

indispensable dans nombre d'applications informatiques et multimédias, et elle est très loin d'avoir donné tout ce qu'on peut en attendre. Elle permet à la fois de gagner de l'espace pour le stockage des données, et du temps quand on fait voyager les données.

Notons que, comme cela se passe pour un fax, la compression peut se faire par morceaux et dynamiquement, et ne demande donc pas qu'à un moment donné toute l'information à compresser soit présente dans les mémoires des machines concernées : la compression de données est donc susceptible de résoudre à la fois le problème du stockage et le problème de la transmission de très grandes quantités d'information.

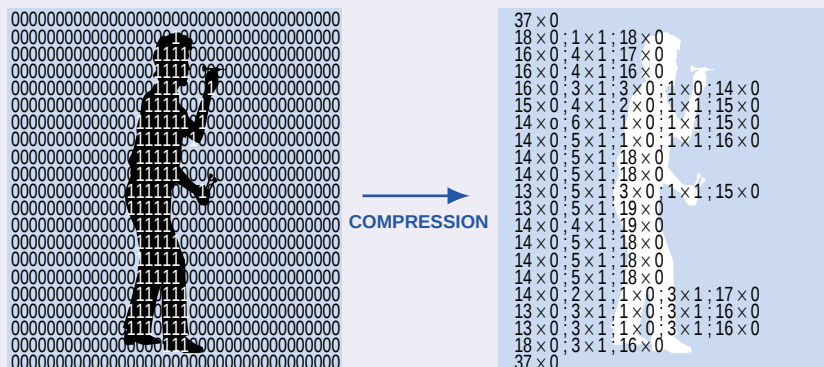
Il est évident que, pour un être humain défini atome par atome, de nombreuses informations sont redondantes et donc sujettes à compression. Chaque cellule, par exemple, contient les mêmes chromosomes (sept milliards d'informations binaires qui, d'une cellule à l'autre, se répètent identiquement). Nul ne sait aujourd'hui ce que les tentatives de compression des données relatives à un être vivant fourniront et de quel facteur le 10^{32} pourra être réduit. Les redondances dans un être vivant sont tellement nombreuses qu'on peut imaginer que 10^{20} bits d'information seraient suffisants (c'est déjà dix milliards de fois plus que le génome humain qui contient déjà tant de choses, et qui, notons-le, est susceptible d'être comprimé lui aussi).

Ainsi, la question du stockage informatique et de la transmission radio d'une description atome par atome d'un être humain n'est pas tranchée. Si elle est impossible, aucun argument définitif n'a été formulé.

Synthèse à partir d'une description atomique

Pour ce qui est de la synthèse à l'arrivée, nous sommes loin de pouvoir replacer un par un des atomes d'objets volumineux. Notons cependant que nous approchons de cette synthèse atome par atome. L'utilisation du microscope à balayage à effet tunnel permet d'analyser des surfaces atome par atome et a déjà conduit à la manipulation d'atomes un par un. Deux physiciens de l'Université Cornell, aux États-Unis, ont ainsi réussi, il y a quelques mois, à lier un atome de fer à une molécule d'oxyde de carbone (CO) pour former une molécule de carbonyle de fer (COFe).

3. Transmettre l'information en la comprimant



Un argument a été utilisé plusieurs fois pour démontrer définitivement l'impossibilité de la téléportation par analyse-transmission-reconstitution atome par atome : la quantité d'information à collecter et à transmettre (évaluée à 10^{32} bits pour un être humain) dépassera toujours les capacités de traitement de nos machines, cela même dans un avenir lointain.

Cet argument oublie que la compression de données réduirait considérablement ce 10^{32} . La compression de données consiste à réunir les données de même nature, ce qui diminue la quantité d'information à transmettre. Même si, aujourd'hui, il est difficile d'indiquer quel serait le facteur de compression que nous pourrions obtenir sur des données de ce type, il est certain que ce taux de compression sera considérable. Le nombre de types de cellules humaines est assez limité et, dans une même catégorie, deux cellules se ressemblent énormément, ce qui permet un gain considérable d'information. Bien d'autres redondances, comme celle des génomes identiques dans toutes les cellules d'un même organisme, créent des opportunités de compression.

Nul ne sait jusqu'où nous irons dans cette voie et s'il y a des impossibles définitifs en matière de synthèse atome par atome, mais, comme pour l'analyse et la transmission, il n'est pas établi qu'on rencontrera là un obstacle fatal au projet de téléportation.

L'impossibilité de la téléportation d'objets complexes par analyse-transmission-recomposition atome par atome n'a donc pas été démontrée, et rien n'interdit de rêver. Notons que, contrairement à la téléportation par raccourci topologique, ce second type de téléportation :

- ne permet pas de dépasser la vitesse de la lumière ;
- s'accompagne toujours de la possibilité de dupliquer les objets téléportés ; en effet, même si la phase d'analyse les détruit (c'est peut-être inévitable), une fois l'information (éventuellement comprimée) obtenue, rien n'interdira de l'utiliser plusieurs fois pour reconstituer plusieurs fois l'objet ou le sujet télétransporté.

Nous laisserons aux générations futures le soin de résoudre les innombrables problèmes délicats que pourraient poser de telles duplications humaines (lequel des deux Monsieur

X reste l'époux de Madame X? lequel doit payer les impôts? etc.).

Et l'âme dans tout cela ?

Une objection d'une autre nature concerne la téléportation des humains. L'état mental d'un être humain n'est peut-être pas reproduit, même lorsque l'on met en place des atomes selon un plan exactement conforme à celui de son cerveau et de son système nerveux, analysés au point de départ. Des ondes particulières, par exemple celles que considère la mécanique quantique, doivent peut-être être reproduites pour que l'état mental le soit. Autrement dit, même en reconstituant atome par atome un être humain, peut-être n'obtiendrons-nous qu'une masse amorphe dépourvue de vie et de pensée. L'analyse, première phase de la téléportation, devrait aller voir de plus près dans les objets qu'elle veut déplacer pour les reconstituer entièrement à l'arrivée.

Dès que l'on considère des objets quantiques, même des particules, l'impossibilité de l'analyse est une loi établie : l'état de polarisation d'un photon inconnu, par exemple, ne peut pas être mesuré entièrement. Pire, si vous

tentez de lire la polarisation d'un photon, vous n'obtiendrez qu'une information partielle, votre mesure ayant par ailleurs l'effet de détruire définitivement l'état quantique initial, qu'il sera alors totalement impossible de connaître.

Le schéma analyse-transmission-reconstruction ne peut pas être envisagé si l'on prend en compte l'état quantique des photons, des atomes ou objets qu'on cherche à téléporter. Si l'état mental d'un cerveau demande une précision quantique, alors la situation est définitivement compromise, et aucun appareil de téléportation n'existera jamais ; ceux fondés sur une recombinaison atome par atome ayant le malheureux effet de ne reconstruire qu'un fantôme inerte de l'individu placé dans la machine d'entrée.

Face à cet argument, certaines réponses sont possibles.

D'abord, même si, pour téléporter un humain, il faut aussi téléporter les états quantiques du cerveau, états par principe inconnaissables, cela n'interdit pourtant pas d'en envisager la téléportation. En effet, Charles Bennett, Gilles Brassard et quelques autres physiciens et informaticiens spécialistes de l'information quantique ont proposé en 1993 un schéma de téléportation d'un état quantique inconnu par utilisation d'une paire de photons corrélés. Leur méthode permet, sans en prendre connaissance (ce qui de toute façon est impossible), de téléporter des états quantiques (voir l'article qui suit sur la téléportation quantique).

