

Mémoires quantiques : stocker l'insaisissable

Comment stocker l'information quantique, si volatile qu'elle disparaît dès qu'on cherche à la connaître ?
En développant des mémoires elles-mêmes quantiques.
Dans les multiples dispositifs étudiés, lumière et matière échangent leur état quantique à la demande.

Julien LAURAT est maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Il effectue ses recherches en optique quantique au Laboratoire Kastler-Brossel (ENS, UPMC et CNRS). Il est membre de l'IFRAF, l'Institut francilien de recherche sur les atomes froids.

L'ESSENTIEL

► La nature de l'information quantique impose des dispositifs de stockage qui préservent ses propriétés.

► Les « mémoires quantiques » développées dans les laboratoires sont diverses. Elles stockent des bits quantiques ou de l'intrication.

► Elles seront les briques des réseaux de communication quantique à grande distance et, à plus long terme, des ordinateurs quantiques.

Lors d'une conversation téléphonique Paris-New York, des millions de bits traversent l'Atlantique dans des fibres optiques, sous forme d'impulsions lumineuses codant des 0 et des 1. Ces impulsions sont ensuite détectées, converties en un signal électrique, et parviennent jusqu'au haut-parleur. La conversation peut en outre être enregistrée dans le disque dur d'un ordinateur.

Aujourd'hui, cette communication n'utilise que des bits classiques. Mais depuis une vingtaine d'années, plusieurs laboratoires cherchent à tirer parti des bizarreries du monde quantique pour développer des méthodes de communication inédites. Cependant, ces méthodes sont encore loin d'être opérationnelles pour des communications transatlantiques : l'enregistrement et la transmission sur de longues distances de l'information quantique posent en effet problème. Toutefois, les mémoires quantiques pourraient bientôt changer la donne.

À terme, elles constitueront aussi une pièce essentielle des ordinateurs quantiques, qui seront capables de résoudre efficacement certains problèmes complexes (voir *Le calcul quantique peut-il tout faire ?*, par S. Aaronson, page 112). Ces ordinateurs ne sont pas pour tout de suite, mais les premières mémoires quantiques voient déjà le jour.

L'information quantique est fondée sur des « bits quantiques » ou qubits. En quoi un qubit diffère-t-il d'un bit classique, au point d'être impossible à enregistrer dans une mémoire usuelle ? Un bit classique peut prendre deux valeurs, 0 ou 1. Ces valeurs binaires sont faciles à stocker : historiquement, on s'est d'abord servi d'une carte perforée, avec des emplacements percés ou non suivant les deux valeurs à coder. Aujourd'hui, tous

les systèmes de stockage utilisés au quotidien sont fondés sur un principe similaire : les emplacements percés ou non sont juste remplacés par deux directions d'aimantation d'un matériau ferromagnétique dans le cas des disques durs et, dans le cas des CD et DVD, par de microscopiques bosses et creux gravés à leurs surfaces.

Les bits quantiques sont fondamentalement différents. Ils peuvent être suspendus entre deux états et coder à la fois 0 et 1 ; on parle de superposition quantique. Les systèmes de stockage traditionnels ne sont alors pas adaptés à l'information quantique : un emplacement devrait être à la fois percé et non percé.

Stocker sans mesurer

Outre l'outil de stockage, la connaissance de l'état à stocker pose problème. Un qubit est souvent porté par un système quantique individuel, tel un atome à deux niveaux d'énergie – les deux niveaux codant les deux états logiques 0 et 1. Le porteur d'un qubit peut aussi être un photon, cas qui nous intéressera plus spécifiquement ici, car la lumière est bien adaptée pour transmettre de l'information. Un qubit peut alors être codé par la polarisation de ce photon (la direction du champ électrique associé), le 0 et le 1 correspondant par exemple aux polarisations verticale et horizontale. Toute superposition des deux polarisations est possible. Pouvons-nous mesurer ce qubit, c'est-à-dire caractériser l'état de superposition ? Non, et ceci pour une raison théorique fondamentale : toute mesure détruit la superposition, qui fait l'attrait de l'information quantique, et donne soit 0, soit 1.

On doit donc stocker le qubit photonique sans le mesurer. Une méthode rudimentaire



UNE MÉMOIRE QUANTIQUE SOLIDE est constituée d'un cristal (*le parallélépipède*) d'une taille de l'ordre du centimètre, dopé par des ions dits de terres rares. Elle stocke l'état quantique de la lumière incidente, qu'elle réémet ensuite. Dans le système présenté ici, la réémission nécessite l'application d'un champ électrique, créé par les électrodes qui entourent le cristal (*les cylindres verticaux*). En outre, le système doit être placé dans un cryostat, qui le refroidit à -270 degrés.

serait de le retarder en le propageant dans une fibre optique. Le temps de propagation équivaldrait à une durée de stockage. Il dépend de la longueur de la fibre et de la vitesse de la lumière : une fibre de 15 kilomètres correspond par exemple à un retard de 70 microsecondes. Cette méthode a deux inconvénients rédhibitoires. D'abord, les pertes dans la fibre limitent la longueur utilisable. Ensuite, la durée de stockage est imposée par la longueur de la fibre et n'est donc pas modifiable. Même en complexifiant le système, le qubit ne serait disponible qu'à des instants déterminés.

Des transferts réversibles lumière-matière

Or une mémoire doit stocker l'état quantique de la lumière sans l'altérer et le relâcher à la demande. Le stockage de l'information quantique nécessite donc un transfert direct et réversible, sans mesure, vers un système matériel, qui pourra lui-même être dans un état de superposition quantique.

