

Calcul quantique

Christopher Monroe et David Wineland

En manipulant un à un des atomes suspendus dans le vide, les physiciens réalisent les premiers éléments de futurs ordinateurs ultrapuissants, fondés sur les lois de la physique quantique.

Au cours des dernières décennies, la vitesse et la fiabilité des ordinateurs ont spectaculairement augmenté. Les microprocesseurs actuels concentrent près d'un milliard de transistors sur quelques centimètres carrés de silicium. À l'avenir, les composants seront encore plus miniaturisés et leur taille approchera celle de simples molécules.

À cette échelle et au-dessous, les ordinateurs pourraient devenir très différents de ce que nous connaissons. En effet, leur fonctionnement sera régi par les lois de la physique quantique, qui expliquent le comportement des atomes et des particules subatomiques. Or exploiter pleinement les propriétés quantiques serait une avancée considérable : les ordinateurs quantiques pourraient effectuer certaines tâches importantes beaucoup plus vite que les ordinateurs classiques n'en sont capables.

La plus connue de ces tâches est sans doute la décomposition d'un grand nombre entier en produit de deux nombres premiers. La multiplication de deux nombres premiers est une opération très simple pour les ordinateurs, même si les nombres en question comportent plusieurs centaines



1. DES ORDINATEURS À IONS PIÉGÉS pourraient coder et traiter des données à l'aide de chaînes d'ions se comportant un peu comme les billes de métal suspendues dans un pendule de Newton. Les ions y interagissent par leurs mouvements oscillatoires, et peuvent être manipulés au moyen de faisceaux laser.

avec des ions



de chiffres. Mais la factorisation, c'est-à-dire l'opération inverse, est tellement difficile qu'elle est à la base de la plupart des algorithmes de cryptage en usage à l'heure actuelle, depuis le commerce sur Internet jusqu'à la transmission de secrets d'État.

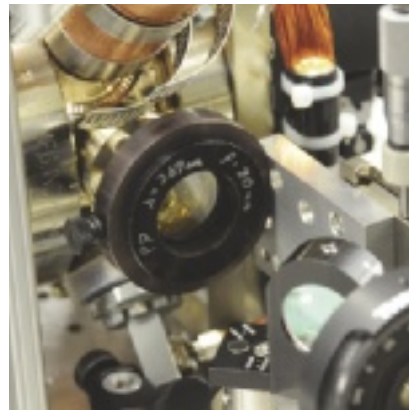
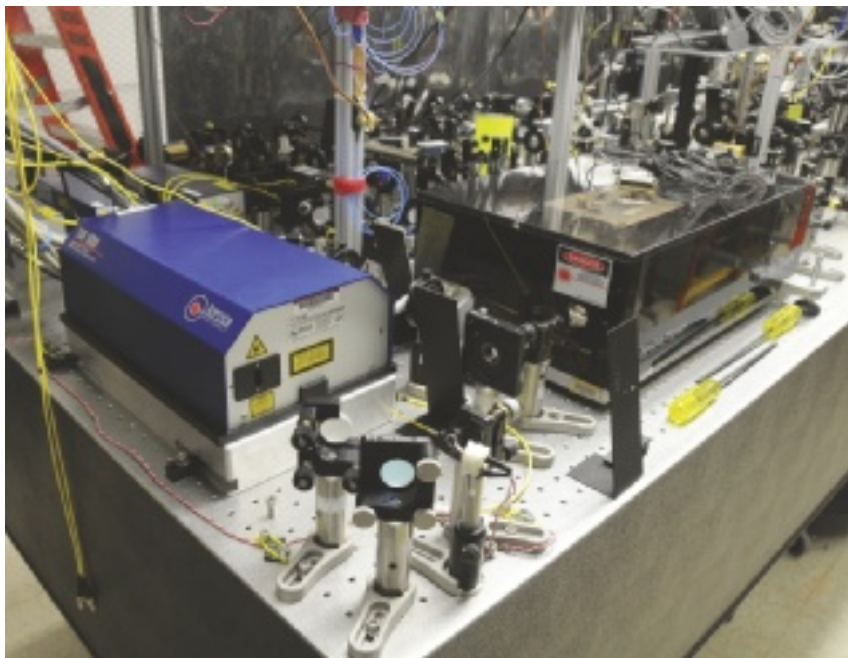
En 1994, Peter Shor, alors aux Laboratoires *Bell*, aux États-Unis, a montré qu'un ordinateur quantique pourrait en théorie casser ces codes de cryptage facilement, parce qu'il serait capable de factoriser les entiers exponentiellement plus vite que tout algorithme classique connu. Et en 1997, Lov Grover, également aux Laboratoires *Bell*, a montré qu'un ordinateur quantique pourrait accélérer considérablement la recherche dans une base de données non triée, par exemple la recherche d'un nom dans un annuaire en ne connaissant que le numéro de téléphone de la personne.