Les propriétés de cette téléportation quantique, que plusieurs équipes ont su réaliser expérimentalement il y a deux ans, sont :

- l'état quantique est nécessairement détruit en son point de départ ;
- l'état quantique téléporté est toujours resté inconnu ; ni Jean ni Claude n'ont jamais disposé d'information suffisante pour l'identifier ;

- le voyage s'est fait, au mieux, à la vitesse de la lumière, car Jean a dû transmettre à Claude le résultat de sa manipulation par un canal classique.

Cette théorie ouvre la voie à la téléportation d'états quantiques qui, si on réussit à aller plus loin, pourrait conduire à la téléportation de cerveaux humains entiers, avec non seulement un niveau de détail atomique, mais quantique.

Même si vous pensez que la description atome par atome de votre cerveau n'est pas suffisante pour capter

la totalité de votre identité mentale et si vous soutenez que, pour télétransporter un cerveau, il faut aussi reproduire à l'arrivée l'ensemble des états quantiques du cerveau (atomes, molécules, groupes de molécules), rien n'indique qu'on ne pourra pas y parvenir.

Si cette téléportation quantique est mise en œuvre, le problème de la duplication ne se posera pas, car elle est impossible : il n'y aura jamais duplication des humains transportés, ce qui évitera les délicats problèmes juridiques, éthiques et fiscaux évoqués plus haut.

Samuel Braunstein, face à la question de savoir si, pour décrire un cerveau, on peut s'arrêter au niveau atomique ou s'il faut prendre en compte la nature quantique du cerveau, évoque un argument intéressant. Des gens vont quotidiennement dans des hôpitaux subir des scanners à résonance magnétique nucléaire. Or ces examens altèrent les états quantiques d'un très grand nombre d'atomes des personnes qui les subissent. Cela ne semble avoir aucun effet ni sur leur état mental, ni sur leur état de santé et conduit donc à l'idée que le fonctionnement d'un cerveau pourrait bien être décrit (et téléporté) sans qu'on ait à se préoccuper des états quantiques de ses composants. Le niveau atomique serait en définitive suffisant. L'argument de Braunstein renforce notre optimisme.

L'esprit algorithmique

Certains chercheurs en intelligence artificielle vont bien plus loin et pensent – sans rien démontrer et en profond désaccord avec d'autres spécialistes des sciences cognitives – que le fonctionnement de l'esprit humain pourrait être simulé sans qu'on ait besoin de descendre au niveau atomique.

L'esprit d'une personne serait équivalent à un ensemble de programmes informatiques, et, une fois qu'on les aurait captés, la téléportation deviendrait facile, puisqu'il y aurait juste à communiquer les programmes et à les replacer dans un ordinateur réceptacle (équipés de moyens de déplacement et d'organes de vision sans doute) pour que l'esprit se remette à fonctionner. Cette fois sans doute, aucun problème de compression ne se poserait, car avec 10^{12} bits de programmes on peut imaginer que l'essentiel d'un esprit humain serait capté.

Ce nombre de 10^{12} apparaît faible à certains. Il me semble pourtant déjà

énorme, car il faut réaliser que cela représente l'équivalent d'une bibliothèque de cent mille livres de deux cents pages : personnellement, je serais content de savoir que ma description algorithmique nécessite dix mille livres de deux cents pages (10^{11} bits d'information), ou même mille livres de deux cents pages (10^{10} bits d'information).

Bien sûr, rien aujourd'hui n'indique que nous réussirons à saisir les définitions algorithmiques des êtres humains pour les téléporter et les dupliquer dans les P.C. du futur. On ne sait même pas, bien sûr, si vraiment il existe quelque chose de cette nature : c'est là un débat philosophique qui risque d'occuper de nombreux philosophes encore durant le troisième millénaire.

Tout reste possible !

Parmi les quatre voies possibles pour construire un système de téléportation : téléportation par raccourcis topologiques ; téléportation par communication de la description atomique ; téléportation par communication de la description quantique ; téléportation par communication de la description algorithmique, aucune ne semble entièrement impossible en l'état actuel des connaissances (même si aucune n'est prouvée réalisable !). Nous pouvons donc rêver prendre dans quelque temps un bain sur une plage des Caraïbes dès la sortie du bureau, le vendredi soir.

S. BRAUNSTEIN, *A Fun Talk on Teleportation*.

<http://www.sees.bangor.ac.uk/~schmuel/tport.html>

C. CRÉPEAU, *Téléportation quantique*.

<http://www.cs.mcgill.ca/~crepeau/tele.html>

C.H. BENNETT, G. BRASSARD, C. CRÉPEAU, R. JOZSA, A. PERES et W. WOOTTERS, *Teleporting an Unknown Quantum State by Dual Classical and EPR Channels*, in *Physical Review Letter*, n° 70, pp. 1895-1898, 1993.

J.-P. DELAHAYE, *Les lois nouvelles de l'informatique quantique*, in *Pour La Science*, pp. 66-72, août 1998.

L.M. KRAUSS, *La physique de Star Trek ou Comment visiter l'univers en pyjama*, Bayard Éditions, Paris, 1998 (traduction de *The Physics of Star Trek*, Basic Book, 1995).

T. SIEGFRIED, *The Bit and the Pendulum : From Quantum Computing to M Theory, The Physics of Information*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1999.

La téléportation quantique

ANTON ZEILINGER

La possibilité de transporter instantanément un objet d'un endroit à un autre, rêvée par la science-fiction, est aujourd'hui réalité... au moins pour les particules lumineuses.

Les œuvres de science-fiction abondent en variantes d'une scène type : un groupe d'intrépides explorateurs entre dans un silo fourmillant d'appareils électroniques ; après quelques effets spéciaux sonores et lumineux, nos héros disparaissent et réapparaissent à la surface d'une lointaine planète. Ce phénomène est la téléportation, autrement dit la possibilité de voyager d'un endroit à un autre sans devoir ingérer les rations alimentaires des compagnies aériennes. Bien que la téléportation de gros objets ou de personnes reste un rêve, la téléportation quantique est au laboratoire une réalité pour les particules lumineuses, ou photons.

La téléportation quantique met en jeu certaines des caractéristiques remarquables de la mécanique quantique, branche de la physique développée dans le premier quart du XX^e siècle pour expliquer le comportement de la matière à l'échelle atomique. Dès sa création, les physiciens ont compris que les règles de la mécanique quantique conduisaient à des phénomènes nouveaux dont certains heurtent le sens commun. Grâce aux avancées technologiques du dernier quart du XX^e siècle, les chercheurs ont réalisé de nombreuses expériences qui prouvent les étrangetés de la mécanique quantique : les chercheurs exploitent ces caractéristiques pour concevoir ce qui semblait impossible, par exemple la téléportation quantique.

Dans les scénarios de science-fiction, la téléportation permet des déplacements instantanés et viole donc la

limite de vitesse imposée par la théorie de la relativité d'Albert Einstein, qui stipule que rien ne peut voyager plus vite que la lumière.

Les modalités de la téléportation diffèrent, mais l'idée est en général celle qui a été exposée dans l'article précédent. Un dispositif scanne l'objet initial. Un transmetteur envoie l'information à la station de réception qui l'utilise pour réaliser une copie conforme de l'original. Dans certains cas, la matière qui compose l'original est également transportée jusqu'à la station de réception, par exemple sous forme d'«énergie» ; dans d'autres avatars du principe, la réplique est constituée d'atomes et de molécules présents dans la station de réception.