Le système le plus simple serait un atome absorbant le photon à stocker et passant de ce fait sur un niveau d'énergie excité ; le photon serait ensuite réémis par désexcitation de l'atome. Malheureusement, cette absorption est peu probable ; de plus, la réémission s'effectuerait trop rapidement, et surtout de façon aléatoire dans l'espace et dans le temps. Plusieurs solutions existent pour résoudre ces problèmes.

La première se nomme électrodynamique quantique en cavité. En piégeant un atome dans une cavité optique, c'est-à-dire un résonateur constitué de deux miroirs entre lesquels la lumière fait de multiples allers-retours, on crée un régime particulier, dit de couplage fort. Dans ce régime, atome et lumière échangent de l'énergie de nombreuses fois, comme deux oscillateurs couplés. Un photon entrant dans l'axe de la cavité (selon la direction perpendiculaire aux miroirs) est alors absorbé de façon quasi systématique. Le couplage fort est cependant difficile à obtenir : les cavités doivent être très petites et les miroirs très réfléchissants pour que la lumière ne s'échappe que lentement (elle finit par traverser un des miroirs).

Pour « stocker la lumière », on utilise alors deux sous-niveaux du niveau d'énergie fondamental de l'atome (l'existence de ces sous-niveaux résulte de divers phénomènes, comme les interactions entre les spins électronique et nucléaire), ainsi qu'un niveau excité. Prenons le cas idéal d'un photon unique. Celui-ci est absorbé par l'atome, qui passe du premier au second sous-niveau *via* le niveau excité, lors d'un processus commandé par un laser auxiliaire (voir l'encadré ci-dessous). Lorsqu'on éteint ce dernier, le système est comme figé : le photon est stocké. La lecture se fait en rallumant le laser, ce qui entraîne la réémission du photon.

En 2007, une impulsion lumineuse atténuée a été stockée dans un tel système, puis relâchée à la demande – ce qu'on n'a pas encore réussi à faire

STOCKER UN QUBIT PHOTONIQUE DANS UN ATOME

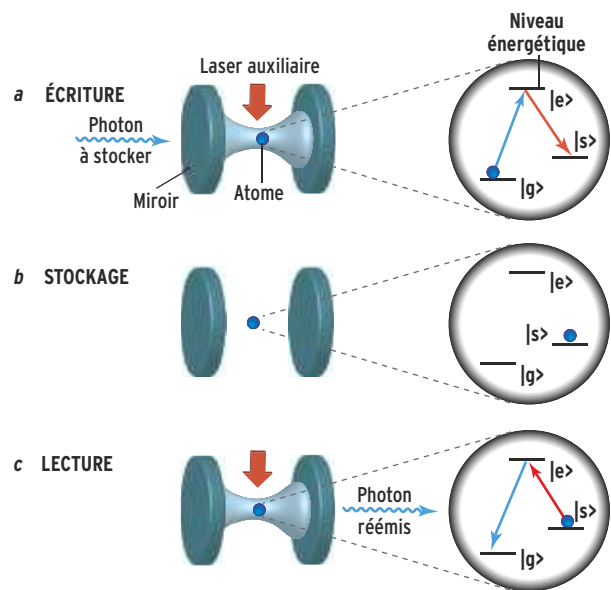
Certains mémoires sont fondées sur un atome unique suspendu dans une cavité optique, qui se compose de deux miroirs parallèles fortement réfléchissants. Pour y stocker un photon, on utilise trois niveaux d'énergie de l'atome : deux sous-niveaux du niveau fondamental, $|g\rangle$ et $|s\rangle$, et un niveau excité, $|e\rangle$. On parle d'une configuration énergétique en λ , car le symbole de cette lettre donne une image du niveau excité au-dessus des deux sous-niveaux.

Grâce à la cavité, qui crée un régime dit de couplage fort entre l'atome et la lumière, le photon est absorbé de façon quasi systématique par l'atome. Celui-ci, initialement placé dans le premier sous-niveau ($|g\rangle$), passe de ce fait dans un état excité (niveau $|e\rangle$). En temps normal, l'atome peut retourner dans le niveau $|g\rangle$ en réémettant le photon. Ici, on envoie sur l'atome un faisceau laser auxiliaire résonant avec la seconde transition optique (ses photons ont une énergie correspondant à la transition entre le second sous-niveau $|s\rangle$ et le niveau excité) ; on montre alors que l'atome est forcé de se désexciter vers le sous-niveau $|s\rangle$ (a).

Lorsqu'on éteint le laser auxiliaire, le système est comme figé (b). Ainsi, on a stocké le photon en transférant l'atome du premier vers le second sous-niveau fondamental. La lecture se fait en rallumant le laser auxiliaire : l'atome retourne au premier sous-niveau en émettant un photon unique (c).

Ce système permet de stocker un qubit photonique, dont les deux états logiques 0 et 1 seraient respectivement codés par l'absence

et la présence d'un photon unique. Si le qubit est dans un état de superposition du 0 et du 1, on stocke cet état sous la forme d'une superposition des deux sous-niveaux $|g\rangle$ et $|s\rangle$, $|g\rangle$ correspondant à l'absence de photon et $|s\rangle$ à la présence d'un photon.



avec un photon unique. L'état quantique de l'impulsion atténuée est en première approximation une superposition du vide (absence de photon) et d'un photon unique, que l'atome stocke sous la forme d'une superposition des deux sous-niveaux du niveau fondamental : le premier sous-niveau, où l'atome se trouve initialement, code pour l'absence de photon et le second pour la présence d'un photon.