Des bits quantiques en interaction

Toutefois, la fabrication d'un ordinateur quantique ne sera pas chose facile. Le matériel quantique – atomes, photons ou microstructures artificielles qui stockent les données dans des bits quantiques, ou « qubits » – doit satisfaire des exigences contradictoires. D'une part, il faut que les qubits soient suffisamment isolés de leur environnement, sinon des interactions externes perturberont leurs calculs. Ce processus destructeur, nommé décohérence, est le fléau des ordinateurs quantiques. Mais, d'autre part, il faut aussi que les qubits interagissent fortement les uns avec les autres et puissent être mesurés avec précision pour que l'on accède au résultat des calculs.

Les scientifiques explorent différentes voies pour construire des premiers prototypes d'ordinateur quantique. Nos propres

David Emmette



2. DES EXPÉRIENCES DE LABORATOIRE ont démontré la faisabilité du traitement quantique de l'information. Des lasers (*appareil bleu sur le cliché de gauche*) délivrent des faisceaux que des miroirs dirigent vers le dispositif contenant les ions piégés (*ci-dessus*). Les faisceaux laser permettent notamment d'immobiliser les ions dans le piège et de manipuler leurs états quantiques.

L'ESSENTIEL

- ✓ Les ordinateurs quantiques, dispositifs censés stocker et traiter des données à l'aide d'atomes, de photons ou de microstructures artificielles, pourraient un jour effectuer des calculs autrefois jugés impossibles.
- ✓ La manipulation d'ions piégés est l'une des pistes privilégiées pour réaliser un ordinateur quantique : l'idée est de stocker des données sur des ions et de transférer l'information d'un ion à un autre.
- ✓ Les scientifiques ne voient pas d'obstacle fondamental s'opposant au développement d'ordinateurs à ions piégés.

travaux se concentrent sur le traitement de l'information à l'aide d'ions positifs chargés une fois, c'est-à-dire des atomes auxquels on a ôté un électron. Sous vide et à l'aide de champs électriques appropriés, nous avons piégé de petites chaînes d'ions de telle sorte qu'ils puissent recevoir des signaux d'entrée issus d'un laser et échanger des données entre eux. Notre objectif est de développer des dispositifs où il est envisageable d'augmenter le nombre de qubits jusqu'à plusieurs centaines ou plusieurs milliers. C'est seulement à cette échelle que de tels systèmes accompliraient des tâches qui sont hors de portée des ordinateurs classiques.

Piéger des ions

La physique quantique est une théorie qui peut souvent s'exprimer en termes d'ondes. De la même façon que les ondes sonores de deux cordes de piano, ou davantage, se fondent en un accord, différents états quantiques peuvent être superposés. Par exemple, un atome peut simultanément « se trouver » en deux endroits ou deux états d'excitation différents. Mais quand on mesure un système dont l'état quantique est une superposition, la mesure réduit immédiatement l'état quantique à l'un des éléments de la superposition, la probabilité de chaque possibilité étant déterminée par son poids relatif dans la superposition (*voir l'encadré page 89*).

La puissance potentielle d'un ordinateur quantique découle de telles superpositions : contrairement à un bit classique, qui prend soit la valeur 0, soit la valeur 1, un qubit peut « valoir » à la fois 0 et 1. De même, un système de deux qubits peut englober quatre valeurs simultanément : 00, 01, 10 et 11. Plus généralement, un ordinateur quantique composé de N qubits peut manipuler 2^N nombres à la fois ; un ensemble de seulement 300 atomes, qui stockeraient chacun un bit quantique, pourrait alors contenir plus de valeurs que le nombre de particules de l'Univers !

Ces superpositions quantiques importantes sont en général « intriquées », ce qui signifie que les mesures des qubits individuels seront corrélées. On peut se représenter l'intrication quantique comme un lien invisible entre particules qui n'a pas d'équivalent en physique classique, un lien qu'Einstein a qualifié de « fantomatique action à distance ».

Dans nos expériences d'ions piégés, par exemple, chaque ion, suspendu à l'aide de champs électriques, se comporte comme un minuscule aimant ; les états 0 et 1 des qubits peuvent alors correspondre à deux orientations possibles de chaque aimant atomique (par exemple, vers le haut et vers le bas).

Le refroidissement par laser (qui diminue l'énergie cinétique des atomes en les faisant absorber des photons du faisceau laser, que les atomes réémettent dans

des directions aléatoires) immobilise pratiquement les ions dans le piège. Comme les ions se trouvent dans une enceinte à vide, ils sont isolés de l'environnement, mais la répulsion électrique entre eux fournit une interaction intense susceptible de créer une intrication. Et des faisceaux laser plus fins qu'un cheveu peuvent être dirigés sur tel ou tel ion afin de manipuler et mesurer les données stockées dans les qubits.

Ces dernières années, les physiciens ont réalisé quelques expériences de démonstration du principe du calcul quantique avec des ions piégés. Ils ont produit des états intriqués allant jusqu'à huit qubits et ont montré que ces dispositifs rudimentaires pouvaient exécuter des algorithmes simples.

