



Laurent Mucchielli, sociologue :

« Une même démarche pour toutes les sciences »

MENSUEL N°386 mai 2005

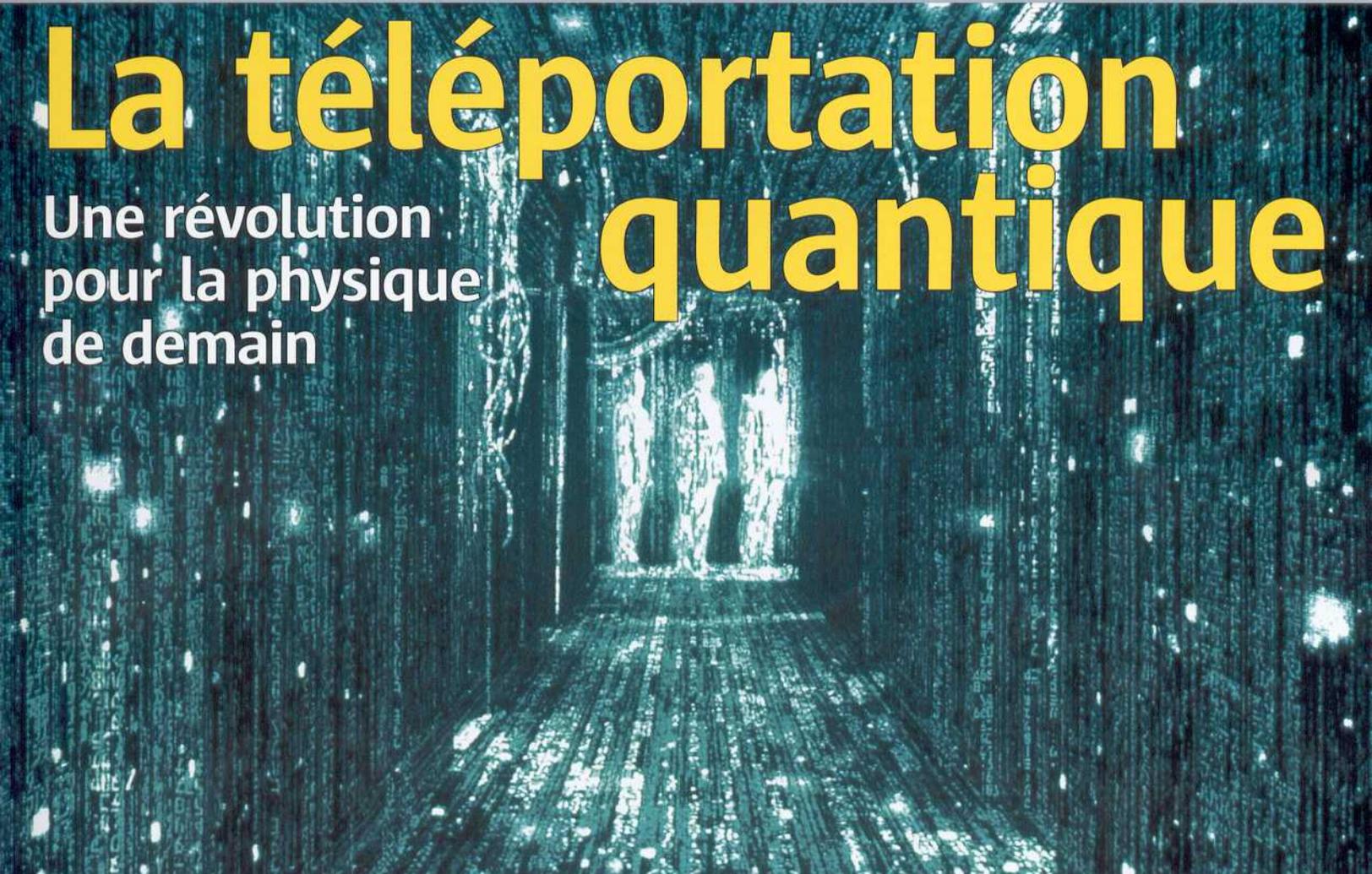
La RECHERCHE

# La RECHERCHE

L'ACTUALITÉ DES SCIENCES

# La téléportation quantique

Une révolution pour la physique de demain



**L'OPIUM  
légal en France**

**Tempêtes  
stellaires**



MENSUEL DOM/5 6 € BEL 6,90 € LUX 6,90 € D 7,30 € ESP 6,30 € GR 6,30 € ITA 6,30 € PORT.CONT 6,30 € CAN 8,50 \$ CAN CH 12 FS MAR 49 DH TUN 4900 TNM ISSN 00295671

Bac to basics  
**LE CARBONE**

Comment ça marche  
**SE GARER  
SANS EFFORT**

W<sup>xyz</sup>  
**LA FORME MOUVANTE  
DES IMPLANTS OCULAIRES**

Chercher jouer trouver  
**MAXIMUM  
ET MINIMUM**

T 01108 - 386 - F: 5,90 €



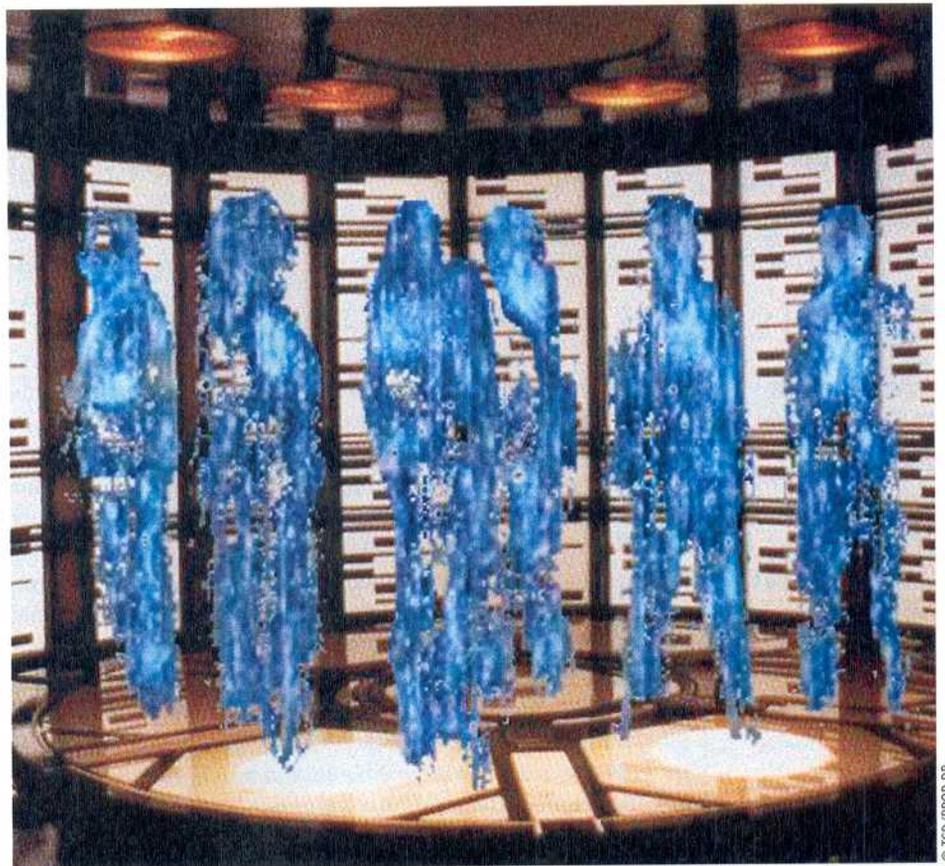
# La téléportation quantique

**T**éléportation, Scotty! Les amateurs de la série *Star Trek* réagiront au quart de tour... Par cette injonction amicale, à longueur d'épisodes, le capitaine Kirk sollicite son second, qui manipule quelques boutons. Kirk se dématérialise alors dans un éclair de lumière pour réapparaître sur une planète improbable.

