

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/DrHilch

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.