Changer d'échelle

Il semble possible, même si c'est un défi technologique, d'étendre cette approche des ions piégés à des nombres beaucoup plus grands de qubits. En s'inspirant du chemin suivi par les ordinateurs classiques, il s'agirait notamment d'enchaîner des portes logiques quantiques, chacune constituée de seulement quelques ions piégés. On pourrait adapter les techniques classiques de correction d'erreurs à l'univers quantique en utilisant plusieurs ions pour coder chaque qubit (le codage redondant de l'information permet au système de tolérer des erreurs, tant que leur taux reste suffisamment faible). Finalement, un véritable ordinateur quantique à ions piégés ferait vraisemblablement appel au stockage et à la manipulation de quelques milliers d'ions au moins, piégés dans des réseaux complexes d'électrodes sur des puces microscopiques.

La première exigence pour réaliser un ordinateur quantique « universel » (c'est-à-dire capable d'effectuer tout type de calcul) est une mémoire fiable. Si nous mettons un qubit dans une superposition d'états 0 et 1, avec l'orientation magnétique de l'ion pointant en haut et en bas simultanément, il devra rester dans cet état de superposition jusqu'à ce que les données soient traitées ou mesurées. Les chercheurs savent depuis longtemps que les ions maintenus dans des pièges électromagnétiques font de très bons registres de mémoire, avec des durées de vie des superpositions (ou « temps de cohérence ») dépassant les dix minutes. Ces durées de

vie sont relativement longues grâce à la faiblesse de l'interaction entre un ion et son environnement.

Le deuxième ingrédient essentiel pour le calcul quantique est la capacité à manipuler chaque qubit séparément. Si les qubits correspondent aux orientations magnétiques d'ions piégés, il est possible d'utiliser des champs magnétiques oscillants, appliqués pendant une durée déterminée, pour faire basculer un qubit (le faire passer de 0 à 1, ou inversement) ou pour le mettre dans une superposition d'états. Étant donné les courtes distances séparant les ions piégés (quelques micromètres), il est difficile de localiser les champs oscillants sur un ion déterminé; or on aura souvent besoin de

changer l'orientation d'un qubit sans changer celle de ses voisins. On peut cependant résoudre ce problème en utilisant des faisceaux laser que l'on focalise sur le ou les qubits particuliers qui nous intéressent.

La troisième exigence fondamentale est la possibilité de concevoir au moins un type de porte logique entre qubits. Un tel dispositif peut prendre la même forme que les portes logiques classiques (les portes ET et OU, qui constituent les éléments de base des processeurs classiques), mais il doit également agir sur les superpositions d'états, spécificités des qubits. Un choix fréquent de porte logique à deux qubits est la porte CNOT (pour *controlled NOT*, c'est-à-dire un NON contrôlé).

États intriqués et portes logiques

Une fantomatique action à distance

Le « cube ambigu » est analogue à un ion se trouvant dans une superposition (notée ici « 0 + 1 ») de deux états quantiques, une mesure effectuée sur l'ion le fixant dans l'un des deux états définis (0 ou 1). Quand une paire d'ions se trouve dans la superposition quantique intriquée notée « 00 + 11 », une mesure contraindra les deux ions à adopter le même état (soit 0, soit 1), même s'ils sont très distants l'un de l'autre.

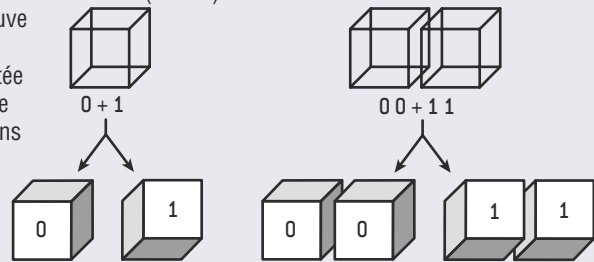


Table de vérité de la porte CNOT

Un ordinateur à ions piégés utiliserait des portes logiques telles que la porte CNOT (un NON contrôlé), constituée de deux ions dont les états sont notés A et B. Cette table de vérité montre que si A (le bit de contrôle) prend la valeur 0, la porte laisse B inchangé. Mais si A vaut 1, la porte fait basculer B, faisant passer sa valeur de 0 à 1, et inversement. Et si A est dans une superposition quantique des états 0 et 1, la porte met les deux ions dans une superposition quantique intriquée (00 + 11).

