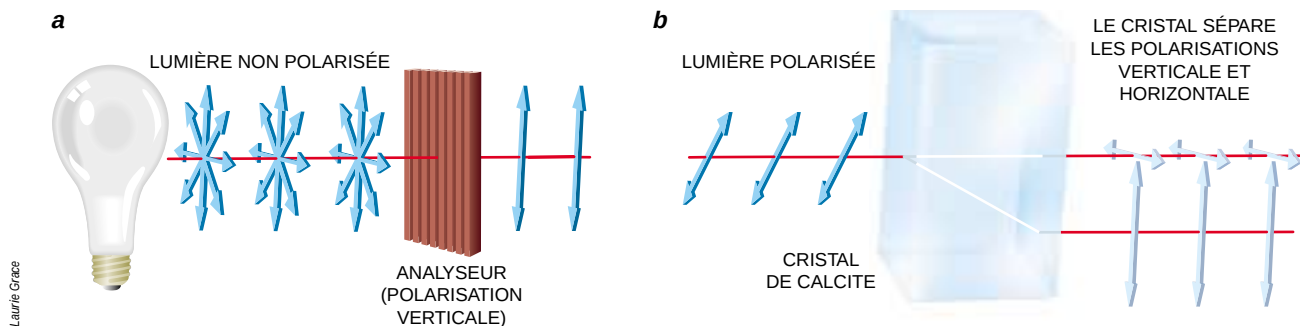




1. LA LUMIÈRE EST À LA FOIS UNE PARTICULE, LE PHOTON, et une onde électromagnétique. La direction de vibration du champ électrique de l'onde électromagnétique est dénommée sa polarisation. La lumière non polarisée est constituée de photons dont le champ électrique, perpendiculaire à la direction de propagation,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

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

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

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

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

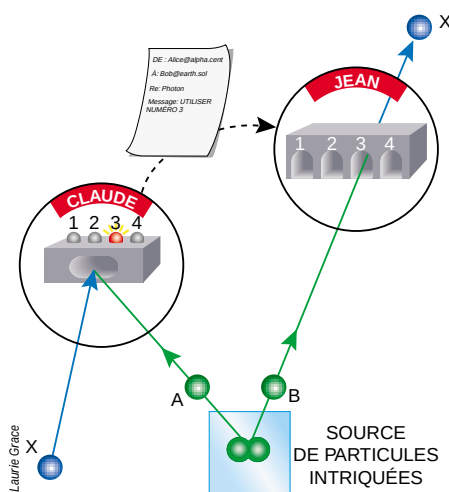
compareront. Tout se passe comme si la mesure du photon de Claude influait magiquement sur le photon de Jean, et vice versa.

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

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

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

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



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

Les photons intriqués au travail

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

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

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

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

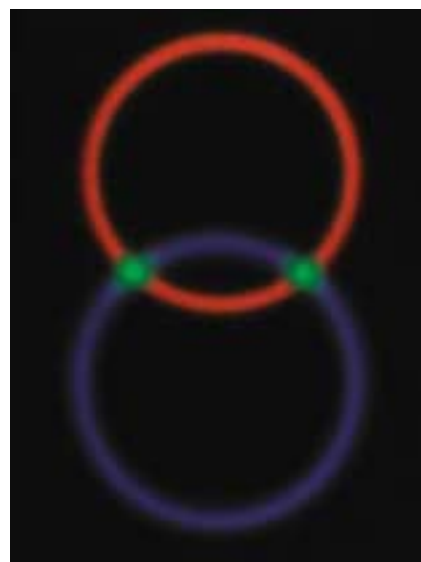
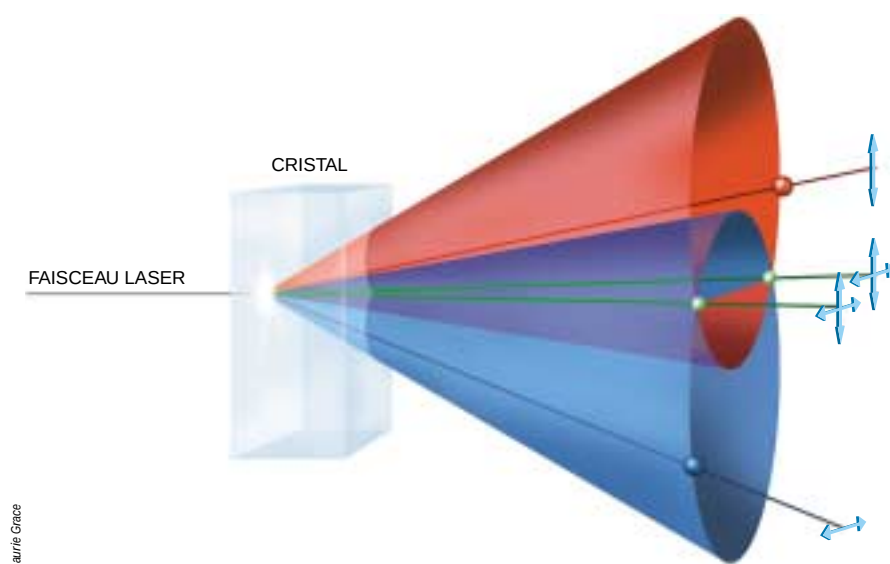
Pour achever la téléportation, Claude doit faire parvenir à Jean un message par des moyens conventionnels comme un appel téléphonique ou une note écrite. Après avoir reçu ce message, Jean peut, si nécessaire, transformer son photon *B* de telle sorte qu'il soit une copie conforme du photon *X* initial.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

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

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

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

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



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

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