La « téléportation » a longtemps relevé de la pure science-fiction. Jusqu'à ce qu'une équipe de physiciens et d'informaticiens, en 1992, invente un moyen pour fabriquer l'exacte copie d'une particule à un endroit cible (« Nous avons inventé la téléportation en un jour! », p. 32). Pour cela, ils font appel à un phénomène mis en lumière dans les années trente par Albert Einstein: dans certaines conditions, deux objets quantiques restent unis par un lien immatériel et mystérieux.

D'abord curiosité théorique, l'idée de téléportation quantique fera rapidement des émules chez les expérimentateurs. En 1997, usant d'une somme d'astuces remarquables, des physiciens parviennent à téléporter l'état quantique d'un grain de lumière, un photon. En juin 2004, un nouveau pas très important est franchi. Deux équipes réussissent à téléporter l'état quantique d'un atome, une particule massive (« On a téléporté des atomes », p. 35). La réalité tend aujourd'hui à se rapprocher de la fiction: nous verrons ainsi comment des applications de la téléportation quantique commencent à voir le jour (« Le téléphone quantique à l'essai », p. 41).

Les contributeurs de ce dossier spécial du magazine *La Recherche* souhaitent dédier ce travail à la mémoire de l'un des inventeurs de la téléportation quantique, Asher Peres, décédé en janvier 2005.



© TCO/PROD DB

# 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<sup>e</sup> 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.



© ANDRÉ BERTHIAUME/UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**RICHARD JOZSA, WILLIAM WOOTTERS, 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.

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 amenés 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,

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-

ment, sans avoir à le toucher, comment l'autre photon réagira 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.

⇒ 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 / GREGOIRE GRADE

- 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.

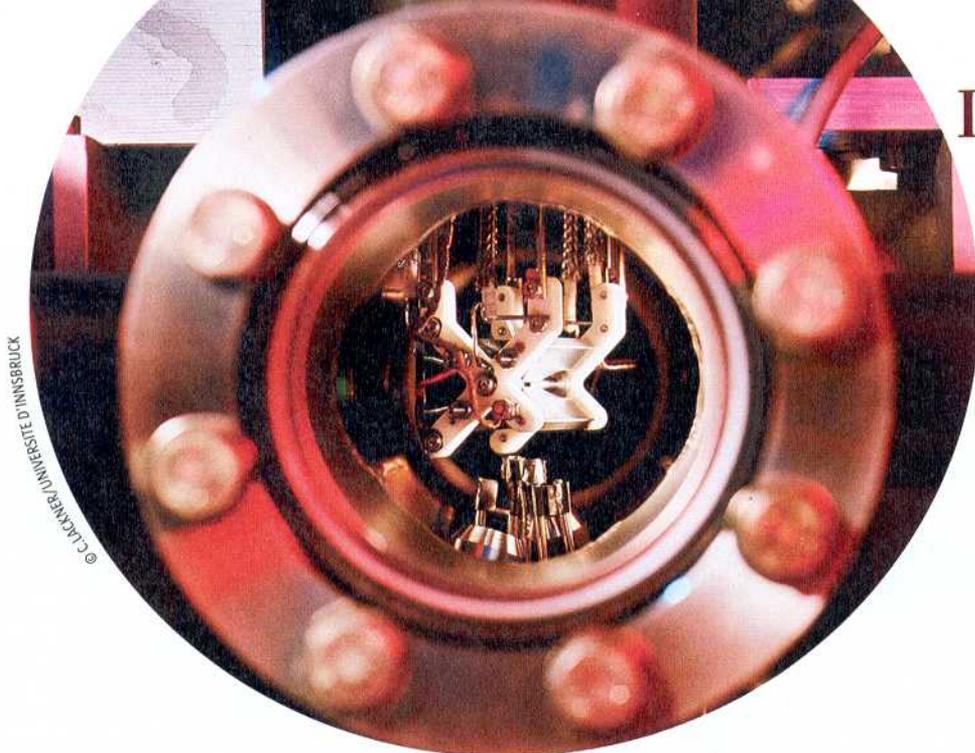
- 5 Dès réception de cette information, Bob ajuste l'état de sa particule Y de sorte qu'elle devienne une copie conforme de la particule originale.

**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**



© CLACKNER/UNIVERSITÄT D'INNBRUCK

## 2. On a téléporté des atomes

En juin 2004, des physiciens ont copié l'état quantique d'un atome sur un autre. Le succès est double. D'abord, on avait jusque-là téléporté uniquement des photons. Ensuite, avec des atomes, le processus de téléportation quantique est complètement contrôlé.

**Nicolas Cerf**  
est professeur à l'école polytechnique de l'Université libre de Bruxelles, où il dirige le Center for Quantum Information and Communication  
nicolas.cerf@ulb.ac.be

**Nicolas Gisin**  
est professeur à l'université de Genève, où il dirige la section d'optique du Groupe de physique appliquée  
nicolas.gisin@physics.unige.ch

**E**n juin 2004, une équipe autrichienne et une équipe américaine annonçaient qu'elles avaient, indépendamment, réalisé la téléportation quantique d'atomes en laboratoire [1]. En d'autres termes, elles avaient transféré exactement les caractéristiques quantiques d'un atome sur un autre, sans que ces deux particules n'interagissent jamais directement. C'était une première, car les démonstrations expérimentales de la téléportation quantique réalisées quelques années plus tôt ne concernaient alors que des photons, particules sans masse, pas de la matière.

Ces nouvelles expériences apportaient une autre amélioration de taille à la mise en œuvre de la téléportation quantique : elles étaient « déterministes ». Contrairement aux expériences précédentes, le schéma théorique de la téléportation, proposé onze ans plus tôt (lire p. 32), était ici complètement réalisé. La téléportation se produisait « à la demande », avec 100 % de succès. Cette performance

donnait encore plus de crédit à la possibilité d'utiliser la téléportation quantique comme élément des futurs ordinateurs quantiques [2].