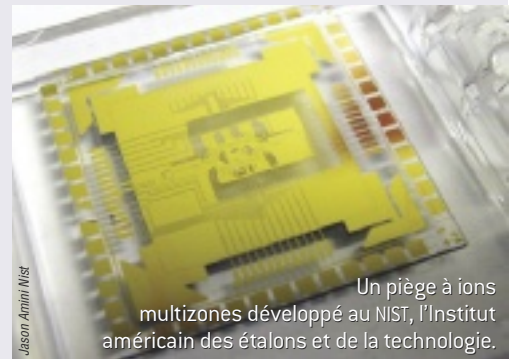
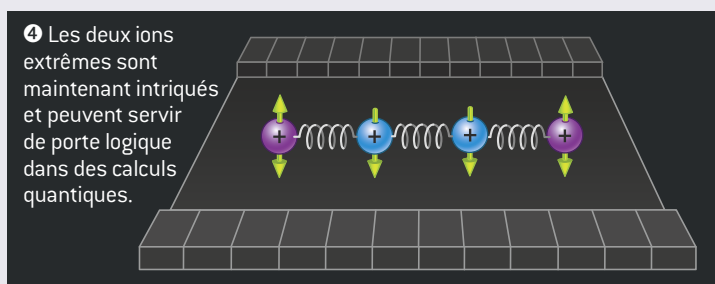
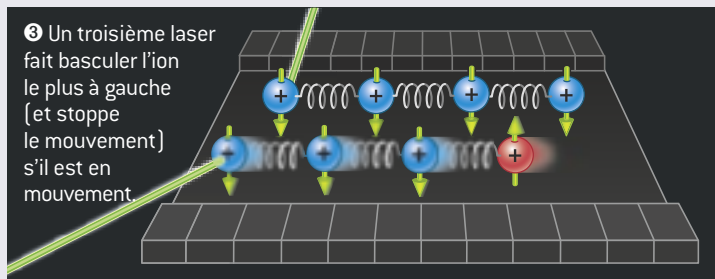
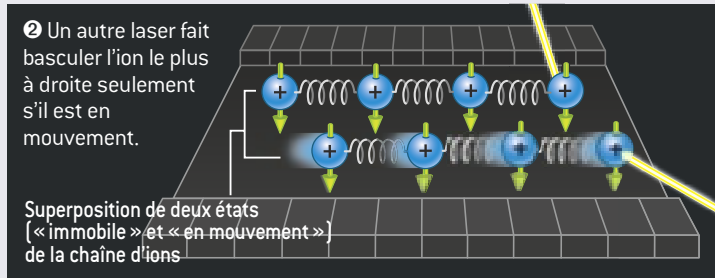
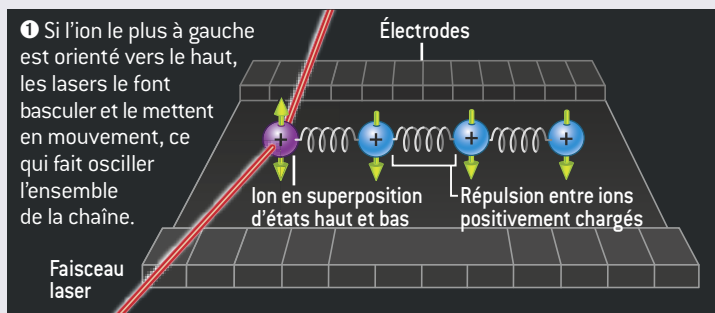
A	B	→	A'	B'
0	0	→	0	0
0	1	→	0	1
1	0	→	1	1
1	1	→	1	0
0 + 1	0	→	00 + 11	

Nommons A et B les entrées des deux qubits. A est le bit de contrôle. Si la valeur de A est 0, la porte CNOT laisse B inchangé; si A vaut 1, la porte fait basculer B, le faisant passer de 0 à 1, et inversement (voir l'encadré page 89). Cet élément porte aussi le nom de porte logique conditionnelle, parce que son action sur le qubit d'entrée B (que le bit soit basculé ou non) dépend de la condition du qubit d'entrée A.

Pour réaliser une porte logique conditionnelle entre deux qubits formés par des ions, il faut les coupler; en d'autres termes, il faut qu'ils communiquent. Les deux qubits étant chargés positivement, leur mouvement est fortement couplé à travers la répulsion coulombienne, c'est-à-dire la répulsion électrostatique entre deux charges électriques de même signe. En 1995, à l'Université d'Innsbruck, en

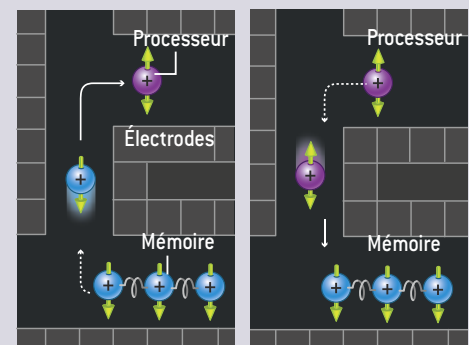
DES CHÂÎNES D'IONS

Une méthode pour construire un ordinateur à ions piégés consiste à coupler les ions par leurs mouvements. Une chaîne d'ions est placée électriquement en lévitation entre deux rangées d'électrodes. Comme les particules chargées positivement se repoussent, tout mouvement d'oscillation communiqué à un ion (par exemple au moyen d'un laser) fera bouger l'ensemble de la chaîne. Les lasers peuvent également faire basculer les orientations magnétiques des ions, qui peuvent coder des données (une orientation vers le haut peut correspondre à un 1, tandis qu'une orientation vers le bas pourra représenter un 0).



