

## Les mystères de la physique (5)

# Canal invisible pour la téléportation

En physique quantique, un lien immatériel – l'intrication – semble lier deux particules, même distantes de quelques kilomètres. Et lorsque l'une est influencée, l'autre le sait immédiatement. Mais comment?

**Anton Vos**

Depuis dix ans maintenant, Nicolas Gisin, professeur de physique appliquée à l'Université de Genève, envoie des photons – des grains de lumière – dans des fibres optiques longues de plusieurs dizaines de kilomètres. Les expériences changent d'une fois à l'autre, mais toutes débouchent toujours sur le même résultat: les prédictions de la mécanique quantique, une théorie élaborée au début du siècle passé, sont correctes. Cette affirmation est certainement une bonne nouvelle pour les physiciens. Mais si les mesures comme celles du professeur genevois sont fiables – ce que croit la grande majorité de la communauté scientifique – la froide logique voudrait qu'il y ait quelque chose qui cloche fondamentalement dans notre conception de la nature. Explications.

*C'est la vitesse de la lumière qui n'est plus une limite universelle. Grave accusation!*

Le phénomène qu'étudie Nicolas Gisin est l'intrication. Cette notion est propre au monde de la mécanique quantique, qui régit l'infiniment petit. Elle est à la base de ce que les scientifiques appellent la «téléportation quantique» (lire ci-contre). L'intrication désigne un lien invisible qui peut unir deux particules (ou plus). Il se crée lorsque les particules sont «mêlées» – ou simplement produites par le même processus – et peut se conserver même si elles se séparent à grande distance. Les équations de la mécanique quantique prévoient alors que si l'on agit sur l'une d'elles, alors cela affectera immédiatement l'autre. A l'image de personnes qui affirment avoir une pensée ou ressentir une émotion à l'instant même où un malheur arrive à l'un de leur proche. L'équipe de Nicolas Gisin a vérifié cette propriété sur des paires de photons éloignés de 25 km. Elle a aussi pu déterminer que si cette influence avait été transmise d'un grain de lumière à l'autre, alors elle aurait dû se déplacer à au moins 10 millions de fois la vitesse de la lumière. D'où la tension avec une autre théorie, la relativité générale, pour qui la vitesse de la lumière est une limite absolue que rien ni personne ne peut dépasser.

**Une théorie incomplète?**

A première vue, il semblerait qu'il faille choisir entre la mécanique quantique et la relativité, alors même que les deux théories ont réalisé des prédictions qui se sont avérées par la suite correctes avec des précisions extrêmes. En tout cas, Albert Einstein, qui a contribué à l'élaboration de la mécanique quantique, a toujours estimé que cette dernière était incomplète, notamment en raison du fait qu'elle permet justement la création de paires de particules intriquées pour lesquelles la mesure de propriétés de l'une permet de connaître instantanément les propriétés de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

Dans les années 1960, le physicien irlandais John Bell a conçu une expérience imaginaire dans laquelle on enverrait deux électrons intriqués à des endroits très éloignés. Il propose ensuite aux futurs

expérimentateurs de mesurer une propriété typiquement quantique qu'est le spin (une sorte de rotation intrinsèque de la particule).

Il faut savoir que le spin ne peut occuper que deux états: il est dirigé soit vers le haut, soit vers le bas. Et dans le cas de deux électrons intriqués, si le premier fournit la valeur «haut», alors le second possède un spin opposé, c'est-à-dire «bas». Seulement, dans la mécanique quantique, tant qu'il n'a pas été mesuré, le spin d'un électron est indéterminé. Comme pour toutes les autres grandeurs physiques, il vaut la superposition des deux états possibles en même temps. En d'autres termes, le spin d'un électron est à la fois dirigé vers le haut et vers le bas. Ce n'est qu'au moment de la mesure qu'il se fixera sur une des deux valeurs, un résultat purement probabiliste, impossible à prévoir. Tout ce qu'on sait, c'est qu'après avoir mesuré de nombreuses particules, on obtiendra 50% de spin «haut» et 50% de spin «bas».