A priori, la mécanique quantique semble interdire un tel système de téléportation. Le principe d'incertitude d'Heisenberg énonce qu'on ne peut connaître simultanément la position d'un objet et sa quantité de mouvement. Par conséquent, on ne peut pas faire de balayage parfait de l'objet à téléporter ; la position ou la vitesse de chaque atome et électron seraient susceptibles d'être fausses. Le principe d'incertitude d'Heisenberg s'applique également à d'autres paires de mesures physiques : il est par conséquent impossible de mesurer avec certitude l'état quantique total d'un objet, alors que ces mesures seraient nécessaires pour décrire l'original avec l'exactitude voulue (dans *Star Trek*, le «Compensateur d'Heisenberg» résout miraculeusement ce problème).

En 1993, une équipe de physiciens a renversé cette idée communément admise, en utilisant la mécanique quantique elle-même pour faire de la téléportation. Les chercheurs de cette équipe (Charles Bennett, de la Société IBM ; Gilles Brassard, Claude Crépeau et Richard Josza, de l'Université de Montréal ; Asher Peres, de l'Institut de technologie Technion, en Israël ; et William Wootters, de Williams College) ont découvert qu'un des aspects fondamentaux de la mécanique quantique, l'intrication, permettait, sans le violer, de contourner les limites imposées par le principe d'incertitude d'Heisenberg.

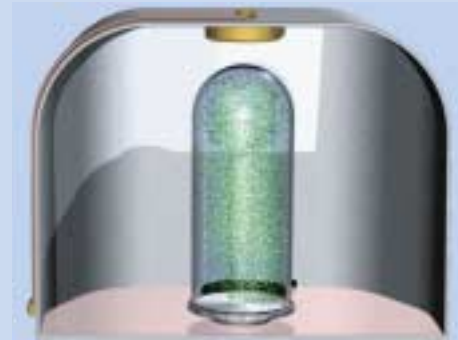
L'intrication

Nous sommes en 2100. Un de vos amis physicien, qui aime animer les soirées avec des tours de passe-passe, vous apporte une série de paires de dés. Il vous demande de les jeter une paire après l'autre. Vous gardez un souvenir cuisant du mini-trou noir de Noël dernier, et vous manipulez la première paire avec une extrême précaution. Finalement, vous vous risquez à la lancer, et vous obtenez un double 3. Vous jetez alors la deuxième paire : double 6. Enfin la suivante : double 1. Toujours des doubles.

Les dés de cette fable se comportent comme des particules quantiques «intriquées». Chaque dé pris séparément est aléatoire et non truqué, mais son double intriqué donne toujours le même résultat que le premier. Un tel comportement a été mis en évidence



b



La téléportation commencerait ainsi : la personne se trouve dans une enceinte à scanner (a), à côté d'une enceinte identique remplie d'une masse égale de particules (en vert). Les particules auxiliaires ont été au préalable intriquées quantiquement avec leurs partenaires situées dans une lointaine station de réception (b).



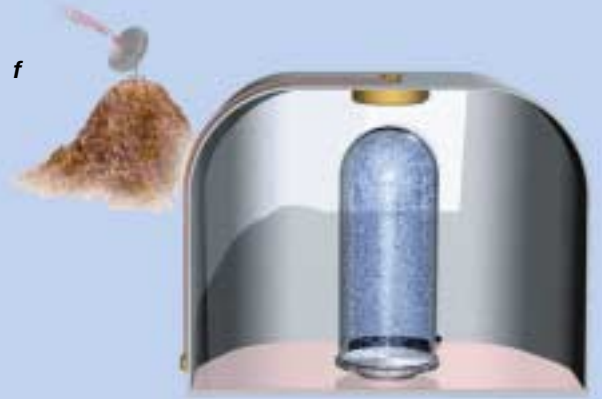
d



Une mesure conjointe des particules auxiliaires et de toutes les particules qui composent la personne (c) les place dans un état quantique aléatoire et produit une masse de données aléatoires (mais significatives) de deux éléments binaires par état élémentaire. La mesure détermine instantanément les états quantiques des particules associées situées à grande distance (d).



f



Les données de la mesure sont envoyées à la lointaine station de réception par des moyens conventionnels (e). La durée de cette étape est limitée par la vitesse de la lumière (f), ce qui rend impossible la téléportation à une vitesse supérieure.

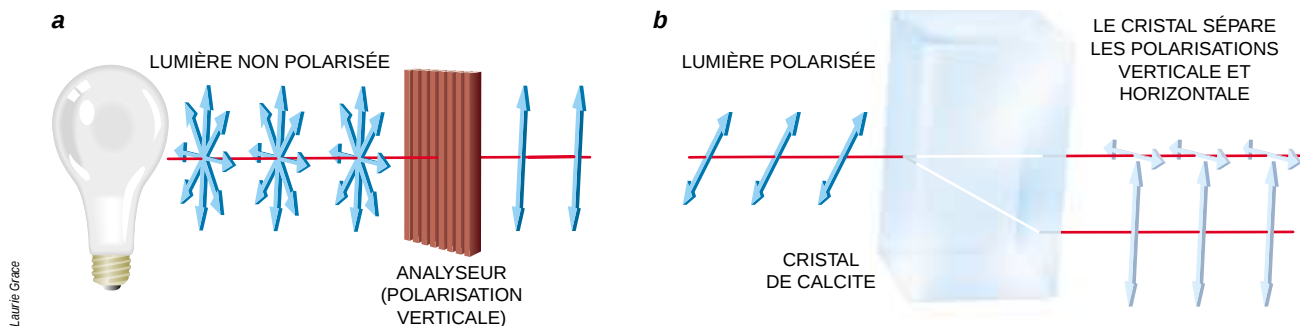


h



Le récepteur du message recrée le voyageur avec une exactitude qui va jusqu'à l'état quantique de chaque particule (g), en ajustant l'état des particules associées grâce aux données de mesures aléatoires en provenance de la station de scanning.

David Fierstein



1. LA LUMIÈRE EST À LA FOIS UNE PARTICULE, LE PHOTON, et une onde électromagnétique. La direction de vibration du champ électrique de l'onde électromagnétique est dénommée sa polarisation. La lumière non polarisée est constituée de photons dont le champ électrique, perpendiculaire à la direction de propagation, est aléatoire (a). Dans la lumière polarisée, les oscillations du champ électrique (flèches) sont alignées. Un cristal de calcite (b) divise un faisceau lumineux en deux faisceaux parallèles ; dans un des fais-

ceaux la polarisation est parallèle à l'axe du cristal, dans l'autre faisceau la polarisation est perpendiculaire à cet axe. Les photons entrant avec une polarisation intermédiaire sont dans une superposition quantique des deux polarisations ; chacun de ces photons peut être détecté dans l'un ou l'autre faisceau de photons, la probabilité de détection dépendant de l'angle définissant la polarisation. Comme elle fait intervenir des probabilités, la polarisation d'un photon unique dans un état intermédiaire ne peut être connue avec certitude.

pour des particules intriquées réelles : des paires d'atomes, d'ions ou de photons tiennent lieu de dés, et les différentes faces de chaque dé sont remplacées par des propriétés telles que la polarisation.