L'avenir

La transposition de ce système à des nombres plus importants d'ions présente des difficultés. Il semble que des chaînes plus longues (contenant plus d'une vingtaine d'ions) soient presque impossibles à contrôler, en raison des interférences entre leurs nombreux modes de mouvement collectif. Les scientifiques ont donc commencé à développer des réseaux de pièges où les ions peuvent être déplacés d'une chaîne située, mettons, dans la mémoire du système, jusqu'à une autre chaîne où les données sont traitées. L'intrication quantique des ions permet de transférer les données d'une zone du piège à une autre.



Jen Christiansen

Autriche, Juan Ignacio Cirac et Peter Zoller ont proposé un moyen d'utiliser cette interaction coulombienne pour coupler indirectement les états internes (l'orientation de l'aimant atomique) de deux qubits ioniques et réaliser ainsi une porte CNOT. Expliquons-en brièvement le principe en considérant une variante de leur porte.

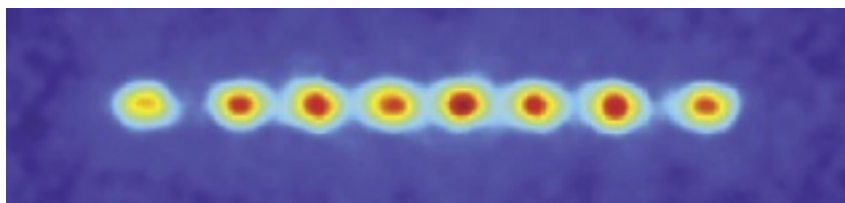
Imaginons, pour commencer, deux billes dans un bol. Supposons que les billes soient chargées et se repoussent. Les deux billes tendraient à se placer au fond du bol, mais la répulsion coulombienne leur impose des positions de repos un peu plus élevées que le fond du bol et diamétralement opposées. Dans cet état, les billes auraient tendance à se déplacer de conserve : elles pourraient, par exemple, osciller dans le bol le long de la direction qu'elles définissent, tout en préservant la distance de séparation. Une paire de qubits dans un piège à ions connaîtrait également ce mouvement conjoint de va-et-vient, comme deux masses de pendule reliées par un ressort. On peut déclencher le mouvement conjoint en appliquant une pression de radiation, exercée par un faisceau laser modulé à la fréquence d'oscillation naturelle du piège (voir l'encadré page ci-contre).

Plus important, on peut s'arranger pour que le faisceau laser ne pousse l'ion que si son orientation magnétique est vers le haut, ce qui correspond ici à une valeur 1 du qubit ; et que, de plus, il fasse tourner l'orientation de ces aimants atomiques, pendant que les ions oscillent dans l'espace, avec une rotation différente selon qu'un seul ion ou les deux sont dans l'état 1.

Une porte logique quantique

Dans ces conditions, on montre qu'en appliquant aux ions une impulsion laser adéquate pendant une durée appropriée, on peut réaliser une porte CNOT. Quand les qubits sont, initialement, dans une superposition d'états, l'action de cette porte intrique les ions. C'est donc une opération fondamentale dans la perspective de calculs quantiques effectués avec de nombreux ions.

Plusieurs équipes, notamment de l'Université d'Innsbruck, de l'Université du Michigan à Ann Arbor, du NIST (l'Institut américain des étalons et de la technologie) et de l'Université d'Oxford, ont fait la démonstration de portes logiques CNOT.



3. UNE CHAÎNE DE HUIT IONS DE CALCIUM en lévitation, confinée dans une enceinte à vide et refroidie par laser jusqu'à une immobilité presque complète. Une telle chaîne peut servir à réaliser des calculs quantiques.

LES AUTEURS



Christopher MONROE est professeur de physique à l'Université du Maryland, aux États-Unis, et membre du Joint Quantum Institute du Maryland et du NIST (National Institute of Standards and Technology, l'Institut américain des étalons et de la technologie).

David WINELAND dirige l'équipe de stockage des ions au sein de la Division temps et fréquence du NIST à Boulder, dans le Colorado.

✓ SUR LE WEB

Laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques (Paris) : <http://www.mpq.univ-paris-diderot.fr/spip.php?rubrique28>

NIST : <http://tf.nist.gov/timefreq/ion>

Joint Quantum Institute : <http://www.jqi.umd.edu>

Équipe de Christopher Monroe : <http://www.iontrap.umd.edu>

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Aaronson, *Les limites du calcul quantique*, *Pour la Science*, n°367, pp. 68-75, mai 2008.

M. le Bellac, *Introduction à l'information quantique*, Belin, 2005.

Ch. R. Monroe, *Quantum information processing with atoms and photons*, *Nature*, vol. 416, pp. 238-246, 2002.

Bien sûr, aucune de ces portes quantiques ne fonctionne parfaitement, en raison de facteurs limitants tels que les fluctuations d'intensité des lasers et des champs électriques parasites.

