avec précision. Il affirme juste que toutes les observables d'un système physique ne sauraient être mesurées avec précision en même temps.

Dans le cas d'un électron atomique, l'observable mesurée précisément est son énergie et, de fait, dans l'état 0 comme dans l'état 1, la particule électrique a une énergie parfaitement définie. Cela implique que d'autres observables, telles la position et la vitesse, ne peuvent être déterminées avec précision. On dit que l'électron est délocalisé (il n'a pas de position bien définie) et, de même, sa vitesse prend simultanément toute une plage de valeurs. Si nous essayions de stocker de l'information au moyen de la position et de la vitesse de particules, nous nous heurterions effectivement à une limite quantique. La solution consiste donc à choisir judicieusement les observables qui vont servir de bits quantiques pour le codage de l'information.

Cette situation rappelle le numéro comique où un patient dit à son docteur « Ça me fait mal quand je fais ceci. », ce à quoi le docteur répond : « Alors ne le faites pas. » Si telle ou telle propriété physique d'une particule se révèle difficile à déterminer de

façon précise, le mieux est de contourner le problème en se servant d'autres observables pour stocker de l'information.

Si notre seul but est de construire des ordinateurs classiques en employant des atomes plutôt que des transistors, alors tout ce dont nous avons besoin, ce sont des observables que l'on peut mesurer précisément. Toutefois, la physique quantique offre bien plus, puisqu'elle nous donne aussi la possibilité d'exploiter des observables qui, dans certaines situations, ne peuvent être mesurées que de façon imprécise : les observables « floues ». Le fait que les observables puissent prendre simultanément de multiples valeurs augmente beaucoup leur intérêt pratique.

Une racine carrée de NON

L'énergie, par exemple, est souvent d'une valeur précise, mais un système physique peut être dans plusieurs états d'énergie à la fois. Par exemple, en plus d'être dans l'état fondamental 0 ou dans l'état excité 1, un électron atomique peut aussi être dans une superposition des deux états, c'est-à-dire à la fois dans l'état 0 et dans l'état 1.

Tout système physique est susceptible de se trouver dans un état superposé. Quand on sait préparer un tel état, le mesurer et le manipuler de façon fiable, il peut servir de bit quantique. Dans le cas d'un bit quantique atomique, l'usage d'impulsions lumineuses adéquates permettra de commuter l'énergie d'un électron d'une valeur précise à une autre, ou encore d'une valeur précise à une valeur indéterminée (état superposé), et *vice-versa*. Ainsi, une impulsion π échange les états 0 et 1, tandis qu'une impulsion $\pi/2$ (de même fréquence mais de durée ou d'amplitude moitié) place l'électron dans une superposition des états 0 et 1.

Si nous mesurons l'énergie de l'électron dans une telle superposition, nous trouverions soit l'énergie de l'état fondamental 0, soit l'énergie de l'état excité 1, les mesures donnant l'un ou l'autre résultat avec des probabilités égales (50 pour cent). Les prophètes de malheur en concluent que nous sommes limités par l'aléa quantique.

En fait, il n'en est rien, car on peut facilement contourner cet obstacle apparent et, ce faisant, créer une fonction nouvelle. Au lieu de mesurer l'électron, laissons-le dans cet état de superposition. Considérons par exemple un électron dans l'état 0, et appliquons-lui une première impul-

■ LES AUTEURS



David DEUTSCH est professeur de physique à l'Université d'Oxford, en Grande-Bretagne. Artur EKERT dirige le Centre des technologies quantiques de Singapour ; il est aussi professeur à l'Institut de mathématiques d'Oxford.



sion $\pi/2$, puis une seconde. Quand nous mesurons alors l'état de cet électron, on trouve qu'il est dans l'état 1, et cela dans 100 pour cent des mesures (voir l'encadré page 52). Au lieu d'être « floue », l'observable a été rendue précise.

