

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).



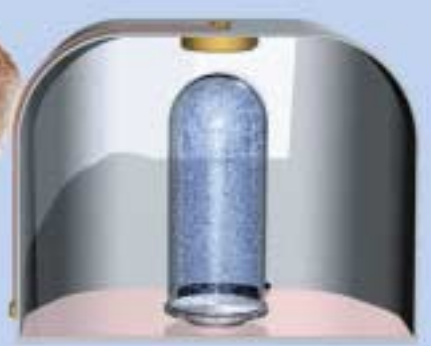
d



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