Actuellement, les chercheurs sont capables de réaliser une porte à deux qubits fiable à un peu plus de 99 pour cent, c'est-à-dire que la probabilité d'un dysfonctionnement de la porte est inférieure à un pour cent. Mais pour un ordinateur quantique, il faudrait probablement atteindre une fiabilité de 99,99 pour cent afin que les techniques de correction d'erreurs opèrent correctement. L'une des principales tâches qui occupent les équipes de recherche sur les ions piégés est de réduire suffisamment le bruit de fond pour y parvenir. Le défi est de taille, mais aucun obstacle fondamental ne s'y oppose.

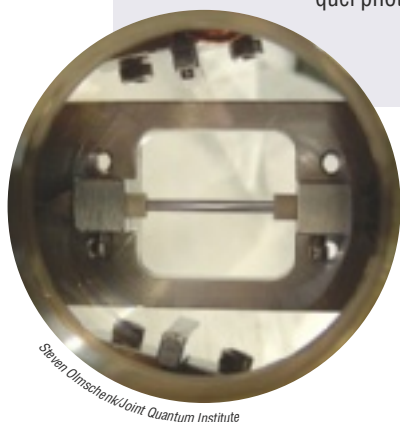
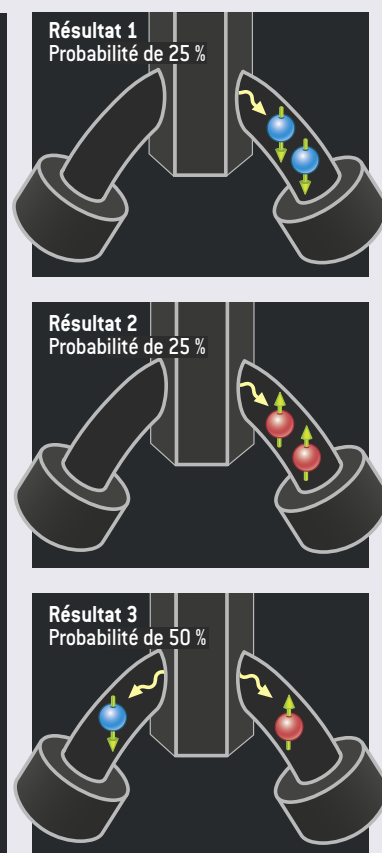
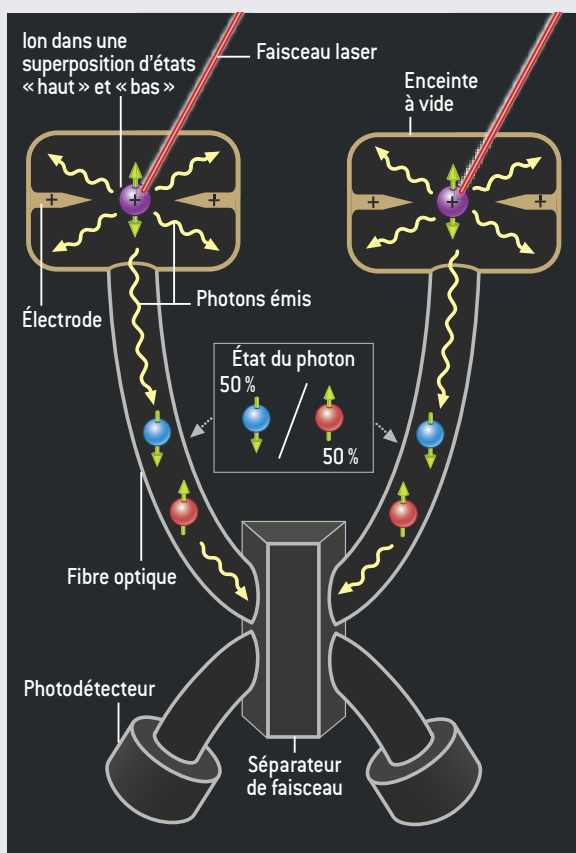
Déplacer des chaînes

Cependant, peut-on réellement construire un ordinateur quantique complètement opérationnel à base d'ions piégés ? Il semble malheureusement que les chaînes d'ions plus longues, contenant plus d'une vingtaine de qubits, soient presque impossibles à contrôler, en raison de la trop grande densité des modes de mouvement collectif. Les scientifiques se sont donc mis à explorer l'idée de compartimenter le matériel quantique en morceaux maîtrisables, les calculs étant effectués au moyen de courtes chaînes d'ions que l'on déplacerait d'un endroit à l'autre sur la puce quantique.