La superposition obtenue est ainsi l'image fidèle de celle de l'impulsion à stocker. Or une telle superposition de deux sous-niveaux a un long temps de vie (car l'atome peut rester longtemps sur les sous-niveaux fondamentaux), ce qui permet d'utiliser ce système comme une mémoire. Comme nous le verrons, la plupart des dispositifs de mémoire sont d'ailleurs fondés sur la même stratégie, qui consiste à transférer, grâce à un laser de commande, l'état quantique de la lumière à une superposition de niveaux atomiques.

Les recherches en électrodynamique quantique se dirigent aujourd'hui vers des systèmes encore plus petits, autorisant un confinement plus important de la lumière. On fabrique par exemple des microtores en silice fondue. La lumière, qui est guidée vers le tore par une fibre optique, puis circule à l'intérieur, est alors couplée par onde évanescente (une onde dont l'intensité diminue exponentiellement avec la distance à la source) à un atome unique piégé à proximité de la surface. Des tourniquets à photons ont ainsi été construits : lorsque deux photons parviennent sur le microtore couplé à l'atome, un seul est transmis. En intégrant un grand nombre de ces structures sur une petite surface, on pourra alors construire des réseaux quantiques sur puce.

Parallèlement à ces systèmes couplant atome unique et lumière en cavité, les physiciens confectionnent des dispositifs où la lumière interagit avec de grands ensembles d'atomes identiques. Le grand nombre d'atomes augmente la probabilité d'interactions avec le photon, ce qui facilite l'absorption sans nécessiter de cavité. Il permet aussi une réémission directionnelle lors de la lecture, car cette réémission se fait « collectivement », comme par un réseau d'antennes dont les émissions interfèrent constructivement dans une direction. L'efficacité dépend ainsi fortement du nombre d'atomes mis en jeu.

De l'atome unique aux larges ensembles d'atomes

Les ensembles d'atomes, généralement des alcalins (césium ou rubidium par exemple), sont sous des formes variées. Les équipes d'Élisabeth Giacobino, au Laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, et celle d'Eugene Polzik, à Copenhague, utilisent des vapeurs, chaudes ou à température ambiante. Ces groupes, ainsi que de nombreux autres, élabor



California Institute of Technology

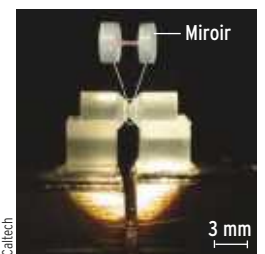
rent aussi des nuages denses refroidis par des lasers, et composés soit d'atomes suspendus par ces mêmes lasers, soit d'ions piégés électrostatiquement ; dans ce dernier cas, les ions s'ordonnent selon une structure périodique.

De tels ensembles d'atomes ralentissent la lumière, voire l'arrêtent, grâce au phénomène de « transparence induite électromagnétiquement », ou EIT (voir l'encadré page 106). On utilise là encore deux sous-niveaux du niveau fondamental des atomes. Le faisceau à stocker a une énergie proche de celle nécessaire pour faire passer les atomes du premier sous-niveau, où ils sont tous initialement placés, au niveau excité. En général, plus la fréquence de ce faisceau est proche de celle de résonance atomique (la fréquence du photon émis lorsque l'atome se désexcite), plus il est absorbé et plus le milieu lui est donc opaque. Cependant, lorsqu'un faisceau de contrôle couple le second sous-niveau au niveau excité, les propriétés du milieu atomique se modifient : celui-ci devient transparent pour le signal si ce dernier est proche de la résonance. Lorsqu'il s'en écarte, il est de nouveau absorbé : le faisceau de contrôle a ainsi ouvert une fenêtre de transparence dans le spectre d'absorption.

Cette forte variation de l'absorption s'accompagne d'une forte diminution de la vitesse à laquelle la lumière se propage dans le milieu : c'est le phénomène de « lumière lente ». En 1999, la physicienne Lene Hau et son équipe de l'Université Harvard, aux États-Unis, ont ainsi ralenti une impulsion lumineuse dans un nuage dense d'atomes de sodium. La vitesse mesurée était de 17 mètres par seconde (environ 60 kilomètres par heure), ce qui correspond à une réduction d'un facteur 10 millions de la vitesse de la lumière dans le vide !

Du fait de ce ralentissement, l'impulsion optique à stocker se comprime spatialement, jusqu'à être entièrement contenue dans le milieu atomique. Lorsque c'est le cas, l'extinction du

DANS CE RÉSONATEUR micrométrique en silice, la lumière circule au sein du tore, à proximité duquel un atome unique peut être piégé. Lumière et atome sont alors couplés par onde évanescente.



Caltech

DANS UNE CAVITÉ OPTIQUE, deux miroirs très réfléchissants se font face. Un atome de césium est ici suspendu entre eux par une pince optique.

CETTE CAVITÉ EN CHIFFRES

- 10⁻¹² atmosphère** règne au sein de la cavité.
- 10 micromètres** séparent les deux miroirs.
- 1 atome unique** est suspendu par une pince optique entre ces deux miroirs.
- 1 million** d'allers-retours sont effectués par la lumière avant qu'elle ne s'échappe.

faisceau de contrôle stoppe la lumière. Plus tard, si on rallume le faisceau, la lumière reprend sa propagation et quitte le milieu atomique. Les premières expériences de lumière arrêtée furent réussies en 2001 avec des impulsions laser contenant un grand nombre de photons. Puis, en 2005, deux groupes américains, celui d'Alex Kuzmich, à l'Institut de technologie de Géorgie, et celui de Mikhael Lukin, à l'Université Harvard, réussirent le tour de force de stocker un photon unique.