Prenons deux photons dont les polarisations sont liées de sorte qu'elles ne sont plus aléatoires, mais identiques. Les faisceaux lumineux, de même que les photons isolés, sont constitués des oscillations de champs électromagnétiques, et la polarisation correspond à la direction d'oscillation du champ électrique (voir la figure 1). Supposons que Claude soit en possession d'un des photons intriqués et que Jean ait son photon partenaire. Quand Claude mesure la polarisation de son photon pour déterminer si elle est horizontale ou verticale, la probabilité de chaque événement est de 50 pour cent. Pour le photon de Jean, la probabilité est la même, mais l'intrication garantit que le résultat de Jean sera le même que celui de Claude. Dès que Claude obtient le résultat «polarisation horizontale», par exemple, elle peut être sûre que la polarisation du photon de Jean sera également horizontale. Avant que Claude n'effectue sa mesure, les deux photons n'ont pas de polarisation individuelle ; l'état intriqué spécifie seulement qu'une mesure trouvera que les deux polarisations sont égales.

Cette propriété est fascinante, car la distance qui sépare Claude et Jean n'entre pas en ligne de compte ; la propriété est vérifiée tant que l'intrication de leurs photons est préservée. Claude peut se trouver sur Alpha du Centaure et Jean sur la Terre, leurs résultats concorderont quand ils les

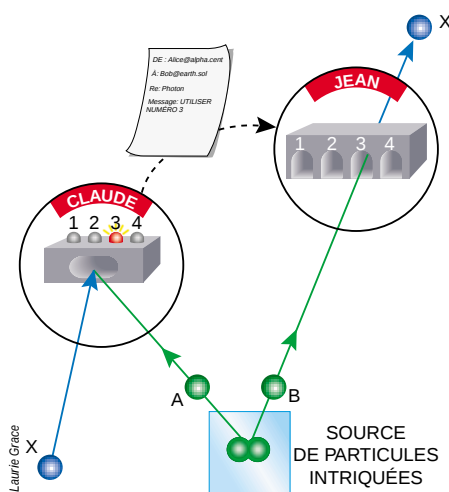
compareront. Tout se passe comme si la mesure du photon de Claude influait magiquement sur le photon de Jean, et vice versa.

Vous vous demandez peut-être si l'on peut expliquer l'intrication en imaginant que des instructions sont inscrites dans chaque particule. Peut-être, en intriquant les deux particules, synchronisons-nous un mécanisme caché qui détermine les résultats qu'elles donneront au moment de la mesure. Cela expliquerait l'influence

mystérieuse de la mesure de Claude sur la particule de Jean. Dans les années 1960, le physicien irlandais John Bell a démontré un théorème qui établit que, dans certaines situations, ces explications de l'intrication quantique par des «variables cachées» produiraient des résultats différents de ceux qui avaient été prédits par la mécanique quantique classique. Les expériences ont confirmé la validité de la mécanique quantique et exclu cette possibilité de variables cachées.

Le physicien autrichien Erwin Schrödinger, l'un des cofondateurs de la mécanique quantique, considérait l'intrication comme l'«aspect essentiel» de la physique quantique. L'intrication est le sujet du paradoxe EPR, acronyme des physiciens Albert Einstein, Boris Podolski et Nathan Rosen, qui analysèrent en 1935 les effets à grande distance de l'intrication. Einstein en parlait comme d'une «action à distance étrange à vous faire froid dans le dos». Si l'on tentait d'expliquer les résultats du paradoxe par des signaux entre les photons, ces signaux devraient se déplacer plus vite que la lumière... Hérésie!

Malheureusement pour les télécommunications, heureusement pour la physique, les règles quantiques s'opposent à cette violation du droit relativiste. La mesure locale d'un photon produit un résultat complètement aléatoire et ne porte donc aucune information provenant du photon éloigné. Elle vous indique seulement les probabilités de chaque résultat possible de mesure à distance. Néanmoins, on peut utiliser astucieusement l'intrication pour faire de la téléportation quantique.



2. DANS LA TÉLÉPORTATION quantique idéale, l'expéditeur, Claude, et le destinataire, Jean, ont chacun un photon d'une paire de photons intriqués A et B (en vert). Claude a aussi une particule X, dans un état quantique inconnu (en bleu). Claude effectue une mesure d'états de Bell des particules A et X : quatre résultats sont possibles. Elle informe Jean de son résultat par des moyens ordinaires. En fonction du résultat obtenu par Claude, Jean laisse sa particule telle quelle (1) ou la place par rotation dans un des états 2, 3 ou 4. Dans tous les cas, Jean obtient une copie exacte de la particule X d'origine.

Les photons intriqués au travail

Claude et Jean anticipent leur besoin futur de téléporter un photon et se munissent chacun d'un photon d'une paire intriquée *AB*; Claude prend le photon *A* et Jean le photon *B*. Chacun conserve soigneusement son photon sans mesurer son état, sans troubler le fragile état d'intrication (voir la figure 3).

Arrive le moment où Claude souhaite téléporter vers Jean un troisième photon, que nous dénommerons le photon *X*. Claude ne sait pas dans quel état ce photon *X* se trouve, mais elle veut que le photon obtenu par Jean ait la même polarisation. Elle ne peut pas se contenter de mesurer la polarisation du photon *X* et d'envoyer le résultat à Jean, car, en général le résultat de la mesure ne sera pas identique à l'état initial du photon. Par exemple le photon peut être polarisé selon une direction oblique inconnue. Si Claude dispose son cristal d'analyse avec des axes horizontaux et verticaux (voir la figure 1), elle obtiendra la réponse oui ou non à la question «le photon après l'analyseur a-t-il une polarisation horizontale?», mais elle ne sera pas capable de remonter à la direction oblique inconnue. Cette impossibilité est une conséquence directe du principe d'Heisenberg.

Au lieu de cela, afin de téléporter le photon *X*, Claude le mesure «conjointement» au photon *A*, sans déterminer

leur polarisation individuelle. Par exemple, Claude détermine que leurs polarisations sont «perpendiculaires» (mais elle ignore toujours les polarisations absolues de l'un comme de l'autre). La mesure conjointe du photon *A* et du photon *X* est dénommée mesure de l'état de Bell. La mesure de Claude engendre un effet subtil : elle modifie le photon de Jean de telle sorte qu'il soit corrélé avec une combinaison du résultat de sa mesure et de l'état initial du photon *X*. Le photon de Jean est maintenant porteur de l'état du photon *X* de Claude, soit exactement, soit modifié de façon élémentaire.