En utilisant des champs électriques, il est possible de déplacer les chaînes d'ions sans perturber leur état interne, c'est-à-dire en préservant les données qu'ils portent. Et l'on pourrait intriquer une chaîne avec l'autre pour transférer les données et effectuer des traitements de l'information nécessitant de nombreuses portes logiques. L'architecture résultante rappellerait celle des dispositifs à couplage de charge (CCD) couramment utilisés dans

LIER DES IONS AVEC DES PHOTONS

Pour le calcul à base d'ions piégés, une approche alternative consiste à lier les ions au moyen des photons qu'ils émettent. Deux ions piégés distants l'un de l'autre (*en violet*), chacun isolé dans une enceinte à vide (*photographie ci-dessous*), sont excités par des impulsions laser et émettent des photons dont quelques-uns sont recueillis par une fibre optique. La fréquence des photons dépend de l'orientation magnétique des ions ; un photon émis par un ion dans une superposition d'états « haut » et « bas » (à moitié vers le haut, à moitié vers le bas) serait aussi dans une superposition quantique de fréquences (*à moitié rouge et à moitié bleu dans cet exemple*). Si les photons émis par les deux ions sont dans le même état, le séparateur de faisceau les expédiera tous deux vers l'un des photodétecteurs. Mais s'ils sont dans des états différents, ils se dirigeront vers des détecteurs différents. Dans ce cas, les ions sont intriqués, propriété liée au fait qu'on ne peut pas préciser quel ion a émis quel photon.



Steven Olmschenk/Joint Quantum Institute

Puissances de deux

✓ **L'énorme potentiel des ordinateurs à base d'ions piégés est lié au fait qu'un système de N ions peut représenter 2^N nombres à la fois. Quand N augmente, 2^N augmente exponentiellement.**

$$2^5 = 32$$

$$2^{10} = 1\ 024$$

$$2^{50} = 1\ 125\ 899\ 906\ 842\ 624$$

$$2^{100} =$$

$$1\ 267\ 650\ 600\ 228\ 229\ 401\ 496\ 703\ 205\ 376$$

les appareils photo numériques par exemple : de même qu'un CCD peut déplacer une charge électrique dans un réseau de condensateurs, une puce quantique propulserait des chaînes d'ions à travers un ensemble de pièges linéaires.

Au NIST, bon nombre des expériences d'ions piégés ont fait intervenir le déplacement d'ions à travers un piège linéaire multizones. Mais le passage à des systèmes beaucoup plus grands nécessiterait des structures plus élaborées, impliquant une multitude d'électrodes pour guider les ions dans n'importe quelle direction. Les électrodes devront être très petites (de l'ordre de 0,01 à 0,10 millimètre) pour confiner les ions et contrôler leur transport avec précision. Pour ce faire, on dispose heureusement de techniques de microfabrication déjà utilisées pour les puces électroniques classiques.

Depuis l'année dernière, plusieurs équipes ont fait la démonstration de premiers pièges ioniques intégrés. Des physiciens de l'Université du Michigan et de celle du Maryland ont utilisé pour

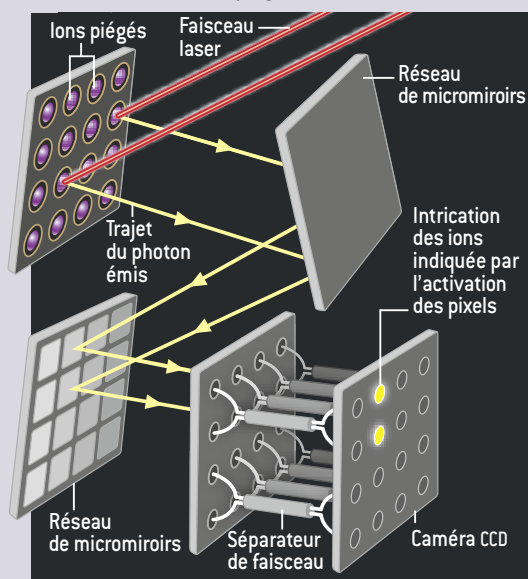
ce faire une structure semiconductrice en arséniure de gallium. D'autres, au NIST, ont conçu une nouvelle géométrie de piège ionique dans laquelle les ions flottent au-dessus de la surface de la puce. Des équipes d'Alcatel-Lucent et des Laboratoires nationaux Sandia ont fabriqué des pièges à ions encore plus élaborés sur des puces de silicium.

Beaucoup reste à faire sur ces puces à pièges ioniques. Le bruit atomique émanant des surfaces voisines doit impérativement être réduit, peut-être en refroidissant les électrodes avec de l'azote liquide ou de l'hélium liquide. Et l'on doit habilement contrôler le mouvement des ions sur la puce pour éviter de chauffer les particules et de perturber leurs positions. Par exemple, le transport des ions le long d'un simple coude dans une jonction en T nécessite de synchroniser soigneusement les forces électriques appliquées.

Entre-temps, d'autres scientifiques poursuivent une autre voie, qui pourrait contourner certaines des difficultés de contrôle du mouvement des ions. Au

L'avenir

L'approche des liens photoniques a l'intérêt d'offrir un moyen de connecter assez facilement un nombre important d'ions. On pourrait diriger des faisceaux laser sur un réseau d'ions piégés, et les photons émis se propageraient vers un ensemble de séparateurs de faisceaux. Une caméra CCD détecterait facilement l'intrication de deux ions quelconques, et chaque intrication augmenterait la puissance de traitement de l'ordinateur à ions piégés.



Jen Christensen

lieu de coupler les ions par leur mouvement oscillatoire, elle consiste à se servir de photons pour lier les qubits.