Comme dans les dispositifs à atome unique et cavité optique, l'état quantique de la lumière est transféré aux atomes sous forme de superposition de deux niveaux d'énergie, lors d'un processus contrôlé par un laser auxiliaire. Mais ici plusieurs millions d'atomes sont impliqués, sans qu'on puisse dire lesquels ont changé de niveau. On parle alors d'excitation collective.

Fragile superposition quantique...

La durée de la mémoire dépend du temps de vie de la superposition quantique entre les deux niveaux d'énergie; cette superposition peut être détruite de façon précoce par les mouvements des atomes et les champs magnétiques différents auxquels ils sont soumis – l'environnement magnétique est en effet très hétérogène, en raison de l'aimantation des objets alentour. En pratique, le temps de stockage est souvent limité à quelques dizaines de microsecondes. En 2009, le groupe

d'Immanuel Bloch, de l'Université de Mayence, en Allemagne, a obtenu un record de 240 millisecondes en utilisant un réseau de pièges atomiques, où les atomes sont rangés un par un comme dans une boîte d'œufs; le problème est que 99,7 pour cent des photons se sont perdus.

D'une façon générale, ces mémoires sont soumises à des pertes importantes: seuls un à deux photons sur dix sont stockés, puis relus avec succès. On a récemment obtenu des taux bien meilleurs, proches de 50 pour cent, mais uniquement avec des impulsions de lumière contenant un grand nombre de photons. De nombreux paramètres restent donc à améliorer, mais les mémoires fondées sur le phénomène d'EIT constituent un outil de choix.

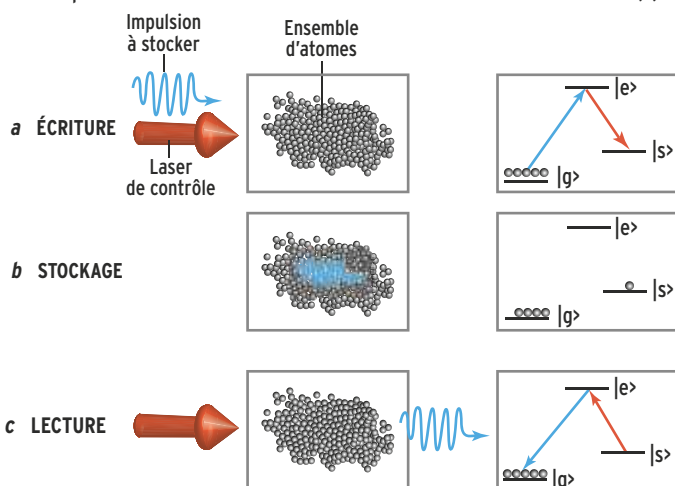
De nouveaux candidats, également fondés sur une grande assemblée d'atomes, sont apparus ces cinq dernières années: les cristaux dopés par des ions de terres rares (un groupe d'ions métalliques, tel l'erbium, ayant des propriétés voisines). À la différence des dispositifs précédents, les atomes sont ici figés au sein d'un solide (*voir la figure page 103*). À température ambiante, ces matériaux sont déjà très utilisés, notamment dans les répéteurs classiques qui amplifient la lumière au sein des réseaux de télécommunication. À la température de l'hélium liquide (environ -270°C), ils manifestent une propriété exceptionnelle: leurs temps de cohérence (c'est-à-dire les durées de vie de leurs niveaux et sous-niveaux d'énergie, notamment le niveau excité, et des diverses superpositions quantiques qu'ils sont susceptibles de manifester) sont très longs, de quelques millisecondes à plusieurs secondes. Cette propriété serait très utile pour les mémoires quantiques.

Des mémoires solides

Comme tout système mettant en jeu une assemblée d'atomes, les mémoires solides convertissent l'état quantique de la lumière en excitation collective du milieu. Les méthodes précédentes devaient utiliser deux sous-niveaux du niveau fondamental, car le niveau excité n'avait pas une durée de vie suffisante; en outre, elles nécessitaient un faisceau de contrôle pour coupler ces deux sous-niveaux *via* le niveau excité. Les méthodes fondées sur les cristaux dopés sont bien plus simples: le photon à stocker excite l'ion – ou plutôt l'ensemble d'ions –, qui se désexcite en le réémettant. Lorsque l'état quantique de la lumière est une superposition du vide et d'un photon unique, il est stocké sous la forme d'une superposition du niveau excité et du niveau fondamental. Du fait du long temps de vie du niveau excité, ces mémoires peuvent en théorie atteindre une durée de stockage conséquente, de l'ordre de quelques millisecondes.

ARRÊTER LA LUMIÈRE

Certains mémoires quantiques exploitent le phénomène dit de lumière lente. L'impulsion à stocker est envoyée sur un grand ensemble d'atomes en même temps qu'un laser de contrôle (a). La vitesse de la lumière est alors réduite et l'impulsion se comprime dans le milieu. Lorsque l'impulsion est entièrement contenue dans le milieu, le faisceau de contrôle est éteint, l'impulsion est absorbée et son état quantique est transféré aux atomes sous forme d'excitations collectives de deux niveaux énergétiques (b). À la demande, la mémoire peut être lue en allumant de nouveau le laser de contrôle (c).



De longs temps de cohérence impliquent des raies d'absorption étroites pour chaque ion : leur largeur, nommée largeur homogène, n'est que de quelques centaines de hertz. Cependant, les ions ayant des environnements différents en raison des défauts du cristal, leurs niveaux d'énergie diffèrent légèrement, de sorte que leurs raies se décalent ; en conséquence, la raie d'absorption du solide, combinaison de toutes les raies individuelles, devient très étendue. Cet élargissement, dit inhomogène, se traduit par une raie globale pouvant atteindre plusieurs dizaines de gigahertz de largeur. Il permet de stocker des impulsions courtes (plus une impulsion est courte, plus son spectre est étendu, c'est-à-dire plus elle est composée d'une grande variété de fréquences) ou des trains d'impulsions.