### Un « même hasard »

Le fondement de la téléportation est l'une des propriétés quantiques les plus remarquables, appelée l'intrication. Lorsque deux particules sont intriquées, on obtient toujours le même résultat (ou un résultat complémentaire) lorsque l'on réalise la même mesure sur chacune d'entre elles. Bien qu'en physique quantique le résultat d'une mesure ne soit pas prédéterminé, l'intrication fournit donc le « même hasard » pour deux mesures réalisées indépendamment par deux personnes différentes, que l'on a pris l'habitude de désigner sous les noms d'Alice et de Bob. En outre, ces corrélations sont maintenues quelle que soit la distance qui sépare Alice de Bob dans l'espace et dans le temps : ils peuvent ignorer où ils se trouvent l'un l'autre, ⇔

⇒ ils peuvent être dans le futur ou le passé, ou dans ce que la relativité appelle l'« ailleurs » (séparé de telle sorte qu'aucun signal ne puisse passer de l'un à l'autre).

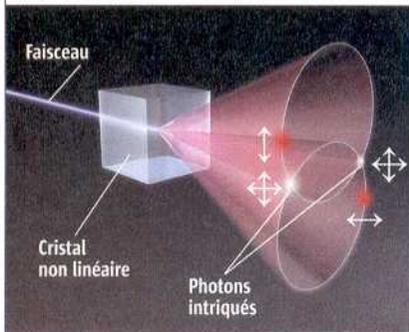
Le concept n'est pas nouveau car il remonte aux fondateurs de la mécanique quantique, comme Schrödinger et Einstein, mais ce n'est que tout récemment que sa prodigieuse fertilité en théorie de l'information a été perçue par les physiciens et les informaticiens [3]. La téléportation quantique

exploite en fait l'intrication de deux façons. D'abord comme « canal de téléportation ». Si Alice et Bob disposent d'une paire de particules intriquées, ils peuvent procéder à la téléportation *via* ce canal: l'objet, ou plus précisément son état quantique, se dissout en un endroit de l'espace pour se dématérialiser ailleurs. Par où passe-t-il? Mauvaise question: il ne passe nulle part, du moins dans notre espace ordinaire. En fait, cet état quantique est téléporté grâce au lien établi par les corrélations quantiques.

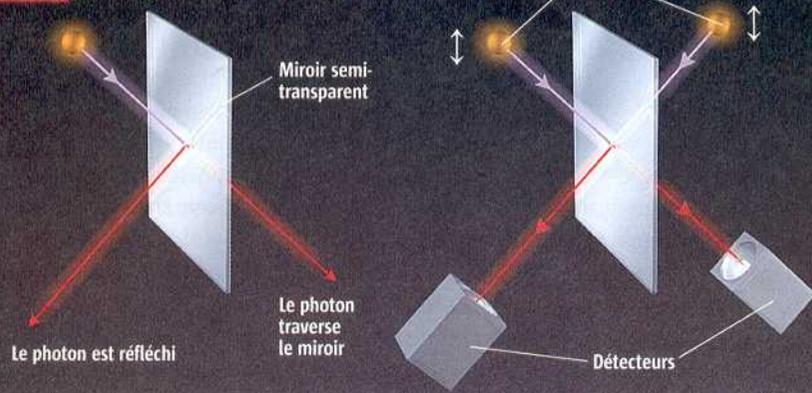
L'intrication intervient aussi lors de la « mesure de Bell » que réalise Alice pour obtenir l'information classique qu'elle transmettra à Bob pour lui permettre de recréer l'état de la particule originale. Alice demande en quelque sorte à cette dernière et à la particule de la paire intriquée qu'elle possède: « Quel est votre état relatif? ». En physique classique, il est impossible de mesurer une grandeur relative de deux systèmes, par exemple l'angle entre deux flèches, sans acquérir simultanément aussi de l'information sur l'état de chacun des systèmes (sur l'orientation de chacune des flèches). Mais en physique quantique, c'est possible grâce, vous l'auriez deviné, à l'intrication! Ici, les deux systèmes qui subissent la mesure de Bell, la particule à téléporter et la particule de la paire intriquée détenue par Alice, sont initialement indépendants. Mais après la mesure ces deux systèmes deviennent nécessairement intriqués.

### Fig.1 Production d'une paire de photons intriqués

LORSQU'UN RAYONNEMENT LASER TRAVERSE UN CRISTAL possédant des propriétés optiques non linéaires, un photon peut se transformer en deux autres de plus basse énergie. Le cristal est choisi tel que chacun des deux photons se trouve quelque part sur la circonférence de deux cônes, et les particules se propagent dans des directions symétriques par rapport à celle du laser incident. Si l'un des deux photons se propage à la périphérie du cône du haut, à gauche, le second se propage dans le cône du bas, à droite (points rouges). De plus, en considérant un état quantique des photons appelé « polarisation », celle du photon sur le cône supérieur est verticale, et celle du photon sur le cône inférieur est horizontale. Avec un cristal et une lumière laser adéquats, les photons dédoublés se propagent parfois à l'intersection des deux cônes. Dans ce cas précis, les photons n'ont plus d'état quantique individuel. On ne peut plus savoir lequel vient du cône du haut ou du cône du bas: ils forment un système quantique unique. L'état de polarisation des photons n'est alors ni vertical ni horizontal, et le système est dans une superposition d'état. On dit que les deux photons sont « intriqués ».