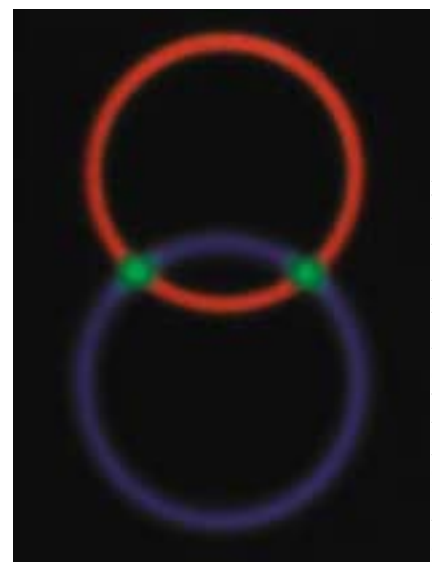
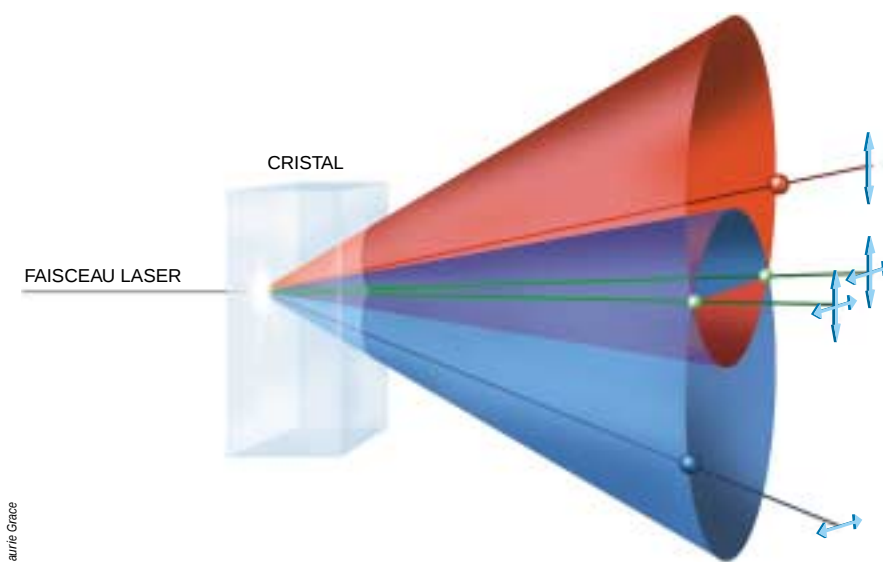
Pour achever la téléportation, Claude doit faire parvenir à Jean un message par des moyens conventionnels comme un appel téléphonique ou une note écrite. Après avoir reçu ce message, Jean peut, si nécessaire, transformer son photon *B* de telle sorte qu'il soit une copie conforme du photon *X* initial. La transformation que Jean devra lui faire subir dépend du résultat de la mesure de Claude. Typiquement, une des transformations que Jean devra éventuellement faire subir à son photon est une rotation de sa polarisation de 90 degrés, ce qui peut être obtenu en lui faisant traverser un cristal ayant les propriétés optiques adéquates.

Il y a quatre possibilités (quatre états de Bell) correspondant aux quatre relations quantiques possibles entre les photons *A* et *X*. Deux de ces relations sont «totalement» parallèles ou perpendi-

culaires, ce qui veut dire que la relation est valable quelle que soit la direction selon laquelle on effectue les mesures de polarisation. Pour les deux autres relations, le résultat (parallèle ou perpendiculaire) est différent selon que la polarisation des photons est mesurée selon la verticale ou l'horizontale, ou l'une des deux diagonales à 45 degrés.

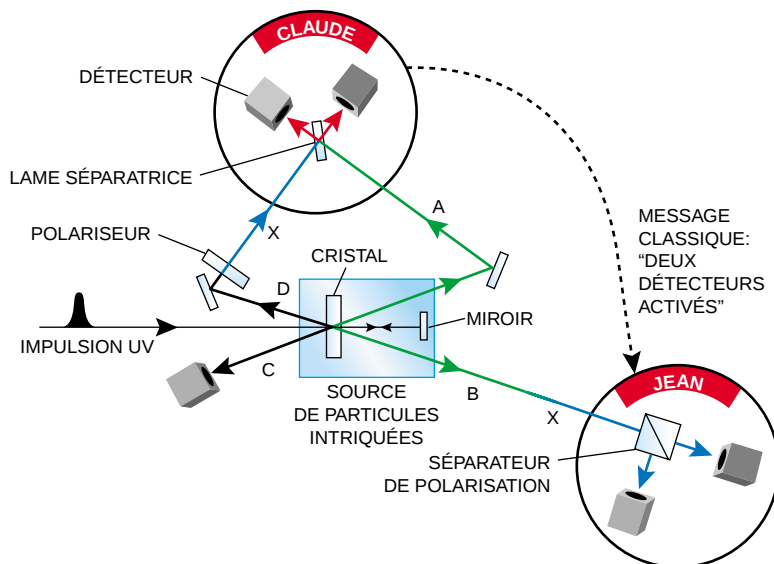
Le résultat obtenu par Claude parmi les quatre résultats possibles est complètement aléatoire et indépendant de l'état d'origine du photon *X* ; Jean ne sait donc pas quel traitement faire subir à son photon tant qu'il ne connaît pas le résultat de la mesure de Claude. Voilà donc pourquoi, afin de finaliser la téléportation, Claude doit envoyer un message ordinaire à Jean. On peut dire que le photon de Jean contient instantanément toute l'information contenue dans l'original de Claude, transportée jusqu'à lui par la mécanique quantique, mais, pour être capable de lire cette information, Jean doit attendre une autre information de type classique, qui est constituée de deux éléments ne pouvant se déplacer plus vite que la lumière.

Les sceptiques peuvent argumenter que seul l'état de polarisation du photon ou, plus généralement, son état quantique, est téléporté, et non pas le photon «lui-même». Mais, étant donné que l'état quantique d'un photon le définit de manière univoque, le fait de téléporter son état est parfaitement équivalent à la téléportation de la particule elle-même.



3. LES PAIRES DE PHOTONS INTRIKUÉS sont créées par un faisceau laser qui traverse un cristal (le borate de baryum, par exemple). Le cristal convertit un photon ultraviolet en deux photons de moindre énergie, l'un polarisé verticalement (sur le cône rouge), l'autre horizontalement (sur le cône bleu). Si les photons se propa-

gent le long de l'intersection des cônes (en vert), il est impossible de connaître *a priori* la polarisation de chacun, mais ils sont intriqués. La mesure de la polarisation de l'un détermine celle de l'autre, qui lui est perpendiculaire. L'image à droite est une photographie (en fausses couleurs) de la lumière obtenue par fluorescence.



Laurie Grace

4. L'EXPÉRIENCE D'INNSBRUCK utilise une impulsion de lumière laser ultraviolette. En se propageant dans le cristal, cette impulsion produit la paire de photons intriqués A et B, qui vont respectivement vers Claude et vers Jean. L'impulsion, réfléchiée par un miroir, retransverse le cristal et crée deux autres photons, C et D. Un polariseur impose au photon D un état donné, X. Le photon C est détecté, ce qui confirme que le photon X a été envoyé à Claude. Claude combine les photons A et X avec une lame séparatrice de faisceau (voir la figure 5). Si elle détecte un photon dans chaque détecteur (comme c'est le cas 25 pour cent du temps), la téléportation est un succès, et par l'intermédiaire d'un message classique elle en avertit Jean, qui utilise un séparateur de polarisation pour vérifier que son photon a acquis la polarisation de X.

Pas de clonage

Notons que la téléportation ne donne pas deux exemplaires du photon X. Nous pouvons copier une information classique autant de fois que nous le souhaitons, mais la copie de l'information quantique est impossible ; on doit ce résultat, le «théorème de non-clonage», à William Wootters et Wojciech Zurek du Laboratoire de Los Alamos, qui ont prouvé, en 1982, que si l'on pouvait cloner un état quantique, on pourrait utiliser les clones

pour violer le principe d'Heisenberg. La mesure de Claude intrique son photon A avec le photon X, et le photon X «oublie» en quelque sorte son état d'origine. En tant que composante d'une paire intriquée, il n'a pas d'état de polarisation propre. Ainsi, l'état original du photon X n'appartient plus au domaine de Claude.