L'élargissement inhomogène a donc certains avantages, mais il a pour effet de faire évoluer différemment la phase (une propriété associée aux atomes) de chaque atome mis en jeu dans l'état collectif. En conséquence, si on laisse celui-ci se désexciter spontanément, le photon sera émis dans une direction aléatoire. Il faut alors rephaser les atomes par divers dispositifs, ce qui permet une réémission directive de la lumière, d'où le nom d'«écho de photons» donné à cette méthode.

Une étrange course automobile

On peut opérer ce rephasage de deux façons, qui nécessitent une préparation préalable du milieu. La première méthode, appliquée pour la première fois en 2006 par Neil Manson et ses collègues de l'Université nationale australienne, est nommée CRIB pour *Controlled Reversed Inhomogeneous Broadening* (Contrôle inversé de l'élargissement inhomogène). Elle consiste à soumettre, pendant une durée T , le cristal dopé en ions à un champ électrique au moment de l'absorption de la lumière à stocker – à partir duquel chaque atome évolue à une vitesse différente –, puis à inverser la polarité du champ. Après une nouvelle durée T , les atomes sont rephasés et l'impulsion de lumière est réémise. La situation est comparable à une course automobile un peu étrange, dans laquelle toutes les voitures doivent repartir dans l'autre sens en milieu de course : les voitures lentes et les voitures rapides arrivent à la ligne de départ en même temps ! On atteint aujourd'hui un temps de stockage de 20 microsecondes et un taux de succès de 45 pour cent. En 2010, le groupe de Nicolas Gisin à l'Université de Genève a utilisé cette technique pour stocker une impulsion très atténuée, dont la couleur correspondait à la longueur d'onde utilisée pour les communications par fibre optique (1,5 micromètre).

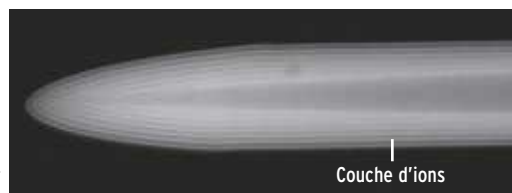
Dans la seconde méthode, nommée AFC pour *Atomic Frequency Comb* (peigne de fréquence atomique), on sculpte le profil d'absorption du milieu de sorte qu'il soit divisé en un grand nombre



Laboratoire Kastler-Brossel



Laboratoire Kastler-Brossel



MPO, Paris Diderot

CES TROIS ENSEMBLES atomiques stockent l'état quantique d'une impulsion lumineuse sous forme d'excitations collectives. Le premier est une vapeur de césium dans une cellule en verre (*en haut*), le deuxième un nuage d'atomes froids dans un piège magnéto-optique (*au milieu*), et le troisième un empilement de couches d'ions strontium refroidis par laser et suspendus électrostatiquement (*en bas*).

de raies fines et équiréparties en fréquence, d'où le nom de peigne. Après «l'enregistrement» de la lumière, les atomes absorbant dans les différentes fréquences se déphasent. Cependant, du fait de la structure périodique, ils se rephasent spontanément après un temps dépendant de l'écart entre les dents du peigne. Pour reprendre l'image des voitures sur un circuit, la course ici ne change pas de sens, mais chaque bolide a une vitesse multiple d'une vitesse donnée : au bout d'un nombre de tours qui dépend de cette vitesse, elles se retrouvent là encore toutes ensemble sur la ligne de départ. Les premiers résultats datent de 2008 à l'Université de Genève. Le groupe de Jean-Louis Le Gouët, de la Faculté d'Orsay, et celui de Stefan Kröll, de l'Université de Lund, en Suède, ont récemment obtenu des taux de succès supérieurs à 20 pour cent. Cette technique est en outre très efficace pour stocker des trains d'impulsions, le record actuel étant de 64 impulsions stockées simultanément !

Ces deux types de mémoires ne sont malheureusement pas « lisibles » à la demande, car l'instant de lecture est prédéterminé ; dans le premier cas, par l'instant où le champ est inversé ; dans le second, par l'écartement entre les raies du peigne.

Pour contourner ce problème et pour atteindre des durées de stockage encore supérieures (plusieurs secondes), on développe des méthodes fondées sur un transfert temporaire du niveau excité vers les sous-niveaux du niveau fondamental, grâce à l'utilisation de lasers auxiliaires bien choisis.

Aucune mémoire solide n'a pour l'instant stocké un photon unique. Mais ces expériences sont en cours et aboutiront vite. Toutefois, le chemin sera encore long pour exploiter pleinement les temps de cohérence de ces systèmes et leur capacité intrinsèque de stockage large bande, tout en diminuant les pertes.

3 mètres

séparent les deux extrémités intriquées du premier segment de répéteur quantique.

À quoi serviront les mémoires quantiques ? Elles constitueront bien sûr les briques des ordinateurs quantiques. Outre des capacités de stockage, elles leur fourniront un dispositif de synchronisation permettant la mise en réserve des résultats intermédiaires lors des calculs. Elles convertiront aussi différents types de qubits : les qubits dit « stationnaires », par exemple des atomes, et des qubits « volants », portés par la lumière et qui assurent les communications entre les différents blocs d'un processeur.