### Fig.2 Miroir semi-transparent

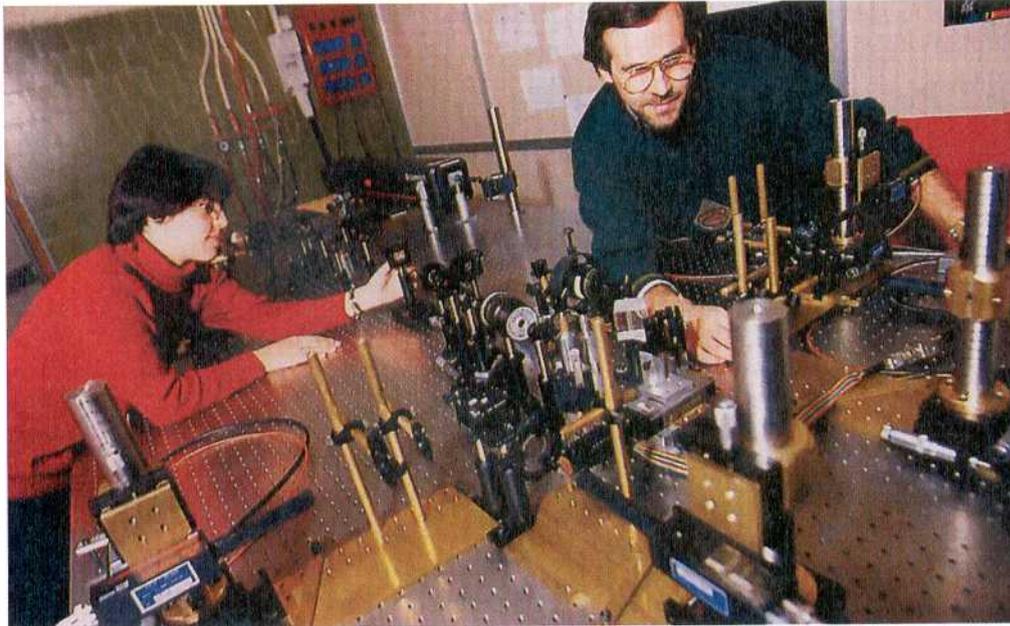


LORSQU'UN PHOTON EST ÉMIS EN DIRECTION D'UN MIROIR SEMI-TRANSPARENT (dessin de gauche), la particule a une chance sur deux d'être détectée d'un côté ou de l'autre du miroir. Avant sa détection par un appareil de mesure, le photon « coexiste » des deux côtés du miroir. Deux photons de même longueur d'onde émis avec le même angle d'incidence en direction d'un miroir semi-transparent (dessin de droite) interfèrent l'un avec l'autre. Si les deux photons incidents sont dans le même état de polarisation, ils sont détectés ensemble par l'un des appareils de mesure placés dans le prolongement des trajectoires. S'ils sont dans un état symétrique de polarisation, ils émergent, chacun, de part et d'autre du miroir. Leur détection permet de réaliser, avec une probabilité d'une chance sur quatre, une mesure dite « de Bell » de leur état de polarisation. Une telle mesure est un préalable indispensable dans une expérience de téléportation quantique. © INFOGRAPHIES/GRÉGOIRE CIRADE

### Un seul photon

En physique quantique, de façon générale, une mesure change l'état du système mesuré, constitué ici des deux particules. Ce changement d'état amène l'intrication des deux particules durant le processus de mesure car la connaissance de leur « état relatif » définit la relation entre les réponses que donnerait l'un et celle que donnerait l'autre. Dans le même temps, l'état quantique que l'on souhaite téléporter est, lui, détruit.

Pour téléporter, donc, il fallait des particules intriquées. Où en trouve-t-on? Les spécialistes d'optique quantique ne se sont pas posé longtemps la question: depuis les années quatre-vingt, et après les expériences pionnières de l'Américain John Clauser et du Français Alain Aspect, ils avaient appris à produire assez simplement des paires de photons intriqués. La méthode la plus courante consiste à envoyer une impulsion laser dans un cristal aux propriétés optiques particulières, qualifiées de « non linéaires »: lorsque les paramètres expérimentaux sont bien ajustés, quelques photons de cette impulsion lumineuse sont transformés en paires de photons intriqués, de longueur d'onde plus grande [fig. 1]. Utiliser des photons comme supports de la téléportation présentait toutefois une difficulté expérimentale majeure. En effet, la réalisation d'une mesure de Bell optique nécessite que les deux photons interagissent. Or, ces particules sont justement connues pour ne pratiquement pas le faire! Dans le vide, les photons se croisent en s'ignorant totalement. Dans la matière (transparente évidemment) ils n'interagissent



**DURANT L'ÉTÉ 1997, À L'UNIVERSITÉ DE ROME, l'équipe de Francesco De Martini fut la première à réaliser la téléportation d'un photon. Les chercheurs avaient toutefois légèrement « triché », en utilisant le même photon, à la fois comme support pour l'état quantique à téléporter et pour former le canal virtuel de téléportation.**

© UNIVERSITÉ DE ROME

\* **L'impulsion** est un vecteur orienté dans la direction de propagation du photon et de grandeur inversement proportionnelle à la longueur d'onde.

\* **Un photon est polarisé linéairement** si l'orientation du champ électrique oscillant associé à l'onde électromagnétique ne varie pas au cours du temps.

qu'indirectement: le champ électrique de chaque photon agit sur les électrons du matériau, qui réagissent sur le champ électromagnétique de l'autre photon. Mais le champ électrique d'un seul photon est extrêmement faible, trop faible pour permettre une réelle interaction avec un autre photon.

Au milieu des années quatre-vingt-dix, Sandu Popescu, aujourd'hui à l'université de Bristol, a proposé une solution à ce problème. C'est cette idée, *a priori* toute simple, qui a permis au groupe de Francesco De Martini, de l'université de Rome, d'être le premier à réaliser une expérience de téléportation quantique dès le milieu de l'année 1997 [4]. Il suffit qu'Alice encode l'état quantique qu'elle souhaite téléporter sur le photon de la paire intriquée qu'elle détient ! Ce codage utilise évidemment une caractéristique du photon différente de celle qui est intriquée avec son photon jumeau. Par exemple, si Alice et Bob partagent une paire de photons dont les impulsions\* sont intriquées, Alice peut coder l'état à téléporter dans la polarisation\* de son photon. La mesure de Bell ne nécessite alors le couplage que de deux grandeurs physiques d'un même photon, ce qui est nettement plus facile à réaliser que le couplage de deux photons.

## Il fallait trouver un moyen pour faire interagir deux photons de façon significative

### Mesure de Bell

Justement, la polarisation et l'impulsion d'un photon se couplent facilement grâce à un séparateur de polarisation, dispositif qui ne laisse passer que les photons polarisés dans une direction donnée et réfléchit complètement les photons polarisés perpendiculairement. L'impulsion d'un photon polarisé dans la direction choisie n'est pas affectée, alors que la polarisation perpendiculaire fait tourner l'impulsion de 180° (le photon est réfléchi). On peut alors effectuer une

mesure de Bell complète en utilisant des séparateurs de polarisation suivis de compteurs de photons.

Ce codage sur un même photon de l'état quantique original et de l'intrication avec le photon jumeau, même s'il permet de téléporter effectivement avec un taux de succès théorique de 100%, n'était pas complètement satisfaisant. En effet, l'état quantique à téléporter ne peut pas être inconnu de celui qui prépare la paire intriquée car ce dernier doit tourner la polarisation de l'un des photons de la paire en fonction de cet état. On n'était donc pas exactement dans le schéma théorique proposé initialement [5]. En outre, cette méthode ne permet pas à Bob de téléporter à son tour l'état qu'il a reçu, ce qui exclut d'emblée nombre d'applications de la téléportation (lire « Le téléphone quantique à l'essai », p. 41).

Il était donc nécessaire de trouver un moyen pour que deux photons interagissent de façon significative afin de se rappro-

cher encore plus du schéma original. C'est ce qu'a fait, à la fin de cette même année 1997, Anton Zeilinger, à l'époque à l'université d'Innsbruck, avec son équipe [6]. L'astuce, due notamment à Harald Weinfurter, était de remarquer que si l'on se contente d'une mesure de Bell partielle, c'est-à-dire dont la probabilité de succès est inférieure à 100 %, et non complète, un simple miroir semi-transparent suffit.

