

1. « Nous avons inventé la téléportation en un jour ! »

En 1992, une équipe de théoriciens propose une méthode permettant de « téléporter » des particules. En se fondant sur un phénomène quantique, ils montrent que l'on peut copier à distance l'état d'une particule à condition que l'original soit détruit. Deux d'entre eux racontent comment ils ont réalisé ce rêve d'écrivain de science-fiction.

Gilles Brassard est titulaire de la chaire d'informatique quantique de l'université de Montréal brassard@iro.umontreal.ca

Claude Crépeau est professeur à l'école d'informatique de l'université McGill à Montréal crepeau@cs.mcgill.ca

LA RECHERCHE : D'où vient le mot « téléportation » ?

CLAUDE CRÉPEAU : Ce terme aurait été inventé par l'écrivain américain Charles Fort au début du XX^e siècle. Il a ensuite été utilisé à de nombreuses reprises par des auteurs de science-fiction pour désigner des modes de transport de matière, dans lesquels celle-ci est d'abord convertie en énergie, puis reconstituée au point d'arrivée après que l'énergie a été transmise à travers l'espace. Dans le processus quantique que nous avons découvert en 1992, la téléportation a un sens un peu différent : il s'agit du transfert de l'état quantique d'une particule, ou d'un système quantique plus complexe, sans transport effectif de la particule elle-même, bien qu'il soit physiquement impossible de prendre connaissance de la description exacte de l'état quantique impliqué [1]. *A priori*, cette tâche semble impossible à réaliser. S'il est impossible de prendre connaissance de l'état quantique d'une particule, en effet, comment peut-on le mener à destination sans transporter la particule qui le contient ? C'est pourtant ce que permet de faire la téléportation quantique et qui rend son existence tellement étonnante. Nous avons choisi ce terme à cause de plusieurs analogies avec la notion de téléportation en science-fiction : tout d'abord, la nécessité de « détruire » l'original afin de le « reconstruire » à distance, ce qui a pour conséquence qu'il n'existe jamais plus d'une « version » à la fois ; ensuite, de l'information classique doit être transmise entre le point de départ et le point d'arrivée,

ce qui correspond à un transfert d'énergie ; enfin, en raison de la différence notable avec la notion commune de « transport », qui présuppose que l'expéditeur connaisse exactement le lieu de destination, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour la téléportation.

L'emploi de ce terme a-t-il eu un impact sur la réception de vos travaux ?

CLAUDE CRÉPEAU : Dès la publication de notre article, l'usage du mot anglais *teleporting* dans le titre a attiré l'attention, tant celle des médias que des physiciens. Plusieurs scientifiques ont d'abord cru à une terminologie abusive ou sensationnaliste. Mais après avoir lu le résumé ces derniers se précipitaient sur l'article qui présentait des idées audacieuses afin d'accomplir une tâche physique réellement apparentée à la téléportation ! À l'époque, nous ne savions pas encore à quel point cette découverte se révélerait utile par la suite. Mais nous étions certains que c'était extrêmement intéressant. Les premières expériences réussies de téléportation quantique ont attiré davantage encore l'attention médiatique que notre invention du principe, cinq ans auparavant (lire « On a téléporté des atomes », p. 35). C'était, en partie, parce que leurs auteurs avaient publié leurs résultats dans des revues scientifiques à large public comme *Nature* ou *Science*, mais aussi parce que la réalisation de telles expériences démontrait, une fois encore, que la réalité colle parfaitement aux prédictions de la physique quantique.



RICHARD JOZSA, WILLIAM WOOTERS, CHARLES BENNETT, GILLES BRASSARD, CLAUDE CRÉPEAU ET ASHER PERES (de gauche à droite, en partant du haut) ont signé ensemble l'article posant les principes de la téléportation quantique.

© ANDRÉ BERTHIAUME/UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

étaient réunis. C'est alors que Bennett, fidèle à ses habitudes, a posé une question *a priori* oiseuse : « Pourquoi ne pas donner à Alice et à Bob une particule EPR ? Ça ne pourrait pas faire de tort ! » Wootters a répondu qu'il ne s'était jamais posé la question, et il a continué son exposé.

Qu'est-ce qu'une particule EPR ?