De plus, l'état du photon X est transféré à Jean sans que ni lui ni Claude sache quel est cet état. Le résultat de la mesure de Claude, complètement aléatoire, ne les renseigne en rien sur

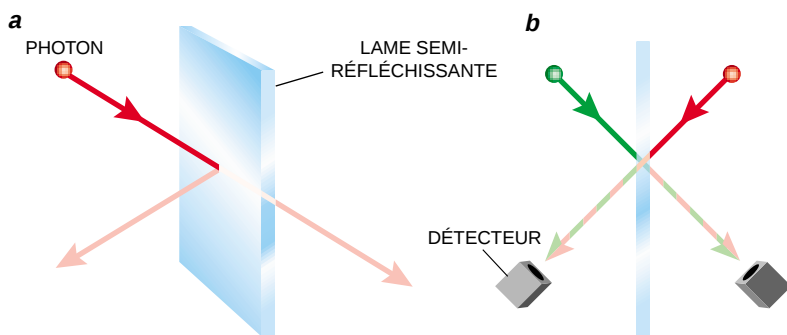
cet état. C'est ainsi que cette procédure contourne le principe d'incertitude d'Heisenberg, qui empêche de déterminer l'état quantique complet d'une particule, mais qui n'interdit pas de téléporter cet état, à condition qu'on ne tente pas de le connaître!

Par ailleurs, il n'y a pas de déplacement matériel de l'information quantique téléportée entre Claude et Jean. La seule chose qui se déplace matériellement est le message concernant le résultat de la mesure de Claude, qui indique à Jean quelle modification apporter à son photon, mais ne contient aucune information sur l'état du photon X lui-même.

Une fois sur quatre, Claude a de la chance en faisant sa mesure (la relation entre A et X est identique à l'intrication originale de A et B), et le photon de Jean devient immédiatement la copie conforme de l'original de Claude. On pourrait alors se dire que l'information a voyagé instantanément de Claude à Jean, dépassant la vitesse limite de la lumière. Mais cette particularité ne peut servir à envoyer de l'information, car Jean n'a aucun moyen de savoir que son photon est déjà une copie conforme. Ce n'est qu'en apprenant le résultat de la mesure d'état de Bell par Claude, transmis jusqu'à lui par des moyens classiques, qu'il peut exploiter l'information de l'état quantique téléporté. S'il essaie de deviner dans quels cas la téléportation a marché instantanément, il se trompera dans 75 pour cent des cas, et quand il aura deviné juste, il ne le saura pas. S'il utilise ces photons sur la base de ses prédictions, les résultats seront les mêmes que s'il avait pris des photons de polarisation aléatoire. Einstein avait raison : même l'étrange action instantanée à distance de la mécanique quantique est impossible à envoyer de l'information exploitable plus vite que la lumière.

Construction d'un téléporteur

Nous pourrions penser que le schéma théorique que nous venons d'examiner nous permettrait de construire aisément un téléporteur ; il n'en est rien, le défi expérimental est immense. La production de paires de photons intriqués ne présente plus de difficultés depuis une dizaine d'années, mais on n'avait jamais auparavant effectué la mesure d'état de Bell sur deux photons vers des détecteurs indépendants.



Laurie Grace

5. LA LAME SEMI-RÉFLÉCHISSANTE (a) réfléchit la moitié de la lumière qui l'atteint et transmet l'autre moitié. Un photon donné a une chance sur deux d'être réfléchi, et une chance sur deux d'être transmis. Si deux photons identiques arrivent sur la séparatrice de faisceau en même temps, un de chaque côté (b), les parties réfléchies et transmises interfèrent, et les photons perdent leur caractère distinct. On détecte alors un photon dans chaque détecteur 25 pour cent du temps, mais il est alors impossible de dire si les deux photons ont été transmis ou s'ils ont tous deux été réfléchis. Seule une propriété relative (ils sont allés vers des détecteurs différents) est mesurée.

Un dispositif efficace (voir la figure 3) pour produire des paires de photons intriqués est un oscillateur paramétrique optique : en traversant un cristal spécifique, un photon unique engendre deux photons qui sont intriqués (ici, dont les polarisations sont perpendiculaires).

Il est beaucoup plus difficile d'intriquer deux photons indépendants déjà existants, comme il est nécessaire de le faire dans un analyseur d'état de Bell, car cela implique que les deux photons (A et X) perdent leurs caractéristiques propres. En 1997, notre groupe de recherche (Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl et Harald Weinfurter), travaillant à l'Université d'Innsbruck, a résolu ce problème dans le cadre de notre expérience de téléportation (voir la figure 4). Dans notre expérience, une brève impulsion de lumière ultraviolette produite par un laser traverse un cristal et crée les photons intriqués A et B. Le premier se propage vers Claude, et le second vers Jean. Un miroir renvoie l'impulsion ultraviolette à travers le cristal, où elle crée une autre paire de photons, C et D (ceux-ci sont également intriqués, mais nous

n'utilisons pas leur intrication). Le photon C atteint un détecteur, qui nous avertit que son partenaire D est prêt à être téléporté. Le photon D passe à travers un polariseur, que nous pouvons orienter de toutes les manières imaginables. Le photon polarisé obtenu est notre photon X, celui que nous voulons téléporter, et il est envoyé vers Claude. Après avoir traversé le polariseur, X est un photon indépendant, il n'est plus intriqué. Et même si nous savons quelle est sa polarisation, puisque nous avons réglé le polariseur, Claude, elle, ne la connaît pas. Nous réutilisons la même impulsion ultraviolette pour nous assurer que Claude a les photons A et X en même temps.

Nous devons alors mesurer des états de Bell : pour cela, Claude combine ses deux photons (A et X) en utilisant un miroir semi-réfléchissant, c'est-à-dire un dispositif ayant une couche très mince et translucide d'argenture, de telle sorte qu'un photon qui la frappe a 50 pour cent de chances de la traverser et 50 pour cent de chances d'être réfléchi. En termes quantiques, le photon est une superposition de ces deux possibilités (voir la figure 5).

Supposons maintenant que les deux photons qui arrivent sur le miroir viennent de directions opposées, leurs trajectoires étant alignées de façon que le rayon réfléchi de l'un corresponde au rayon transmis de l'autre, et *vice versa*. Un détecteur attend au bout de chaque rayon. D'ordinaire, les deux photons sont réfléchis indépendamment, et ils ont une chance sur deux d'arriver dans des détecteurs différents. Cependant, si les photons sont impossibles à distinguer et atteignent le miroir au même instant, ils interfèrent quantiquement : certaines configurations s'annulent et ne se réalisent pas, tandis que d'autres se renforcent et sont plus fréquentes. Quand les photons interfèrent, leur probabilité de finir dans des détecteurs différents n'est plus que de 25 pour cent. De plus, ce cas de figure correspond à un état de Bell des deux photons bien particulier parmi les quatre possibles : c'est celui que Claude obtenait précédemment quand elle avait «de la chance». Le reste du temps (75 pour cent des cas), les deux photons arrivent au même détecteur, ce qui correspond aux trois autres états de Bell, sans toutefois permettre de déterminer auquel on a affaire.

