

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.

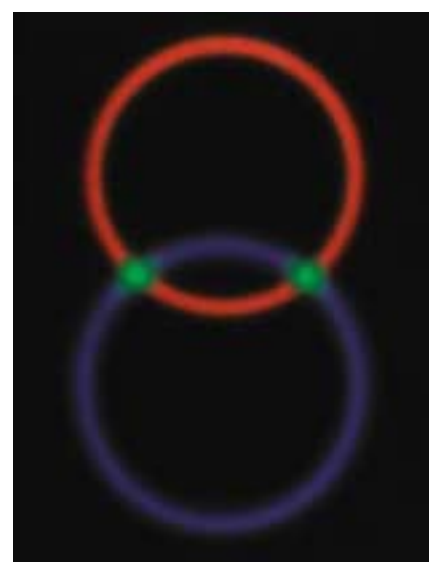
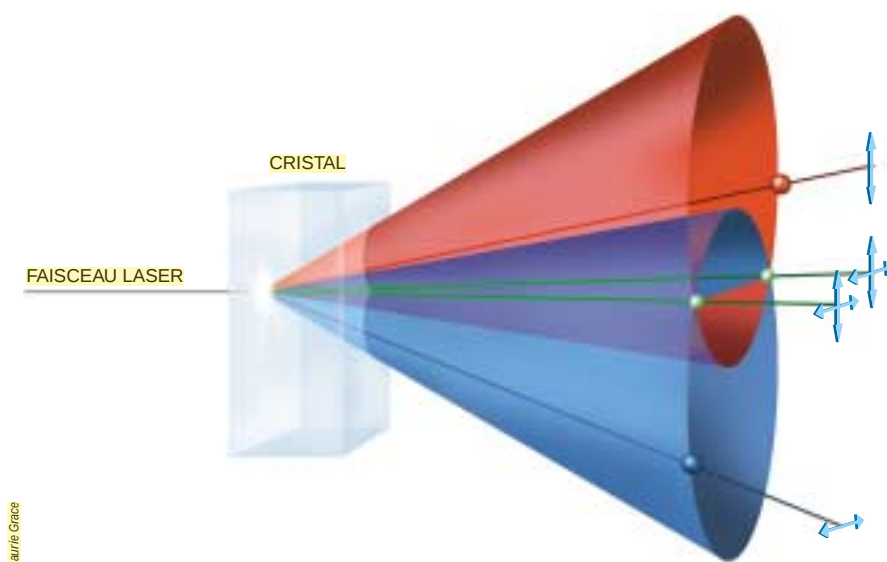
Pour achever la téléportation, Claude doit faire parvenir à Jean un message par des moyens conventionnels comme un appel téléphonique ou une note écrite. Après avoir reçu ce message, Jean peut, si nécessaire, transformer son photon *B* de telle sorte qu'il soit une copie conforme du photon *X* initial. 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.

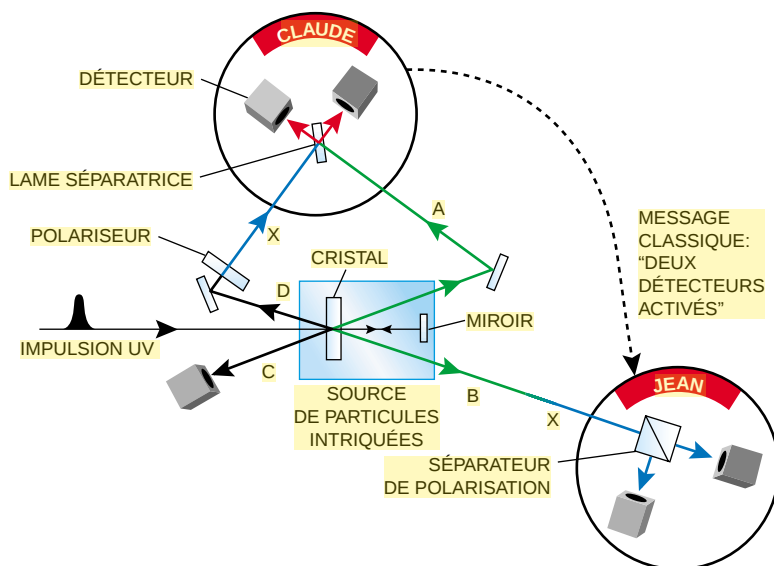
Le résultat obtenu par Claude parmi les quatre résultats possibles est complètement aléatoire et indépendant de l'état d'origine du photon *X* ; Jean ne sait donc pas quel traitement faire subir à son photon tant qu'il ne connaît pas le résultat de la mesure de Claude. Voilà donc pourquoi, afin de finaliser 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.



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

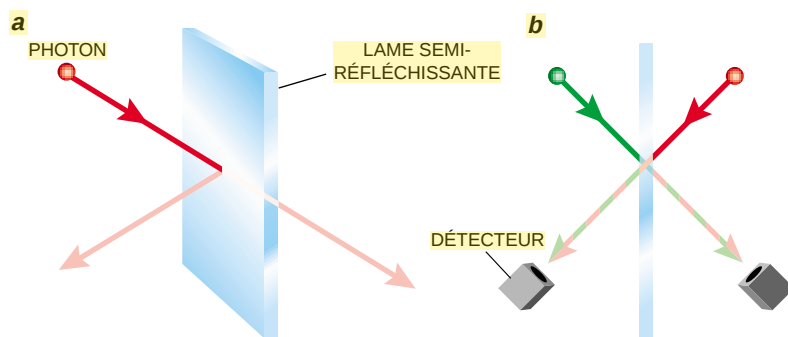
cet état. C'est ainsi que cette procédure contourne le principe d'incertitude d'Heisenberg, qui empêche de déterminer l'état quantique complet d'une particule, mais qui n'interdit pas de téléporter cet état, à condition qu'on ne tente pas de le connaître !

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 impuissante 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 indépendants.



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*.