En outre, grâce à ces mémoires, on créera des pistolets à photons uniques, émettant à la demande un photon stocké. Cela constituera un progrès majeur par rapport aux sources non déterministes actuelles. On pourra alors synchroniser deux sources pour effectuer des opérations nécessitant de « faire interférer » des photons uniques, par exemple dans une porte logique quantique. En 2006, le groupe de Jeff Kimble, à l'Institut de technologie de Californie, a ainsi fait interférer deux photons stockés dans deux mémoires. Celles-ci étaient déclenchées en même temps et libéraient simultanément leur photon. Par rapport à des sources non synchronisées, la probabilité que les deux photons se rencontrent était multipliée par 30.

Des communications quantiques intercontinentales

Une des applications principales, et la plus prêt d'aboutir, concerne les communications quantiques. En quoi les mémoires quantiques apporteront-elles un progrès fondamental dans ce domaine ? La distance sur laquelle des transmissions sont possibles est limitée par les pertes dans les fibres optiques, même si celles-ci sont faibles : actuellement, elles valent environ cinq pour cent par kilomètre aux longueurs

d'onde utilisées pour les télécommunications. Quelque 50 pour cent des qubits seraient ainsi perdus après 15 kilomètres, et plus de 99,5 pour cent au bout d'une centaine de kilomètres. Avec une source émettant des qubits à une cadence de dix gigahertz, soit dix milliards de qubits par seconde – une cadence facilement accessible pour des bits classiques, mais qui serait une prouesse expérimentale dans le cas de bits quantiques –, il faudrait une seconde pour réussir à transmettre un qubit sur 500 kilomètres et 300 000 ans pour l'envoyer à 1 000 kilomètres. Le taux de succès décroît ainsi exponentiellement avec la distance et rend tout transfert d'état quantique d'un continent à l'autre irréaliste.

Le même problème se pose pour les communications classiques, qui utilisent aussi des paquets de lumière se propageant dans des fibres optiques, et donc également atténués. Pourtant, ces communications fonctionnent : des milliards de conversations quotidiennes transitent ainsi dans des fibres sur des distances intercontinentales. Comment est-ce possible ? Grâce à des « répéteurs », qui sont régulièrement disposés le long des fibres pour réamplifier la lumière. Malheureusement, cette possibilité disparaît pour un qubit, car l'amplification dégrade l'état quantique.

En 1998, Hans Briegel, de l'Université d'Innsbruck, en Autriche, et ses collègues ont proposé une solution, nommée par analogie répéteur quantique. Leur méthode consiste à exploiter une des propriétés les plus fondamentales et les plus étranges de la physique quantique : l'intrication, c'est-à-dire la possibilité de corrélations entre deux systèmes plus fortes que toute corrélation classique, et ce quelle que soit la distance qui les sépare. Les « répéteurs quantiques » sont une solution pour distribuer une telle intrication à grande distance. Disposer d'états intriqués entre deux sites distants permet alors de transférer un qubit d'un site à l'autre par téléportation quantique (voir *La téléportation quantique*, par A. Zeilinger, page 52) ou de réaliser directement des protocoles de cryptographie (voir *Des secrets réputés inviolables*, par G. Stix, page 88).

On doit donc intriquer deux systèmes A et D , qui n'ont jamais interagi et qui sont séparés par une grande distance L interdisant toute communication directe entre eux. C'est possible en divisant cette distance en segments plus petits $[A, B]$ et $[C, D]$ (B et C sont côte à côte), de sorte que l'atténuation ne soit pas trop grande sur un segment, tout comme pour un répéteur classique. Dans un premier temps, on transmet des signaux lumineux pour intriquer les deux systèmes situés aux extrémités de chaque segment : A est ainsi intriqué avec B , de même que C avec D . Puis chaque segment est « connecté » au segment adjacent : en « lisant » les

Premier segment d'un répéteur quantique

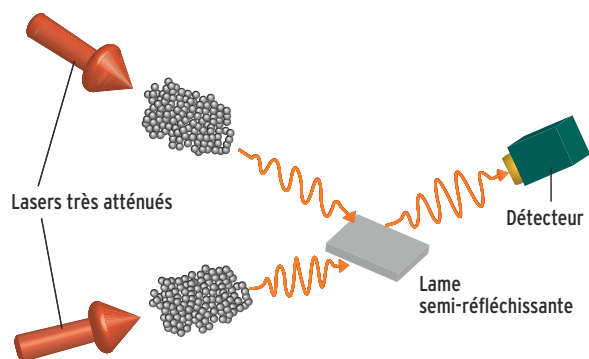
En 2001, Lu-Ming Duan, Mikhail Lukin, Ignacio Cirac et Peter Zoller proposèrent un protocole pour créer la brique des répéteurs quantiques, à savoir deux mémoires intriquées. Ce protocole, nommé DLCZ selon les initiales de ses inventeurs, est fondé sur des ensembles d'atomes à trois niveaux d'énergie : deux sous-niveaux du niveau fondamental et un niveau excité.

Dans un premier temps, considérons un seul ensemble. Les atomes, initialement préparés dans l'un des sous-niveaux, sont excités par un laser ; ils peuvent se désexciter vers le second sous-niveau, ce qui s'accompagne de l'émission de photons. Si le laser est très atténué, on détecte parfois un photon unique dans une direction donnée. On sait alors qu'un atome a changé d'état : un seul parmi les millions mis en jeu, et il est impossible de savoir lequel. Une excitation unique, mais collective, est ainsi créée. Les meilleurs dispositifs actuels la stockent pendant plusieurs dizaines de millisecondes. Cette méthode est probabiliste (contrairement aux mémoires utilisant des cavités optiques ou le phénomène d'EIT, le processus n'est pas commandé par un laser auxiliaire), mais le succès est annoncé : une excitation n'est que rarement préparée, mais du fait de la détection, on sait avec certitude lorsque cela se produit.