On sait en effet que si deux photons de même longueur d'onde et de même polarisation tombent simultanément sur les faces opposées d'un tel miroir, le processus par lequel les deux photons traversent le miroir interfère de façon destructive avec celui par lequel ils sont tous les deux réfléchis. Ainsi, les deux photons sont obligatoirement détectés tous les deux du même côté du miroir. Plus généralement, cela reste vrai ⇒

[1] M. Riebe et al., *Nature*, 429, 734, 2004 ; M. D. Barrett et al., *Nature*, 429, 737, 2004.

[2] Dossier: « L'ordinateur sous le charme quantique », *La Recherche*, novembre 1996, p. 52.

[3] N. Cerf et N. Gisin, « Les promesses de l'information quantique », *La Recherche*, janvier 2000, p. 46.

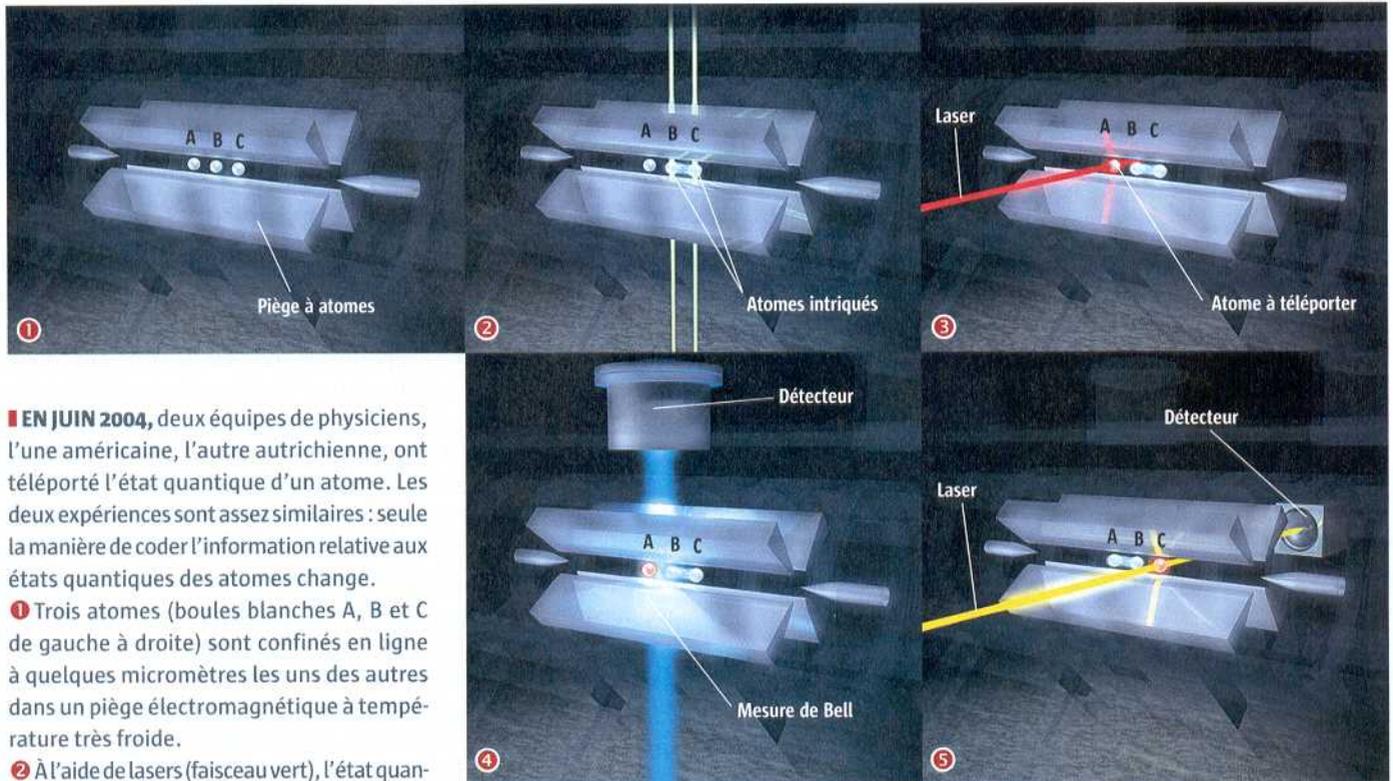
[4] D. Boschi et al., *Phys. Rev. Lett.*, 80, 1121, 1998.

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

[6] D. Bouwmeester et al., *Nature*, 390, 575, 1997.



## 2004 Téléportation d'atomes



**EN JUIN 2004**, deux équipes de physiciens, l'une américaine, l'autre autrichienne, ont téléporté l'état quantique d'un atome. Les deux expériences sont assez similaires : seule la manière de coder l'information relative aux états quantiques des atomes change.

❶ Trois atomes (boules blanches A, B et C de gauche à droite) sont confinés en ligne à quelques micromètres les uns des autres dans un piège électromagnétique à température très froide.

❷ À l'aide de lasers (faisceau vert), l'état quantique de deux atomes (B et C) est préparé de sorte qu'ils se retrouvent intriqués : ils forment alors un seul et même système quantique.

❸ Le troisième atome (A) est éclairé avec un laser de fréquence choisie (faisceau rouge). Il se retrouve alors dans l'état énergétique que

l'on souhaite précisément téléporter.

❹ On réalise une mesure conjointe de l'état des atomes A et B (mesure de Bell) en irradiant ces atomes (lumière bleue) et en détectant simultanément la lumière émise. L'intrication quantique entre les

atomes B et C disparaît, et l'état de l'atome A est détruit par la mesure de Bell. L'atome C est à ce moment dans un état « mélangé ».

❺ Le résultat de la mesure de Bell permet de placer l'atome C dans l'état téléporté.

2004, l'équipe de Rainer Blatt, de l'université d'Innsbruck, et celle de David Wineland, du National Institute of Standards and Technology à Boulder, dans le Colorado. Mais, cette fois, avec des atomes.

### Fidélité exemplaire

Leurs résultats, publiés à la suite dans le même numéro de la revue *Nature*, présentaient donc un double intérêt, justifiant l'accueil enthousiaste qu'ils ont reçu autant parmi les spécialistes de physique quantique que dans le grand public.

D'une part, nous l'avons dit, dans leurs deux expériences, légèrement différentes au niveau technique mais similaires dans leur principe, la téléportation était réalisée « à la demande » : la mesure de Bell fonctionnait dans tous les cas, et il n'était plus nécessaire de sélectionner les données après coup, à l'inverse des expériences précédentes. Évidemment, ces expériences ne sont pas parfaites : dans les deux cas, la fidélité de l'état téléporté n'est que de 75 %. C'est tout de même une valeur élevée, qui démontre en par-

ticulier que la téléportation a effectivement été réalisée grâce au canal quantique. Surtout, avec ces expériences, Alice et Bob peuvent préparer un état intriqué à l'avance, puis, quand ils le souhaitent, enclencher le processus de téléportation. Une mesure de Bell complète est réalisée (les quatre états sont donc distingués), et l'état initial est rematérialisé sur un autre atome que l'on peut, au moins en théorie, utiliser pour un nouveau processus quantique.