Pour comprendre l'importance d'une telle manipulation, envisageons la porte logique la plus élémentaire d'un ordinateur, la porte NON. Avec cet élément de base des circuits logiques, le signal d'entrée, 0 ou 1, est transformé en son contraire, c'est-à-dire en 1 ou 0. Supposons maintenant que l'on se pose le problème suivant : construire la « racine carrée » de NON, c'est-à-dire une porte logique qui, agissant deux fois de suite sur une entrée, produit sa négation. À partir des portes logiques classiques, ce problème est sans solution, alors qu'une impulsion $\pi/2$ résout le problème pour un bit quantique atomique, puisque la succession de deux impulsions $\pi/2$ inverse 0 en 1, ou 1 en 0. Des expérimentateurs ont obtenu des portes « racines carrées » et d'autres portes logiques impossibles en contexte classique à l'aide de bits quantiques constitués de photons, d'ions piégés, d'atomes ou encore de spins. Tous ces composants nouveaux constituent les éléments de base d'un ordinateur quantique.

Des algorithmes bien plus puissants

Lancé dans une tâche, un ordinateur, classique ou quantique, accomplit une séquence précise d'instructions – un algorithme. Or, on quantifie l'efficacité d'un algorithme en évaluant l'augmentation de son temps d'exécution quand l'importance (en quantité, en taille, ...) des entrées augmente. Le temps nécessaire à la multiplication de deux nombres à N chiffres par l'algorithme habituel (celui que nous avons appris à l'école) augmente par exemple comme N^2 . En revanche, le temps de calcul nécessaire pour accomplir, par la méthode la plus rapide que nous connaissons, l'opération inverse, c'est-à-dire la factorisation d'un nombre en ses facteurs premiers, augmente plus vite que toute puissance de N . L'algorithme de factorisation est donc considéré comme inefficace.

Toutefois, en permettant de construire de nouvelles portes logiques, la mécanique quantique rend de nouveaux algorithmes possibles. L'un des exemples les plus frappants est la factorisation d'un nombre. En 1994, Peter Shor, aux Laboratoires Bell,

COMMENT DÉPASSER LES LIMITES DU CALCUL QUANTIQUE

Le monde microscopique est régi par des lois quantiques, et cela passe pour un obstacle infranchissable pour la miniaturisation en électronique. Toutefois, les physiciens ont appris à contourner les obstacles qui les inquiétaient tant. Et l'on peut s'attendre à ce que les ordinateurs atteignent leur plein potentiel au niveau quantique. Ils dépasseront alors de loin les machines actuelles.

Principe d'incertitude de Heisenberg

PROBLÈME : Ce principe quantique fondamental limite la précision de certaines mesures. Ainsi, si l'on détermine exactement la position d'une particule, elle aura tout un éventail de vitesses simultanées ; si, au contraire, c'est sa vitesse que l'on mesure exactement, sa position s'étalera de manière inéluctable. C'est pourquoi l'utilisation de la position et de la vitesse est inappropriée au stockage et au traitement de l'information.

Position déterminée avec précision

Vitesse floue, imprécisément définie



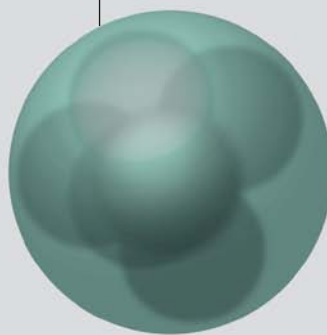
Position floue, imprécise

Vitesse déterminée avec précision



SOLUTION : Dans des situations où la vitesse et la position ne peuvent qu'être incertaines, d'autres grandeurs observables peuvent au contraire être bien définies. C'est souvent le cas de l'énergie, mais dans les situations où l'énergie est incertaine, d'autres grandeurs observables conviennent.

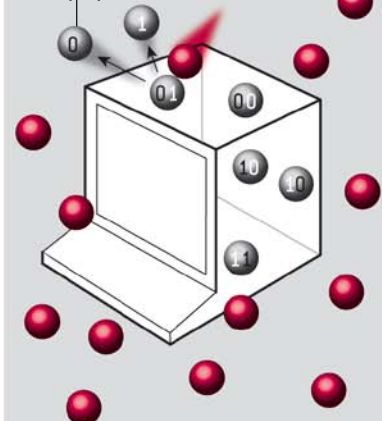
L'orbitale de la particule est d'énergie parfaitement définie