Les ordinateurs quantiques

L'application la plus concrète de la téléportation quantique en dehors de la recherche en physique fondamentale est sans doute l'informatique quantique. Un ordinateur classique fonctionne avec des éléments binaires, qui prennent une valeur définie, soit 0, soit 1 ; un ordinateur quantique utilise des bits quantiques, ou *qubit*. Les *qubits* peuvent être dans des superpositions quantiques de 0 et de 1, comme un photon peut être dans une superposition de polarisations horizontale et verticale. En envoyant un seul photon, le téléporteur quantique de base transmet un unique *qubit*.

L'idée d'une superposition de nombres peut sembler étrange, mais, comme le disait Rolf Landauer, d'IBM, «quand nous étions petits et que nous apprenions à compter sur nos doigts classiques et très collants, nous étions bien loin de la mécanique quantique et de la superposition. Nos doigts bien distincts nous donnaient une mauvaise intuition. Nous pensions que nous pouvions lever trois doigts, puis quatre. Nous ne comprenions pas qu'il était possible d'avoir une superposition des deux possibilités».

Un ordinateur quantique travaille simultanément sur de nombreuses entrées différentes. Par exemple, il pourrait faire tourner un algorithme simultanément sur un million d'entrées, en utilisant un nombre limité de qubits, équivalant au nombre d'éléments binaires qu'un ordinateur classique utiliserait pour faire tourner cet algorithme une fois sur une seule entrée. Les théoriciens ont prouvé que les algorithmes tournant sur des ordinateurs quantiques peuvent résoudre certains problèmes plus vite (c'est-à-dire en moins d'itérations) que tous les algorithmes connus tournant sur un ordinateur classique. Parmi ces problèmes, citons la recherche d'éléments dans une base de données, et la factorisation des grands nombres utile pour le codage et le décodage.

Pour l'instant, seuls les composants les plus rudimentaires des futurs ordinateurs quantiques ont été fabriqués : des portes logiques pouvant traiter un ou deux qubits. La mise au point d'un ordinateur quantique, même de faible capacité, est encore éloignée. L'un des problèmes clefs est le transfert fiable des données entre différentes portes logiques ou processeurs, au sein d'un ordinateur quantique isolé ou sur un réseau quantique. La téléportation quantique constitue une solution.

En outre, Daniel Gottesman de Microsoft et Isaac Chuang d'IBM ont récemment démontré qu'on pouvait construire un ordinateur généraliste à partir de trois composants de base : des particules intriquées, des téléporteurs quantiques et des portes agissant sur un seul *qubit* à la fois. Ce résultat est important, car les portes à un *qubit* sont technologiquement beaucoup plus accessibles que les portes à deux qubits. L'astuce pour construire une porte à deux qubits à partir d'un téléporteur consiste à téléporter deux *qubits* de l'entrée de la porte à sa sortie, en utilisant des paires intriquées soigneusement adaptées. Les paires intriquées sont modifiées de sorte que la sortie de la porte reçoive les *qubits* traités comme il convient. La mise en œuvre de la logique quantique arbitraire revient alors à préparer des états intriqués prédéfinis et à les téléporter. Il faut cependant admettre que la mesure de l'état de Bell complet, nécessaire pour la téléportation, est une sorte de traitement à deux *qubits*.



Quand Claude détecte simultanément un photon dans chaque détecteur, le photon de Jean devient instantanément une copie du photon d'origine X de Claude. Nous avons vérifié expérimentalement que cette téléportation avait bien lieu en montrant que le photon de Jean avait la polarisation que nous avions imposée au photon X. Notre expérience n'était pas parfaite, mais la bonne polarisation a été détectée dans 80 pour cent des cas (s'il s'agissait de photons aléatoires, on obtiendrait 50 pour cent de bonnes polarisations). Nous avons démontré l'efficacité de la procédure pour des polarisations variées : verticales, horizontales, linéaires à 45 degrés, et même pour un type de polarisation non linéaire, la polarisation circulaire.

L'aspect le plus délicat du réglage de notre analyse d'état de Bell consiste à rendre les photons A et X impossibles à distinguer. Même le moment d'arrivée des photons pourrait servir à les identifier, et il est par conséquent important d'«effacer» les informations temporelles portées par les particules. Dans notre expérience, nous utilisons une astuce que nous a suggérée Marek Zukowski, de l'Université de Gdansk : nous faisons passer les photons au travers de filtres de longueur d'onde à très faible largeur de bande. Cette étape rend les longueurs d'onde des photons très précises et, en vertu du principe d'incertitude d'Heisenberg, cela étale l'incertitude sur les temps d'arrivée des photons.

États de superposition

Cette expérience a démontré sans équivoque la téléportation, mais avec un faible taux de succès. Du fait que nous ne pouvions identifier qu'un seul des états de Bell, nous ne pouvions téléporter le photon de Claude que dans les cas où cet état particulier se produisait, soit 25 pour cent du temps. Il n'existe pas d'analyseur d'état de Bell complet pour les photons indépendants, ou pour deux particules quantiques créées indépendamment, si bien que, pour l'instant, il n'y a aucun dispositif ayant fait ses preuves qui aurait 100 pour cent d'efficacité.

En 1994, Sandu Popescu, alors à l'Université de Cambridge, a proposé une méthode pour contourner le problème. Il a suggéré que l'état à téléporter pouvait être un état quantique «à cheval» sur le photon auxiliaire A

Le coin des sceptiques

N'est-il pas exagéré d'appeler ce phénomène «téléportation»? Après tout, il ne s'agit que de téléporter un état quantique, pas un objet réel. Cette question en soulève une autre, plus philosophique, sur le concept d'«identité». Comment savons-nous qu'un objet, par exemple la voiture que nous trouvons dans notre garage le matin, est le même que celui que nous avons vu un moment auparavant? La physique quantique confirme cette approche : des particules de même type dans le même état quantique sont impossibles à distinguer, même en principe. Si l'on pouvait soigneusement échanger tous les atomes de fer de la voiture et les remplacer par des atomes de fer venant d'un bloc de minerai, et reproduire l'état de chaque atome exactement, le résultat final serait absolument la même voiture que la voiture initiale. L'identité ne peut être définie autrement : c'est le fait d'être semblable en toutes propriétés.

Ne devrait-on pas plutôt parler de «téléfax quantique»? Le téléfax produit une copie distincte de l'original, alors qu'il est impossible de distinguer un objet téléporté, même en principe. De plus, dans la téléportation quantique, l'original est détruit.

Y a-t-il un espoir réel de téléporter des objets complexes? Il y a de nombreux obstacles sérieux. Tout d'abord, l'objet doit se trouver dans un état quantique pur, et ces états sont très fragiles. Les photons interagissent très peu avec l'air, et nos expériences ont donc pu être faites à l'air libre, mais les expériences concernant des atomes ou des objets plus gros doivent être réalisées dans le vide pour éviter les collisions avec les molécules de gaz. Par ailleurs, plus un objet est gros, plus son état quantique est facilement perturbé. Le rayonnement thermique des parois de l'appareillage suffirait à lui seul à perturber un minuscule bloc de matière. C'est pour cela que nous n'observons pas d'effets quantiques dans notre vie quotidienne.

L'interférence est plus facile à produire que l'intrication ou la téléportation. Elle a été mise en évidence pour des fullerènes, des sphères constituées de 60 atomes de carbone. Ces travaux vont s'étendre à des objets plus gros, peut-être même à de petits virus, mais ne vous attendez pas à ce que ces prouesses techniques soient reproduites avec des ballons de foot!

La mesure d'état de Bell est un autre problème. Quelle serait la signification d'une mesure d'état de Bell d'un virus constitué de 10^7 atomes, par exemple?