D'autre part, bien sûr, ces résultats faisaient entrer la téléportation dans le domaine de la matière. Contrairement aux photons, les atomes ont une tendance naturelle à interagir avec leur environnement. L'une des principales difficultés consiste donc à les isoler, afin que leurs états quantiques ne soient pas modifiés du fait d'interactions indésirables avec leur environnement. Il faut éviter que l'intrication de la paire d'atomes ne disparaisse rapidement. Mais il faut aussi pouvoir manipuler les atomes avec assez de précision pour établir entre eux des couplages forts, au moment de la mesure de Bell par exemple, ce  $\rightarrow$

[7] S. Giacomini *et al.*, *Phys. Rev. A*, 66, 030302, 2002.

[8] Y.-H. Kim *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 1370, 2001.

[9] A. Furusawa *et al.*, *Science*, 282, 706, 1998.

⇒ qui représente une contrainte contradictoire avec celle d'une forte isolation.

L'équipe autrichienne utilise trois ions calcium, stockés dans un « piège à ions » à une distance de 5 micromètres l'un de l'autre. L'état téléporté est codé sur deux états d'énergie de cet ion, l'état fondamental et un état métastable, dont la durée de vie est de l'ordre d'une seconde. La transition entre ces deux niveaux est induite par des impulsions laser de lumière rouge, à la longueur d'onde de 0,729 micromètre, ce qui permet de manipuler les atomes indépendamment les uns des autres. En fait, pour s'assurer que ces impulsions laser n'affectent qu'un seul ion à la fois, les expérimentateurs ont dû les focaliser très précisément et mettre au point une technique de « masquage » des autres ions.

### Seuls les atomes permettent la réalisation complète de la téléportation

\* **La structure hyperfine** : dans un atome, l'interaction des électrons avec le noyau scinde les niveaux d'énergie atomiques en plusieurs sous-niveaux.

[10] N. Cerf et al., *Phys. Rev. Lett.*, 84, 2521, 2000.

### Des ions béryllium

Les opérations nécessitant l'interaction de deux ions, pour la création de la paire intriquée ainsi que pour la mesure de Bell, sont réalisées à l'aide d'une séquence adéquate d'impulsions laser. Les ions ne sont pas couplés directement, mais par l'intermédiaire d'une grandeur commune à eux trois, la position du centre de masse de l'ensemble.

La paire d'ions intriqués peut être conservée pendant une durée de l'ordre de la centaine de millisecondes, alors que le processus de téléportation à proprement parler (mesure de Bell, transfert de l'information et opération sur la particule de Bob) ne prend qu'environ 2 millisecondes. On est donc vraiment très proche de l'idée théorique selon laquelle l'intrication constitue véritablement une ressource, que l'on emploie lorsqu'elle se révèle nécessaire, pour la téléportation par exemple.

L'expérience du groupe américain se distingue par le fait qu'elle utilise des ions béryllium. L'état à téléporter est codé sur deux niveaux d'énergie de la structure hyperfine\* de l'état fondamental de cet ion. Par ailleurs, le couplage de deux ions nécessaire pour la production d'intrication et la mesure de Bell est fondé sur une méthode où les ions sont déplacés dans le piège. Enfin, la façon d'adresser individuellement les ions ne nécessite pas le « masquage » des ions indésirables, mais repose sur une technique de déplacement des ions dans des zones séparées d'un « piège à ions multisegments ».

Bien que, dans ces deux expériences de téléportation atomique, les ions intriqués ne soient séparés que de quelques micromètres, rien ne s'oppose en théorie à ce que cette distance soit augmentée. Les progrès constants dans la construction de pièges à ions permettent raisonnablement de l'espérer. De plus, ces expériences ont toutes deux le mérite de mettre en œuvre des pièges à ions, qui sont considérés aujourd'hui comme l'un des ingrédients essentiels pour la réalisation de futurs ordinateurs quantiques. Cela leur confère un intérêt bien plus étendu que la seule démonstration de la téléportation d'atomes.

## PERFORMANCES

### Des copies fidèles

■ **LA « QUALITÉ » DE LA TÉLÉPORTATION** réalisée en laboratoire peut être quantifiée au moyen d'une grandeur appelée la « fidélité ». Celle-ci est définie comme le recouvrement entre l'état quantique original et l'état quantique qui est reconstruit à distance. Elle vaut 100 % pour une téléportation théorique parfaite, et 50 % si l'état reconstruit est choisi au hasard (on choisit entre deux possibilités). Pour déterminer si l'expérience de téléportation a réussi, cette grandeur doit être comparée à un seuil, que l'on peut calculer théoriquement, et qui est de 2/3 pour le cas qui nous intéresse ici. Toute valeur supérieure à ce seuil implique que l'intrication est bien nécessaire pour expliquer les résultats expérimentaux.

■ **IL EST AMUSANT DE REMARQUER QUE L'ON POURRAIT, EN PRINCIPE, ATTEINDRE UNE FIDÉLITÉ DE 100 %**, dans un dispositif où, au lieu de partager une paire de particules intriquées, Alice et Bob partageraient préalablement quelques bits d'information [10]. Si Alice reçoit l'information qui définit précisément l'état à téléporter (c'est-à-dire deux angles), elle peut, en ne communiquant en moyenne que 2,19 bits à Bob, permettre à ce dernier de simuler exactement la mesure de n'importe quel état de polarisation, inconnu à l'avance par Alice, tout comme s'il avait été téléporté. Il ne s'agit plus à proprement parler de téléportation quantique, mais bien du transport de l'information caractérisant un état quantique. C'est bien différent, puisque l'état lui-même n'est pas reconstitué, seulement le résultat de la mesure. Bien que toutes les expériences réalisées jusqu'à présent se terminent par la mesure de l'état de la particule de Bob, l'objectif de la téléportation est bien le transport de l'état lui-même. Toutefois, ce résultat montre, ce qui semblait paradoxal, que l'intrication n'est pas nécessaire s'il ne s'agit que de simuler les mesures de l'état téléporté.

### La substance et la forme

Bien que la téléportation de science-fiction à la *Star Trek*, qui nécessiterait un transfert instantané de matière, soit impossible, la téléportation quantique d'atomes s'en approche de près. La matière reste sur place, à l'émetteur, et doit être déjà présente du côté du récepteur, mais la structure inscrite dans la « matière-émetteur » se dissout, tandis que la « matière-récepteur », initialement sans aucune structure, acquiert précisément la structure téléportée.