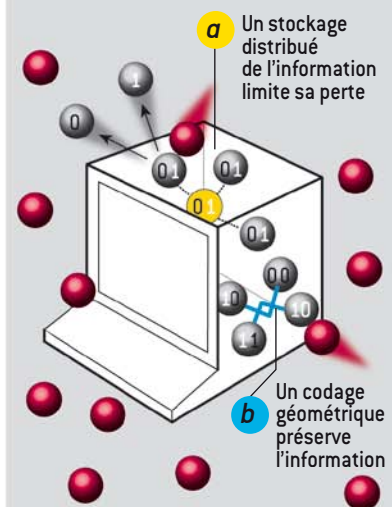
La décohérence des états de superposition

PROBLÈME : Les particules dont est formé un ordinateur interagissent avec leur environnement, ce qui fait perdre l'information stockée et fausse les calculs quantiques.

Les interactions détruisent les superpositions d'états 0 et 1



SOLUTION : Des techniques de correction d'erreurs peuvent compenser les effets de la décohérence assez longtemps pour que le calcul quantique s'achève. On peut par exemple répartir l'information quantique sur de multiples particules [a] ou la coder sous une forme géométrique, qui sera résistante par nature aux perturbations [b].



Jen Christiansen

a mis au point un algorithme quantique accomplissant la factorisation de nombres à N chiffres en une série d'étapes augmentant non pas exponentiellement, mais comme N^2 . Dans le cas d'autres types de problèmes, telle la recherche au sein d'une longue liste, les ordinateurs quantiques offrent des avantages moins marquants, mais ils seront tout de même notablement plus avantageux que les ordinateurs classiques. Certes, tous les algorithmes quantiques ne sont pas aussi efficaces que l'algorithme de

Shor, et nombre d'entre eux ne sont pas plus rapides que leurs équivalents classiques.

Pour toutes ces raisons, les premières applications pratiques des ordinateurs quantiques ne seront sans doute pas la factorisation, mais la simulation d'autres systèmes quantiques, tâche dont la durée dans les ordinateurs classiques augmente exponentiellement avec la taille des données. De telles simulations pourraient avoir un énorme impact en pharmacie ou dans le développement de nouveaux matériaux.

Pour autant, les ordinateurs quantiques n'existent pas encore. Ceux qui ne croient pas à la possibilité d'en réaliser mettent en avant le problème de l'enchaînement d'opérations logiques successives. En effet, outre les difficultés techniques liées à la manipulation d'atomes ou de photons uniques, il faut empêcher – et c'est le principal problème – que le calcul quantique ne soit perturbé par les interactions du système quantique, qui stocke et traite l'information, avec son environnement. Ce processus, que l'on nomme la décohérence, est souvent présenté comme une limite fondamentale au calcul quantique.

En fait, ce n'est pas le cas. La théorie quantique fournit des moyens de corriger les erreurs dues à la décohérence. En effet, si les sources d'erreurs satisfont certaines conditions – par exemple si les erreurs aléatoires se produisent indépendamment sur chacun des bits quantiques et si les portes logiques fonctionnent de façon assez précise –, alors il est possible de faire fonctionner les calculateurs quantiques de façon stable et aussi longtemps que l'on voudra.

Repousser les limites des mathématiques

Le cas des nouvelles fonctions logiques illustre le fait que les progrès de la connaissance du monde physique entraînent aussi des progrès en logique et en calcul. Bien que les vérités mathématiques soient indépendantes de la physique, nous en acquérons souvent la connaissance en exploitant des phénomènes physiques. Une démonstration mathématique est une suite d'opérations logiques. Donc, ce qui est démontrable ou non dépend des fonctions logiques (telle la fonction NON) que les lois physiques permettent de réaliser.

Ces fonctions doivent être assez simples sur le plan physique pour que nous ne puissions douter de leur fonctionnement, et notre confiance sur ce point est enracinée dans notre connaissance du monde physique. Puisqu'elle ajoute au répertoire des opérateurs logiques disponibles de nouvelles fonctions, telles que la « racine carrée » de NON, la physique quantique permettra aux mathématiciens de franchir des barrières que l'on supposait exister dans le monde des abstractions pures.