Pour intriquer deux ensembles atomiques, on envoie les photons qu'ils émettent sur une lame semi-réfléchissante (voir le schéma ci-dessous). Ils ont alors 50 pour cent de chance d'être réfléchi et 50 pour cent de chance d'être transmis. On attend qu'un photon unique soit détecté, et si les photons issus des deux ensembles ont les mêmes caractéristiques (même polarisation, même allure temporelle, même temps d'arrivée), il est impossible de dire d'où le photon détecté provient : l'excitation est « délocalisée » entre les deux ensembles, qui sont dès lors intriqués.

Cette intrication est « lisible » à la demande. Pour cela, on envoie simultanément sur chaque ensemble atomique un faisceau de lecture, qui entraîne le retour de l'atome vers le niveau fondamental initial et l'émission d'un nouveau photon ; grâce au grand nombre d'atomes des ensembles, cette réémission est directive, de sorte qu'on arrive à capter le photon dans plus de 50 pour cent des cas. On convertit ainsi l'intrication atomique en intrication photonique. Celle-ci met un seul photon en jeu : un état correspondant à une superposition d'absence et de présence d'un photon est créé sur chacun des chemins, et les deux états sont intriqués. En d'autres termes, on convertit une excitation unique délocalisée entre deux ensembles atomiques en un photon unique délocalisé entre deux chemins.

On préfère souvent disposer de deux photons intriqués en polarisation, par exemple pour les protocoles de cryptographie. On les obtient en

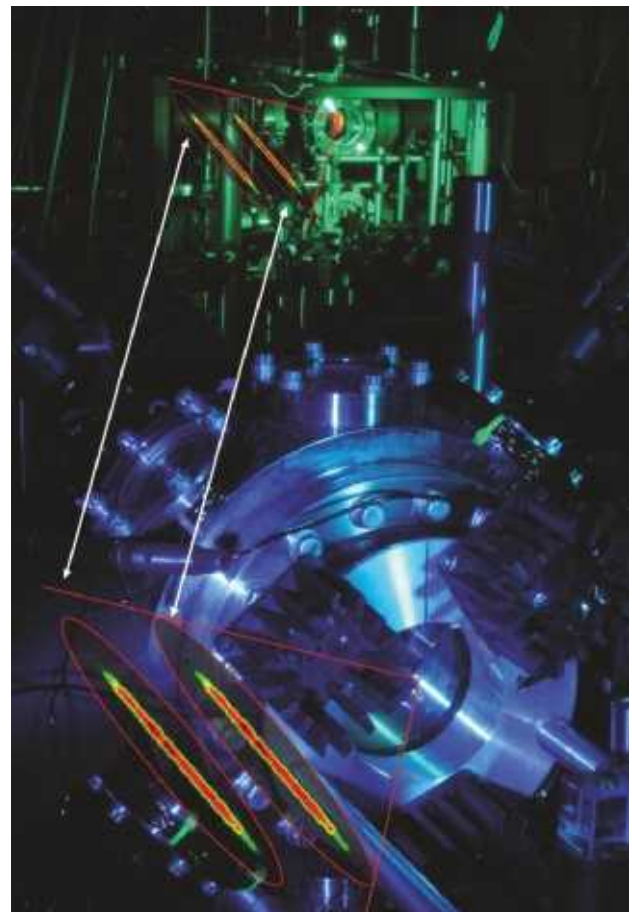


POUR INTRIUER DEUX ENSEMBLES ATOMIQUES, on les excite avec deux faisceaux laser très atténués, et on attend qu'un photon soit détecté. Quand on ne peut pas savoir par quel ensemble il a été émis, les deux ensembles sont intriqués.

utilisant deux paires de mémoires en parallèle et en imposant à celles-ci d'émettre des photons de polarisations orthogonales.

Une telle expérience a été réalisée en 2007 (voir la photographie ci-dessous). Deux chambres à vide (en bleu et en vert) séparées de trois mètres forment les deux extrémités d'un segment de répéteur quantique. Chacune comprend deux ensembles atomiques (dans les ellipses rouges) d'environ 10^5 atomes froids. Les mémoires de chaque paire (reliées par une flèche blanche sur la photographie) sont tout d'abord intriquées selon la méthode décrite précédemment. Un aspect fondamental des répéteurs est alors mis en jeu : la préparation asynchrone des différents éléments. Une fois l'intrication établie pour l'une des paires, elle est stockée, c'est-à-dire que les faisceaux de lecture ne sont pas allumés tout de suite. La préparation se poursuit pour l'autre paire, car il est peu probable qu'elle ait fonctionné simultanément pour les deux. Une fois les deux paires préparées, les quatre mémoires sont lues simultanément. On obtient alors deux photons intriqués en polarisation.

Cette expérience constitue le premier prototype rudimentaire de segment de répéteur quantique, car elle en présente tous les ingrédients : les deux extrémités du segment sont intriquées et susceptibles d'émettre à la demande deux photons intriqués, qui pourront être utilisés pour connecter le segment à son voisin lorsque celui-ci sera également prêt. Une telle connexion n'a cependant pas encore été réussie, et l'extension à un grand nombre de segments reste un défi.



CES DEUX CHAMBRES à vide (en bleu et en vert) forment les deux extrémités d'un segment de répéteur quantique. Chacune comprend une paire de mémoires (dans les ellipses rouges).

systèmes *B* et *C*, en combinant astucieusement les photons émis, et en opérant une mesure adéquate, on intrique les systèmes *A* et *D*. L'intrication se propage ainsi de proche en proche, de façon à s'étendre sur toute la distance *L*.