Une précision quantique est-elle nécessaire pour téléporter une personne? Le fait d'être dans le même état quantique ne semble pas être nécessaire pour rester la même personne. Nous changeons d'état tout le temps sans pour autant devenir d'autres personnes (c'est en tout cas l'impression que nous en avons!). Inversement, les vrais jumeaux et les clones biologiques ne sont pas les «mêmes êtres», parce que le contenu de leur mémoire est différent. Le principe d'incertitude d'Heisenberg nous empêche-t-il de répliquer une personne avec suffisamment de précision pour qu'elle pense qu'elle est toujours la même personne? Nul ne le sait. Mais il est intéressant de remarquer que le théorème de non-clonage quantique nous interdit de faire la copie conforme d'une personne.



Si on téléportait
le corps d'un être humain,
son esprit resterait-il sur place?

de Claude. Le groupe de recherche de Francesco De Martini, de l'Université de Rome I «La Sapienza», a expérimenté avec succès cette méthode en 1997. La paire auxiliaire de photons était intriquée en fonction des positions des photons : le faisceau engendrant le photon A était coupé en deux par une lame séparatrice et envoyé vers deux parties différentes du dispositif de Claude, les deux alternatives étant liées par intrication à une découpe similaire du photon B de Jean. L'état à téléporter était également porté par le photon A de Claude (ici, son état de polarisation). Avec un seul photon jouant les deux rôles, la détection des quatre états de Bell possibles devient une simple mesure standard à une particule : il ne s'agit plus que de détecter le photon de Claude dans un des deux lieux possibles, avec une des deux polarisations possibles. L'inconvénient de ce dispositif tient à ce que, si l'on donnait à Claude un état X inconnu et distinct à téléporter, il faudrait qu'elle transfère cet état à la polarisation de son photon A.

La polarisation d'un photon, caractéristique qui a fait l'objet de la téléportation dans les expériences d'Innsbruck et de Rome, est une quantité discrète, en ce sens que tout état de polarisation est une superposition de seulement deux états discrets, les polarisations horizontale et verticale. Le champ électromagnétique associé à la lumière présente également des caractéristiques continues qui peuvent être décrites comme la superposition d'un nombre infini d'états élémentaires. Par exemple, un faisceau lumineux peut être «comprimé», ce qui signifie qu'on peut obtenir une très grande précision ou absence de bruit pour une de ses caractéristiques, mais au détriment de la précision d'une autre caractéristique (toujours Heisenberg). En 1998, le groupe de recherche de Jeffrey Kimble, à l'Institut de technologie de Californie, a téléporté un tel état comprimé d'un faisceau lumineux à un autre, mettant ainsi en évidence le phénomène de téléportation appliqué à une variable continue.

Ces expériences, aussi remarquables soient-elles, n'ont pas résolu le problème de la téléportation quantique de gros objets, qui se heurte à deux difficultés majeures. Tout d'abord, il faut une paire intriquée d'objets de la même sorte. Par ailleurs, l'objet à téléporter et les paires intriquées doivent être suffisamment isolées de leur environnement. En cas

de fuite d'information de l'environnement ou vers l'environnement par des interactions isolées, les états quantiques des objets se dégradent : ce processus est la décohérence. On imagine mal comment parvenir à isoler ainsi totalement un gros appareillage, et encore moins une créature vivante qui respire de l'air et qui rayonne de la chaleur. Mais qui peut prédire la rapidité des progrès scientifiques à venir?

Nous pourrions certainement utiliser les technologies existantes pour téléporter des états élémentaires, comme ceux des photons dans nos expériences, sur des distances de quelques kilomètres, peut-être même jusqu'à des satellites. La technologie de téléportation d'états d'atomes individuels est aujourd'hui accessible : le groupe de recherche de Serge Haroche, à l'École normale supérieure de Paris, a mis en évidence l'intrication d'atomes. On peut raisonnablement s'attendre à observer l'intrication de molécules et à réaliser leur téléportation d'ici une dizaine d'années.

Il est probable que la téléportation sera d'abord utilisée dans le domaine de l'informatique quantique, où la notion ordinaire d'élément binaire (les 0 et les 1) est généralisée à des bits quantiques (ou *qubits*), qui sont des superpositions et des intrications de 0 et de 1. La téléportation pourrait servir à transférer de l'information quantique entre des processeurs quantiques. Les téléporteurs quantiques pourraient servir d'éléments de base à la construction d'un ordinateur quantique. La bande dessinée de la page 41 illustre une situation intéressante où la combinaison de la téléportation et de l'informatique quantique présente un avantage : tout se passe pratiquement comme si on avait reçu l'information téléportée instantanément, sans avoir à attendre qu'elle arrive par les voies normales.

Le débat Bohr-Einstein

La mécanique quantique est certainement l'une des théories physiques les plus élaborées et les plus surprenantes. Les problèmes qu'elle pose à notre intuition du monde lui a valu d'être sévèrement critiquée par Einstein. Ce dernier soutenait que la physique devait essayer de décrire la réalité indépendamment de son observation, mais il réalisait néanmoins que nous sommes confrontés à des problèmes inextricables dès que nous essayons de coller une telle réalité phy-

sique aux membres d'une paire intriquée. Son illustre collègue, le physicien danois Niels Bohr, insistait sur la nécessité de prendre en compte le système entier (dans le cas d'une paire intriquée, l'ensemble formé par les deux particules). Ce que préconisait Einstein, à savoir la description de l'état réel indépendant de chaque particule, est dépourvu de sens dans le cas d'un système quantique intriqué.

La téléportation quantique descend directement des expériences de pensée débattues par Einstein et Bohr. Quand nous analysons l'expérience, nous nous heurterions à toutes sortes de problèmes si nous commençons à nous interroger sur la nature et sur les propriétés des particules individuelles intriquées. Nous devons analyser avec prudence la signification du terme «avoir» une polarisation. Nous sommes nécessairement amenés à conclure que les seules choses que nous pouvons examiner sont des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de mesures. Dans notre mesure de polarisation, le signal du détecteur nous permet de construire une image mentale où le photon «avait» effectivement une polarisation donnée à l'instant de la mesure. Mais nous ne devons pas perdre de vue que cela est une vue de l'esprit. Elle n'est valable que si nous parlons de cette expérience en particulier, et il ne faut pas la transposer à la légère à une autre situation.

En reprenant la pensée de Bohr, je dirais que nous comprenons la mécanique quantique si nous réalisons que la science ne décrit pas la nature telle qu'elle est, mais exprime plutôt ce que nous pouvons en dire. Aujourd'hui, la principale utilité des expériences de physique fondamentale telles que la téléportation est de nous aider à mieux comprendre notre monde quantique.

Anton ZEILINGER travaille à l'Institut de physique expérimentale de Vienne.

Charles H. BENNETT, *Quantum Information and Computation*, in *Physics Today*, vol. 48, n° 10, pp. 24-31, octobre 1995.

D. BOUWMEESTER, J.W. PAN, K. MATTLE, M. EIBL, H. WEINFURTER et A. ZEILINGER, *Experimental Quantum Teleportation*, in *Nature*, vol. 390, pp. 575-579, 11 décembre 1997.

Quantum Information, numéro spécial de *Physics World*, vol. 11, n° 3, mars 1998.

A.J. LEGGETT, *Quantum Theory : Weird and Wonderful*, in *Physics World*, vol. 12, n° 12, pp. 73-77, décembre 1999.