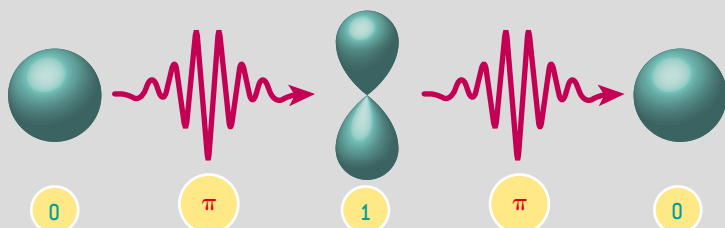
Supposons par exemple que la résolution d'un problème mathématique dépende de

IMPOSSIBLE? MAIS NON !

Les ordinateurs quantiques seront non seulement capables de faire tout ce que font aujourd'hui les ordinateurs classiques, mais ils pourront aussi accomplir de nouvelles fonctions logiques. Dans l'exemple ci-dessous, deux états électroniques d'un atome représentent les deux valeurs possibles d'un bit. Dans un état ou l'autre d'un tel bit atomique, l'électron n'a ni position ni vitesse définies : il s'étale sur des régions sphériques ou ovales nommées orbitales (*en vert*), et sa vitesse a toute une plage de valeurs différentes simultanées. Néanmoins, les deux états ont une énergie bien définie, qui détermine la valeur du bit.

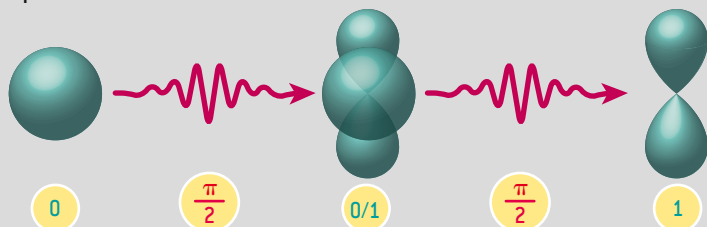
La fonction logique NON ordinaire

Pour effectuer l'opération logique la plus élémentaire, celle que l'on nomme NON et qui consiste à inverser la valeur d'un bit, on procède en envoyant des impulsions lumineuses de fréquence, durée et intensité adéquates (on les nomme des impulsions π). Si l'électron est initialement dans l'état 0, il se retrouve alors dans l'état 1, et vice-versa.



La racine carrée de NON

Cette procédure peut être modifiée afin de créer une opération qui n'existe pas en électronique conventionnelle : la « racine carrée de NON ». Pour ce faire, une impulsion dite $\pi/2$, d'amplitude plus faible et de durée plus courte que l'impulsion π , transforme l'état électronique 0 ou 1 en une superposition de ces deux états ; une seconde impulsion $\pi/2$ fait alors passer l'électron soit dans l'état 1 (s'il était au départ dans l'état 0), soit dans l'état 0 (s'il était au départ dans l'état 1). De telles nouvelles fonctions logiques confèrent aux ordinateurs quantiques une puissance énorme.



la détermination des facteurs premiers d'un énorme entier N . Supposons que N soit si énorme que, même si toute la matière de l'Univers avait été utilisée pour construire un ordinateur classique qui calculerait depuis que l'Univers existe, cette machine ne serait toujours pas capable de factoriser N . Or un ordinateur quantique pourra fournir les facteurs premiers rapidement, clef sans laquelle le problème mathématique resterait sans solution. Autrement dit, la physique quantique permettrait aux mathématiques de repousser leurs limites.

Puisque de nouveaux types de calculs sont possibles grâce aux phénomènes quantiques, pourquoi les physiciens ont-ils craint que la théorie quantique limite le progrès scientifique ? La réponse remonte à l'époque où cette théorie est née sous le nom de mécanique quantique. Erwin Schrödinger (1887-1961), l'un de ses pères, puisqu'il est l'auteur de son équation fondamentale, prévint un jour son auditoire qu'il allait dire quelque chose qui pouvait être considéré comme insensé : il déclara alors que son équation décrit toutes les évolutions possibles d'une particule, lesquelles ne sont « pas des alternatives, mais se produisent vraiment toutes simultanément ». Ce lauréat du prix Nobel de physique de 1933 ne faisait en fait qu'affirmer que son équation décrit la réalité ! Pour autant, Schrödinger éprouvait par avance le besoin de se défendre du risque qu'on le prenne pour un fou.