Cependant, cette stratégie nécessite que toutes ces étapes soient synchrones : pour connecter deux segments, il faut que l'intrication ait été établie aux extrémités de chacun de ces deux segments. Ce processus étant non déterministe, la probabilité que les deux extrémités de tous les segments soient intriquées au bon moment décroît exponentiellement avec le nombre de segments mis en jeu. Autrement dit, le problème initial n'est pas résolu.

Mémoires intriquées

C'est là que les mémoires quantiques entrent en scène : elles stockeraient l'intrication aux extrémités de chaque segment et permettraient donc de procéder aux connexions uniquement lorsque le segment voisin est prêt. Cette architecture présente un taux de succès qui ne décroît plus exponentiellement avec la distance, mais de façon polynomiale, une différence colossale.

Le défi est donc d'intriquer les mémoires. En 2008, J. Kimble le releva en transférant de l'intrication photonique à deux mémoires à ensembles d'atomes fondées sur le phénomène d'EIT. Dans cette expérience, un photon unique est envoyé sur une lame semi-réfléchissante. Il se retrouve alors « délocalisé » entre les deux sorties de la lame, car il est impossible de dire quel chemin il a emprunté. On produit ainsi deux superpositions quantiques intriquées d'absence et de présence d'un photon, une sur chaque chemin. Ces états intriqués sont stockés simultanément dans deux mémoires séparées de un millimètre, ce qui intrique ces deux mémoires. Cette intrication atomique peut être reconvertie en lumière intriquée en allumant le faisceau de contrôle. Un tel dispositif permet de stocker n'importe quel qubit, le 0 et le 1 correspondant aux deux chemins.

Auparavant, en 2005, J. Kimble avait déjà intriqué deux ensembles atomiques grâce à un protocole nommé DLCZ. Le but n'est pas de stocker des qubits, mais d'intriquer directement deux ensembles. On qualifie tout de même ceux-ci de mémoires, car ils « stockent » l'intrication, dans le sens où le protocole permet de conserver l'intrication atomique le temps nécessaire et de la transformer à la demande en intrication photonique. Expérimentalement, le premier segment rudimentaire de répéteur quantique a ainsi été réalisé en 2007 (voir l'encadré de la page 109), mais la connexion de deux segments reste un défi. On tente aujourd'hui de la réaliser par des variantes du protocole DLCZ ; en parallèle, d'importants travaux théoriques sur l'optimisation des architectures de répéteurs sont menés.

D'autres protocoles similaires à DLCZ, fondés sur l'émission de photons indiscernables, ont aussi permis d'intriquer à distance des atomes neutres ou des ions uniques (voir *Calcul quantique avec des ions*, par C. Monroe et D. Wineland, page 94). Ces protocoles ont pour l'instant de faibles taux de succès, car ils ne bénéficient pas de l'effet collectif qu'offre un large ensemble d'atomes. Des cavités optiques placées autour des ions devraient améliorer leur efficacité, même si cela reste un défi expérimental.

Durant les cinq dernières années, les premiers prototypes de mémoire quantique sont ainsi apparus, supportés par des systèmes variés. Tous ces dispositifs spectaculaires et délicats témoignent d'un contrôle de plus en plus poussé de l'état quantique de la lumière et des systèmes atomiques, autorisé par les techniques expérimentales développées depuis 50 ans : pompage optique, spectroscopie, refroidissement d'atomes, maîtrise des sources laser, synthèse de matériaux complexes... Ces prouesses témoignent aussi d'un foisonnement de nouvelles idées et d'une activité théorique intense.

Vers un Internet quantique ?

Nous aurons toutefois encore besoin de nombreuses années d'effort avant qu'elles ne soient exploitables. En effet, les répéteurs quantiques requièrent des mémoires ayant des durées de stockage de plusieurs millisecondes, des efficacités d'au moins 90 pour cent et la capacité d'enregistrer plusieurs impulsions simultanément. Aucune mémoire ne regroupe toutes ces propriétés aujourd'hui. Et les hypothétiques ordinateurs quantiques seront encore plus exigeants.

En outre, les répéteurs, comme beaucoup d'autres dispositifs exploitant l'information quantique, nécessiteront le développement d'une nouvelle génération de détecteurs, capables de compter les photons un par un avec une grande fiabilité (les détecteurs actuels ne savent distinguer qu'entre la présence et l'absence de photons). Déjà, des techniques apparaissent, alliant supraconductivité et nanotechnologies.

L'interconnexion des dispositifs développés donnera naissance aux réseaux quantiques, prémices d'un « Internet quantique », selon l'expression de J. Kimble : l'information quantique y sera stockée et traitée dans des nœuds, entre lesquels elle sera transmise par des canaux. Ces réseaux seront utiles dans des cas pratiques comme les communications à grande distance, mais aussi pour simuler des systèmes complexes et pour mieux comprendre les phénomènes collectifs. L'information quantique est en cela un paradigme passionnant, un dialogue permanent entre physique fondamentale et technologie. ■

articles

- H.J. KIMBLE, *The quantum Internet*, in *Nature*, vol. 453, pp. 1023-1030, 2008.
- T. COUDREAU et P. MILMAN, *Domestiquer l'intrication quantique*, in *Pour la Science*, novembre 2007.
- L. VERSTERGAARD HAU, *La lumière ralentie par des atomes froids*, in *Dossier Pour la Science* n° 53, octobre-décembre 2006.
- L.M. DUAN et al., *Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics*, in *Nature*, vol. 414, pp. 413-418, 2001.