GILLES BRASSARD : Elles viennent toujours par paire. C'est la manifestation par excellence d'un phénomène intrinsèquement quantique connu sous le nom d'« intrication », qui n'a pas d'équivalent dans le monde classique. Le physicien américain David Bohm en a donné la version simplifiée suivante. Dans certaines circonstances, deux photons peuvent être émis d'une même source de telle façon que leurs polarisations* sont opposées quelle que soit la mesure à laquelle ils sont soumis, pour autant que cette mesure soit la même. Ces photons forment alors une paire de particules EPR. Si l'on mesure la polarisation d'un des deux photons à n'importe quel angle, on sait automatique-

À chaque nouvelle expérience, de plus en plus concluante, de nombreux médias reprennent les résultats expérimentaux pour faire rêver leurs lecteurs. Mais pour nous, c'est l'impact de cette notion sur la science du calcul quantique qui nous semble le plus fondamental. En fait, les expériences de téléportation quantique ont beaucoup plus à voir avec le développement de l'informatique quantique qu'avec un appareil pour téléporter des objets... ou des humains !

Qu'est-ce qui vous a amené à vous intéresser à la téléportation ?

GILLES BRASSARD : En août 1992, mon collègue et ami Charles Bennett, d'IBM, m'a montré un article publié l'année précédente par Asher Peres, de l'Institut de technologie d'Israël, à Haïfa, et Bill Wootters, du Williams College, dans le Massachusetts [2]. Ils y démontraient que, si l'on veut obtenir le plus d'informations possible sur l'état de deux systèmes quantiques identiques, il peut être préférable d'avoir les deux systèmes en un même lieu physique. Si un système est dans le laboratoire d'une dénommée « Alice », et l'autre dans le laboratoire d'un dénommé « Bob », ils auront beau faire n'importe quelles mesures sur leurs systèmes respectifs, la mise en commun des résultats donnera généralement moins d'informations que si les deux systèmes quantiques étaient physiquement réunis pour être mesurés ensemble. Bennett avait vu juste : j'ai été fasciné !

Peu de temps après, j'ai proposé à Bill Wootters de venir présenter ses idées à Montréal, ce qu'il fit en novembre de cette même année. J'avais aussi invité Charles Bennett et Claude Crépeau, sachant qu'ils seraient intéressés par cet exposé. Celui-ci a largement dépassé nos attentes. À un certain moment, Wootters expliquait comment Alice et Bob peuvent améliorer la précision de leurs mesures en échangeant de l'information classique, mais sans jamais arriver aux résultats qui seraient possibles si les deux systèmes quantiques, pourtant identiques,

ment, sans avoir à le toucher, comment l'autre photon réagirait à la même mesure. Les positions relatives des deux photons au moment des mesures n'ont aucune importance. Ils peuvent être aux deux extrémités de la galaxie, la théorie quantique nous assure que cela ne change rien au résultat !

Comment cette propriété a-t-elle été découverte ?

GILLES BRASSARD : C'est Albert Einstein qui, en 1935, en collaboration avec Boris Podolsky et Nathan Rosen (d'où le sigle « EPR »), a montré que l'intrication était une conséquence inéluctable des lois de la mécanique quantique. Il faut savoir qu'Einstein, qui a pourtant contribué à la fondation de la mécanique quantique, et qui a même pour cela reçu le prix Nobel de physique en 1921, a passé une bonne partie de sa vie à vouloir démontrer que cette théorie est incomplète. Soyons précis : il ne mettait pas en doute ses prédictions. Il croyait, par contre, qu'il y avait une réalité sous-jacente qui permettrait de les expliquer. En particulier, il pensait qu'un appareil de mesure ne pouvait que révéler des informations déjà présentes dans le système mesuré : c'est ce qu'il appelait les « éléments de réalité ». Bien au contraire, la mécanique quantique, avec Niels Bohr en tête, affirmait que cette « réalité » n'est qu'un leurre : elle n'existe pas avant qu'un appareil de mesure ne la force à apparaître. Par exemple, si un photon polarisé verticalement est mesuré diagonalement, rien ne le prédispose à choisir entre plus 45 degrés ou moins 45 degrés, les deux résultats ont la même chance de se réaliser. D'après la mécanique quantique, aucun photon ne peut avoir ses polarisations rectilinéaires (horizontal *versus* vertical) et diagonale (moins *versus* plus 45 degrés) définies simultanément. À première vue, l'intrication semble prouver l'existence de ces éléments de réalité. L'argument d'Einstein, modifié par Bohm, est que la polarisation du photon non mesuré d'une paire EPR =>

*La polarisation des photons correspond à leur ondulation dans un plan perpendiculaire à leur axe de propagation. Cette ondulation peut se faire à un angle quelconque.

[1] C. Bennett *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 70, 1895, 1993.

[2] A. Peres *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 66, 1119, 1991.