Cette division entre « matière-énergie », d'une part, et « structure-état quantique », d'autre part, était déjà présente chez Aristote : la substance et la forme. La substance ne saurait être téléportée, mais l'on peut bel et bien téléporter la forme. Asher Peres, l'un des membres de l'équipe qui avait proposé en 1993 l'idée de la téléportation quantique, décédé le 1<sup>er</sup> janvier 2005, adorait à ce propos citer la réponse qu'il avait faite à un journaliste. Alors que celui-ci lui demandait s'il était possible de téléporter l'esprit en plus du corps, il répondit : « Non, on ne peut téléporter que l'esprit ! » ■ **N.C. et N.G.**

# 3. Le téléphone quantique à l'essai

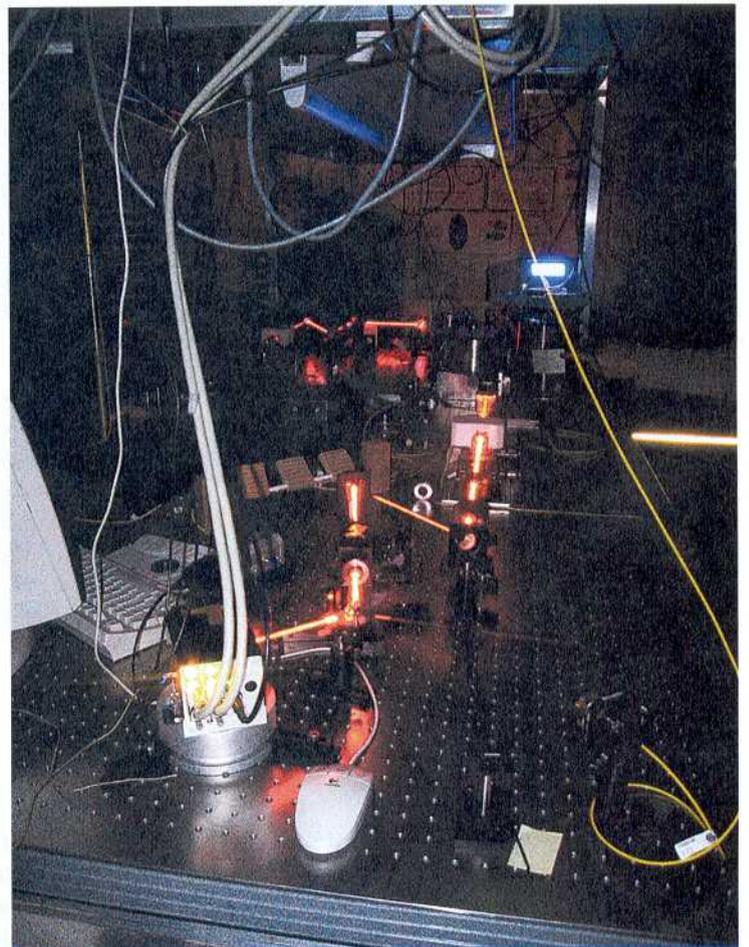
À quoi la téléportation peut-elle servir ? Sans doute, dans un futur proche, à transmettre des informations confidentielles sur de longues distances. En attendant d'y parvenir, des physiciens apprennent à téléporter des photons dans le réseau téléphonique ordinaire.

Nicolas Gisin  
et Nicolas Cerf

Les premières expériences de téléportation, à la fin des années quatre-vingt-dix, ne « transportaient » des photons que sur de courtes distances, quelques mètres au plus. À l'université de Genève, nous travaillions depuis plusieurs années déjà à la transmission d'information quantique à longue distance, à travers les fibres optiques du réseau téléphonique ordinaire. Ainsi, en 1998, nous avons envoyé une particule intriquée à 10,9 kilomètres de sa partenaire dans le réseau ordinaire, en ligne droite, après avoir atteint 50 kilomètres en laboratoire [1].

## Communications cryptées

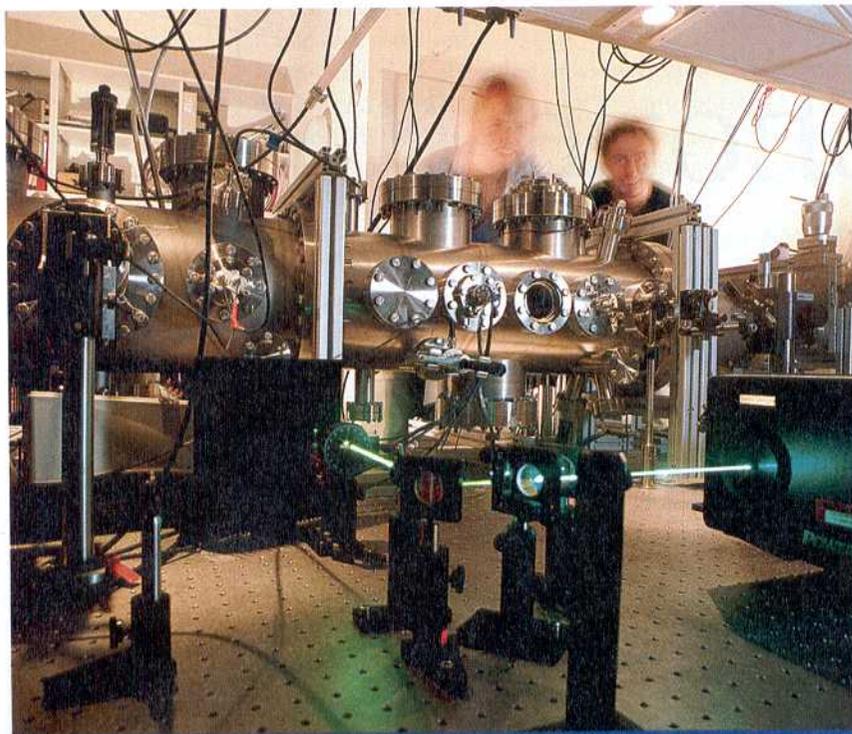
Nous avons donc naturellement pensé téléporter des photons dans des fibres optiques. Il ne s'agissait pas seulement de réaliser une performance technique : le « répéteur quantique », dispositif permettant la transmission d'informations quantiques à très longue distance, fondé sur la téléportation, sera probablement la première application pratique utilisant celle-ci.



CETTE SOURCE DE PHOTONS INTRIQUÉS est utilisée pour téléporter des photons dans des fibres optiques. Mis au point récemment par des physiciens de l'université de Nice, un cristal où les photons sont guidés dans un réseau permet de les intriquer sur plusieurs dizaines de kilomètres. © GAP/UNIVERSITÉ DE GENÈVE

En codant des informations dans les états quantiques de photons individuels, on peut réaliser des principes de communication totalement inaccessibles à l'information classique. Par exemple, suivant une idée proposée en ⇒

[1] W. Tittel et al., *Phys. Rev. A*, 57, 3229, 1998.



À LA SORTIE D'UNE FIBRE OPTIQUE, LES PHYSICIENS VÉRIFIENT l'état d'intrication de photons par des détecteurs (à droite). Dans cette expérience, les photons ont été intriqués sur une distance de près de 600 mètres via une fibre optique courant sous le Danube. © VOLKER STEGER/SPL/COSMOS

[2] C. Bennett et G. Brassard, *Proc. IEEE Conf. on Computers, Syst. and Signal Process.*, 175, 1984.