Selon des idées décrites en 2001 par J. Cirac, P. Zoller et leurs collègues Luming Duan, de l'Université du Michigan, et Mikhail Lukin, de l'Université Harvard, des photons sont émis à partir de chaque ion piégé de telle sorte que les attributs des photons (telles leur polarisation et leur fréquence) s'intriquent avec l'état quantique interne (magnétique) de l'ion émetteur.

Intriquer des photons avec des ions

Les photons se propagent alors le long de fibres optiques jusqu'à un séparateur de faisceau, un composant généralement utilisé pour dédoubler un faisceau lumineux. Mais dans ce dispositif, le séparateur de faisceau fonctionne à l'envers : les photons parviennent au dispositif depuis des côtés opposés, et s'ils ont la même polarisation ou fréquence, ils interfèrent et ne peuvent émerger que le long d'une

même trajectoire. Mais si les photons ont des polarisations ou des fréquences différentes – ce qui indique que les ions piégés sont dans des états quantiques différents –, les deux particules peuvent atteindre une paire de détecteurs en suivant des chemins différents (voir l'encadré ci-contre). Le point important ici est qu'après détection des photons, il est impossible de préciser quel ion a émis quel photon, et ce phénomène quantique reflète l'intrication des deux ions.

Cependant, les photons émis ne sont pas recueillis ou détectés avec succès à chaque tentative. En fait, dans l'immense majorité des cas, les photons sont perdus et les ions ne sont pas intriqués. Mais il reste possible de surmonter ce type d'erreur en répétant l'opération et en attendant simplement que les photons soient détectés simultanément sur les compteurs. Une fois que cela a eu lieu, même si les deux ions sont très éloignés l'un de l'autre, la manipulation d'un de ces qubits affectera l'autre, ce qui permet de réaliser une porte logique CNOT.

Des physiciens de l'Université du Michigan et de l'Université du Maryland ont intriqué avec succès deux qubits constitués par des ions piégés, séparés d'environ un mètre, en utilisant l'interférence des photons émis par ces ions. Le principal obstacle dans de telles expériences est le faible taux d'intrication obtenu : la probabilité de capturer ces photons isolés dans une fibre est tellement faible qu'il ne se produit que quelques intrications d'ions par minute. On pourrait augmenter ce taux en entourant chaque ion de miroirs ultraréfléchissants ; de telles « cavités optiques » amélioreraient grandement le couplage de l'émission d'ions avec les fibres optiques, mais cela est actuellement très difficile à réaliser expérimentalement. Néanmoins, tant que l'interférence finit par se produire, les chercheurs peuvent s'en servir pour effectuer un traitement quantique de l'information.

De plus, il est possible d'étendre les opérations des portes quantiques à de grands nombres de qubits en connectant des émetteurs d'ions supplémentaires à la fibre optique et en répétant la procédure jusqu'à ce que davantage de liaisons intriquées soient établies. On devrait aussi pouvoir utiliser à la fois le couplage de photons et le couplage de

mouvement discuté plus haut, afin de connecter plusieurs petits groupes d'ions piégés sur des distances éloignées. C'est exactement l'idée sous-jacente à un « répéteur quantique », où de petits dispositifs quantiques se relaient à intervalles réguliers pour maintenir l'état d'un qubit tout au long d'un parcours de plusieurs centaines de kilomètres. Sans un tel système, les données se perdraient.

Il reste encore un long chemin à parcourir avant de construire un ordinateur quantique capable de relever des défis tels que la factorisation de grands nombres,

LES ENSEMBLES D'IONS PIÉGÉS offrent un niveau inégalé d'isolation vis-à-vis de l'environnement.

qui mettent en échec les machines classiques. Mais certaines caractéristiques du traitement quantique de l'information trouvent déjà des applications concrètes.

Par exemple, plusieurs des opérations logiques simples nécessaires pour les portes à deux qubits peuvent être utilisées dans les horloges atomiques, qui décomptent le temps en se fondant sur la fréquence du rayonnement émis quand les atomes passent d'un état quantique à un autre. Et les physiciens peuvent appliquer les techniques d'intrication des ions piégés pour augmenter la sensibilité des mesures spectroscopiques (l'analyse de la lumière émise par les atomes excités).

Le domaine de l'informatique quantique promet de changer radicalement les règles des calculs par ordinateur. Les ensembles d'ions piégés sont à l'avant-garde de ces efforts parce qu'ils offrent, par rapport à la plupart des autres systèmes physiques, un niveau inégalé d'isolation par rapport à l'environnement. Dans le même temps, grâce aux lasers, il est aisé de préparer et mesurer des superpositions quantiques intriquées réalisées avec un petit nombre d'ions.

Nous attendons avec impatience une nouvelle génération de puces à ions piégés qui pourraient ouvrir la voie à des systèmes intégrant un nombre bien plus élevé de qubits. Les scientifiques pourront alors enfin réaliser leur rêve d'une machine quantique capable de s'atteler à des tâches herculéennes, autrefois considérées comme impossibles. ■