DOSSIER

PHYSIQUE

⇒ doit correspondre à un élément de réalité. Celui-ci est défini quel que soit l'angle de la mesure de polarisation puisque cette information peut être déterminée sans avoir à interagir avec le photon. Seul l'autre photon de la paire est perturbé par l'appareil de mesure. Cette découverte est tombée comme un coup de tonnerre dans le ciel de Copenhague, où œuvrait Bohr. Il aura fallu trente ans avant que l'Irlandais John Bell démontre que l'intrication est incompatible avec toute explication fondée sur des éléments de réalité ! Depuis, des expériences, conduites d'abord par Alain Aspect à l'université d'Orsay, ont démontré la réalité de ce phénomène.

et bien davantage ! Il « suffit » à Alice d'utiliser l'intrication qu'elle partage avec Bob pour lui téléporter sa copie du système quantique. Une fois en possession des deux systèmes identiques, Bob peut effectuer la mesure optimale. Nous avons immédiatement réalisé que l'importance de notre invention allait bien au-delà de la question posée par Bennett. Nous avons alors invité Asher Peres à se joindre à nous pour peaufiner la découverte. Onze jours après la question « oiseuse » de Bennett, le 2 décembre 1992, nous soumettions notre article à la revue *Physical Review Letters* pour publication.

Quels principes avez-vous découverts permettant de réaliser une expérience de téléportation ?

CLAUDE CRÉPEAU : Dans les limites de notre définition de la téléportation quantique, le principe fondamental qui nous a menés à cette découverte est la notion que l'intrication quantique est une sorte de « canal » de transmission pouvant se combiner à un canal de communication classique pour transmettre des états quantiques. Cela est surprenant car les états quantiques ne peuvent ni être lus complètement ni copiés parfaitement. Sans intrication, la téléportation quantique serait impossible car aucune méthode classique ne permet de communiquer ce qu'on ne saurait lire ! Sans elle, la seule façon connue de transmettre un état quantique inconnu d'Alice à Bob est d'amener la particule porteuse jusqu'à ce dernier. Grâce à l'intrication, il devient possible de téléporter l'état quantique vers Bob, même sans savoir où il se trouve exactement (voir ci-contre). Il faut souligner que l'intrication seule ne permet pas de communiquer : un message classique est toujours nécessaire à la téléportation. Celle-ci ne peut donc pas se faire plus rapidement qu'à la vitesse de la lumière, au grand soulagement « posthume » d'Einstein !

Principe de la téléportation quantique



© INFOGRAPHIES / GRÉGOIRE CIRADE

1 Alice et Bob partagent une paire de particules intriquées (cubes X et Y), qui forment un système quantique unique.

2 Alice s'apprête à téléporter l'état inconnu d'une troisième particule (pyramide Z) via le « canal de téléportation », non matériel, formé par le système de particules intriquées.

3 Alice réalise une mesure simultanée de l'état des particules Z et X. L'état de la particule Z est aussitôt détruit, et la particule Y est affectée par cette mesure.

4 Alice envoie par un canal de communication classique

le résultat de la mesure qu'elle vient de faire.

5 Dès réception de cette information, Bob ajuste l'état de sa particule Y de sorte qu'elle devienne une copie conforme de la particule originale.

Revenons à votre histoire. Qu'est-il advenu de la question de Bennett ?

GILLES BRASSARD : Une fois l'exposé de Wootters terminé, nous avons poursuivi la discussion dans mon bureau. Outre Wootters, Bennett, Crépeau et moi-même, il y avait Richard Jozsa, qui faisait à l'époque partie de mon équipe. Intrigués par la question posée par Bennett, nous avons tenté d'imaginer comment le partage d'une paire de particules EPR entre Alice et Bob pourrait les aider. Il aura fallu moins de 24 heures avant que la téléportation quantique s'impose à nous comme un outil révolutionnaire qui permettait de résoudre le problème. ...

Les premières expériences de téléportation ont été réalisées en 1997, avec des photons, puis en 2004, avec des atomes. Vous attendiez-vous à des résultats aussi rapides ?

GILLES BRASSARD : Certainement pas ! Pour nous, c'était de la recherche au sens le plus pur du terme. Il ne faudrait pas oublier que nous avons inventé la téléportation quantique à une époque où l'informatique quantique était loin d'être la discipline reconnue qu'elle est maintenant. Rien ne laissait alors présager que le budget mondial de la recherche en informatique quantique allait bientôt se chiffrer par centaines de millions d'euros annuellement ! ■■ **Propos recueillis par Franck Daninos**