Une philosophie qui s'est égarée

Pourquoi en était-il ainsi ? Parce qu'au début du XX^e siècle, la plupart des physiciens étaient sous l'influence de doctrines philosophiques entravant l'acquisition de nouveaux savoirs. La physique fondamentale est en fait si intimement liée à la philosophie qu'au début du XX^e siècle, l'influence de cette dernière a pu avoir des effets nocifs sur des parties entières de la physique. Ces doctrines problématiques sont l'empirisme logique (« Si ce n'est pas vérifiable par l'expérience, cela n'a pas de sens. »), l'instrumentalisme (« L'essentiel est que les prédictions marchent, inutile de se préoccuper de ce qui les amène. ») et le relativisme philosophique (« Les affirmations ne sont pas objectivement vraies ou fausses, elles ne sont que légitimes ou illégitimes dans une culture particulière. »).

Tous ces courants ont en commun de s'opposer au réalisme philosophique, à savoir à l'idée pleine de bon sens que le monde physique existe et que la méthode scientifique permet d'accumuler des connaissances sur lui.

C'est dans cette atmosphère philosophique que le physicien Niels Bohr a développé son influente interprétation de la théorie quantique, qui nie la possibilité de parler de phénomènes comme s'ils existaient objectivement. On n'y est pas autorisé à se demander quelles valeurs prennent les grandeurs physiques tant qu'on ne les mesure pas. Les physiciens, qui, par vocation, ne peuvent s'empêcher de se poser de telles questions, ont essayé de ne plus le faire, et la plupart d'entre eux ont formé leurs étudiants à ne pas le faire. La théorie à la pointe du domaine scientifique le plus fondamental semblait contredire l'existence même d'une réalité physique connaissable objectivement.

Certains philosophes, tels Bertrand Russell et Karl Popper, n'ont pas abandonné le réalisme. Tous les physiciens non plus : Einstein (1879-1955) et David Bohm (1917-1992) se sont opposés au courant dominant, puis Hugh Everett (1930-1982) a proposé que les quantités physiques prennent réellement plus d'une valeur à la fois (ce qui est notre vision des choses). Toutefois, dans l'ensemble, les philosophes ne se sont pas intéressés vraiment à la réalité, et même si les physiciens ont continué à se servir de la théorie quantique dans un grand nombre de leurs domaines, la recherche sur la nature exacte des phénomènes physiques s'est égarée.

La situation s'améliore depuis deux ou trois décennies, et l'on peut dire que c'est la physique qui a remis la philosophie sur les rails. Les gens veulent de toute façon comprendre la réalité, et nous dépassons enfin les limites assignées par des points de vue philosophiques néfastes.

Et si la théorie quantique finit par être réfutée, de sorte que des barrières plus fondamentales empêchent la construction d'ordinateurs quantiques ? Ce serait stimulant, car cela nous permettra non seulement de faire évoluer la physique fondamentale, mais aussi sans doute d'envisager des techniques de calcul encore plus fascinantes. La théorie de « ce qui met la théorie quantique en défaut » ne peut qu'être prometteuse, de sorte que, d'une façon ou d'une autre, il n'y aura pas de limite au savoir et au progrès. ■



LA GRAVURE DE FLAMMARION, qui date du XIX^e siècle, soulève la question des limites à la connaissance et de la possibilité de les franchir.

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Deutsch, *The Beginning of Infinity : Explanations That Transform the World*, Penguin, 2011.

Le monde quantique, *Dossier Pour la Science* n° 68, juillet-septembre 2010.

C. Monroe et D. Wineland, *Calcul quantique avec des ions*, *Pour la Science*, n° 374, décembre 2008.

S. Aaronson, *Les limites du calcul quantique*, *Pour la Science*, n° 367, mai 2008.

J. Horgan, *L'ordinateur en mathématiques*, *Pour la Science*, n° 194, décembre 1993.

Des animaux

L'ESSENTIEL

- Récemment encore, les spécialistes du comportement animal renonçaient à attribuer aux animaux des émotions humaines, tel le chagrin.
- Un nombre croissant d'indices suggèrent que des animaux aussi variés que les dauphins ou les canards sont affectés par la mort de congénères proches.
- Ces observations soulèvent la question du deuil chez l'animal.

Tim Flach, Getty Images