[3] [www.idQuantique.com](http://www.idQuantique.com)

[4] I. Marcikic et al., *Nature*, 421, 509, 2003.

⇒ 1984 par Charles Bennett et Gilles Brassard, on peut transmettre des informations avec la certitude de détecter un espion qui les intercepterait [2]. C'est la « cryptographie quantique ». Ce procédé, dont la faisabilité a été démontrée expérimentalement dès 1993, intéresse évidemment au plus haut point les industriels soucieux de confidentialité, ainsi que les gouvernements.

La mise en œuvre de ce procédé dans des fibres optiques

ordinaires se heurte toutefois à un obstacle important. Malgré leur qualité remarquable, les fibres optiques actuelles perdent en effet la moitié des photons qui y transitent environ tous les 15 kilomètres : après 150 kilomètres, il ne reste donc qu'un photon sur 210, soit environ un millième. Pour les télécommunications optiques classiques, ce n'est pas un problème : des amplificateurs disposés à intervalles réguliers sur la ligne maintiennent le signal à un niveau convenable. Mais pour les télécommunications quantiques une telle solution est exclue : les lois de la mécanique quantique indiquent qu'il ne peut pas exister d'amplificateur qui recopie à l'identique un état quantique non connu à l'avance. L'émission stimulée qui est à la base du processus d'amplification optique s'accompagne en effet nécessairement d'émission spontanée, source de bruit qui masque inévitablement le signal quantique.

### Recours aux répéteurs

C'est là qu'interviendrait utilement un répéteur quantique utilisant la téléportation. Le principe est le suivant. D'abord, on divise la longueur totale en plusieurs tronçons, plus courts. Ensuite, on établit de l'intrication sur chaque tronçon. Enfin, il suffit de téléporter cette intrication d'un tronçon au suivant. On dispose en fin de compte d'une paire intriquée sur toute la longueur, qui est disponible pour procéder à la téléportation d'un photon (ou plutôt, de l'information quantique contenue dans la polarisation d'un photon).

Là encore, plus facile à dire qu'à faire ! D'abord, les fibres optiques et les innombrables composants utilisés en communication optique ont été optimisés et standardisés pour la circulation de photons de longueurs d'onde dites « telecom », comprises entre 1,3 et 1,55 micromètre. Or, il n'existait pas de détecteur de photons individuels à ces longueurs d'onde. C'était d'ailleurs la principale raison pour

## Quel futur pour la téléportation ?

■ **ON A TÉLÉPORTÉ DES ATOMES !** Et demain ? Sera-t-il possible de téléporter des objets plus complexes ? Une molécule, un virus ou ... un être humain ? Quelles sont les limites ? Pour répondre, revenons aux fondamentaux de la téléportation quantique. Pour téléporter des objets, il faut disposer notamment d'un « canal de téléportation » immatériel : un système d'objets intriqués. Or, la taille des objets pouvant être intriqués est limitée par le phénomène dit de « décohérence », qui décrit le passage du monde quantique, celui

de l'infiniment petit, au monde classique, celui de l'expérience sensible.

À la fin des années quatre-vingt-dix, l'équipe du physicien Anton Zeilinger a montré que les fullerènes, des molécules sphériques constituées d'une soixantaine d'atomes de carbone, peuvent se comporter comme des objets quantiques. De là à intriquer des fullerènes puis à les téléporter, il n'y a qu'un pas ! Cela dit, bien que les fullerènes soient des molécules volumineuses, elles sont formées d'atomes identiques et qui ne bougent pas les uns

par rapport aux autres. Ce n'est pas très représentatif de la majorité des molécules pour lesquelles des fluctuations internes favorisent la décohérence. Pour téléporter une protéine, un virus ou un être humain, lequel est formé d'un milliard de milliards de milliard de milliard d'atomes, il aurait un autre problème : la quantité d'information à traiter. Il faut rappeler que seule une propriété quantique binaire portée par un photon ou un atome a été téléportée. La téléportation d'objets usuels reste donc du domaine de la science fiction. F.D.

laquelle les autres groupes d'optique quantique avaient travaillé avec des photons de longueurs d'onde inférieures à 1 micromètre, pour lesquelles ce type de détecteur existait. La première phase de notre travail a donc été la mise au point d'un détecteur. Il est d'ailleurs aujourd'hui commercialisé par une entreprise issue de notre groupe [3]. L'utilisation de fibres optiques sur de longues distances nous a aussi obligés à coder l'état à téléporter et l'intrication dans une autre variable que la polarisation des photons. Celle-ci est en effet perturbée de façon non négligeable dans les fibres optiques et, surtout, de façon variable au cours du temps. Nous utilisons donc deux « modes temporels » : des paires de photons émis avec un très faible décalage dans le temps.

Une autre particularité de notre expérience a été l'utilisation d'une paire de photons intriqués ayant des longueurs d'onde différentes. Ils étaient ainsi plus faciles à séparer, en utilisant des composants optiques assez courants. Comment deux photons de longueurs d'onde différentes peuvent-ils être intriqués ? Simplement parce que, à proprement parler, ce ne sont pas les photons directement qui sont intriqués, mais des grandeurs physiques portées par ces photons, l'amplitude et la phase des modes temporels dans notre cas. Ainsi, rien n'empêcherait non plus un photon d'être intriqué avec un atome, par exemple.

## Permutation d'intrication

Pour la mesure de Bell, nous avons suivi l'exemple du groupe autrichien d'Anton Zeilinger : elle est partielle, ne fonctionnant qu'une fois sur deux, avec une méthode adaptée à nos modes temporels. Comme nos photons intriqués sont à deux longueurs d'onde différentes, notre expérience téléporte donc un état d'un photon à 1,3 micromètre à un photon à 1,55 micromètre. Afin de rendre notre expérience plus réaliste, nous avons laissé le photon-récepteur parcourir deux kilomètres de fibre optique, jusqu'à un autre laboratoire disposé au coin opposé de notre bâtiment (55 mètres en ligne droite) avant de l'analyser. Lors de notre première expérience, en 2002, nous avons obtenu une fidélité de 77 %. Aujourd'hui, avec des interféromètres améliorés, nous obtenons 81 % [4]. Récemment, nous avons testé la « permutation d'intrication », en téléportant un photon intriqué avec un quatrième photon, toujours sur une distance totale de 2 kilomètres. Dans une autre expérience, chacun des trois photons en jeu a parcouru une fibre optique de 2 kilomètres de long, soit une distance totale de 6 kilomètres, divisée en trois tronçons. Nous avons donc montré la faisabilité des différents processus permettant la téléportation à longue distance. Toutefois, les difficultés que nous avons dû surmonter pour réaliser nos expériences nous incitent à la prudence : il reste encore beaucoup de travail avant que cette technologie ne soit utilisable en routine en dehors des laboratoires. ■■

**N. G. et N. C.**