Pour tenter de déterminer les résultats possibles que fournirait son expérience, John Bell pose alors deux hypothèses, qualifiées jadis de très raisonnables. La première est que les deux expérimentateurs possèdent leur libre arbitre et peuvent effectuer leur mesure comme bon leur semble. Ils peuvent par exemple choisir librement l'axe selon lequel ils vont mesurer le spin de l'électron. La seconde stipule qu'une mesure réalisée à un endroit ne dépend que des conditions régnant dans son environnement plus ou moins immédiat. Il est notamment impossible qu'une information circule plus rapidement

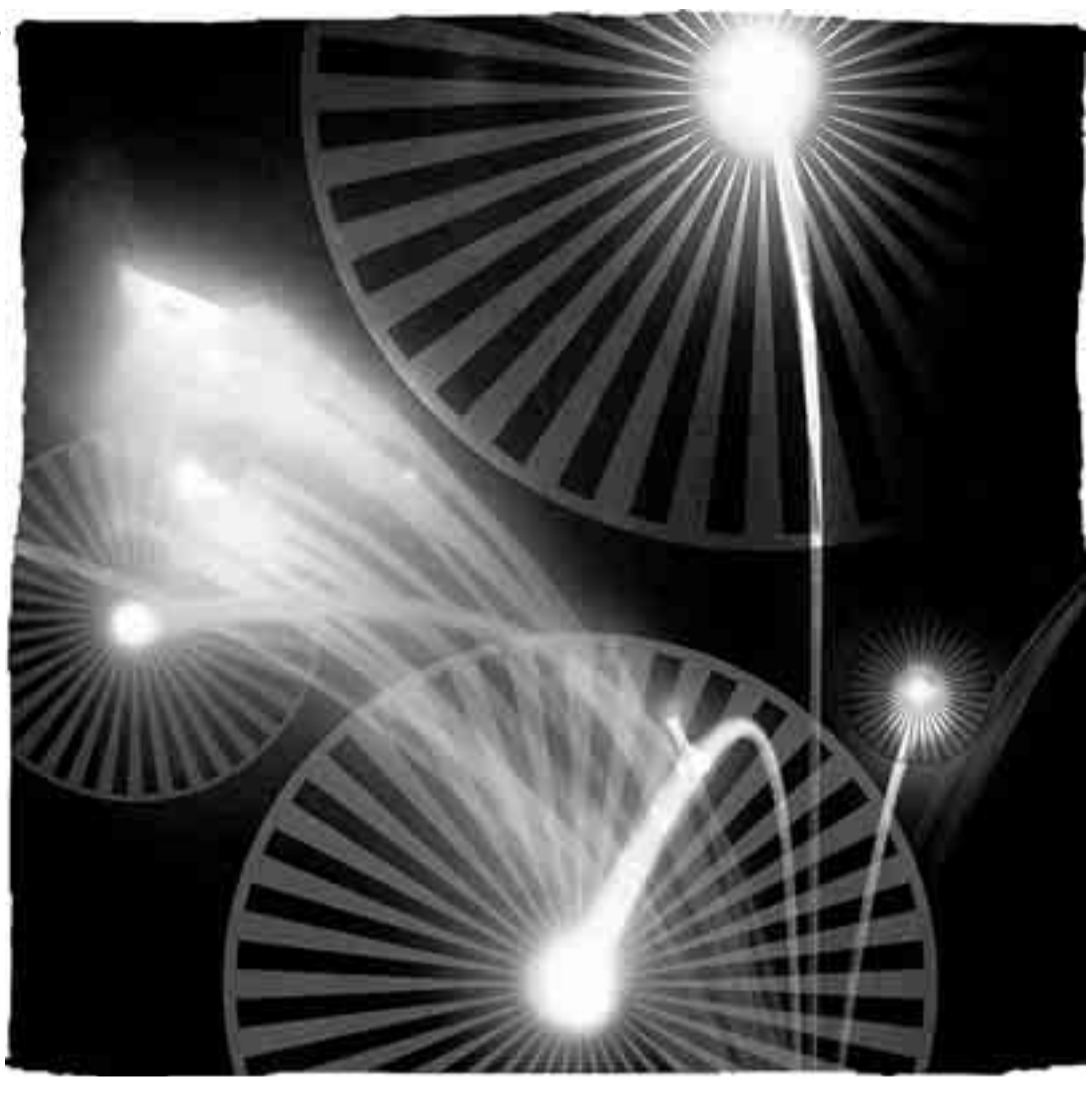
que la vitesse de la lumière pour influencer une expérience. Ainsi, si les mesures sur les deux électrons intriqués sont virtuellement effectuées en même temps, ce qui se passe à un bout ne peut pas affecter ce qui se passe à l'autre.

John Bell développe alors son calcul et aboutit à une équation relativement simple, qui est en fait une inégalité. Cette formule contient et relie les résultats possibles de plusieurs tests expérimentaux. Il montre ensuite que si les hypothèses qu'il a énoncées sont justes – ce que personne n'ose contredire à cette époque –, alors il est possible de monter une expérience capable de mettre en défaut les prédictions de la mécanique quantique. En d'autres termes, la mécanique quantique et les hypothèses de John Bell ne sont pas compatibles. L'une des deux renferme une erreur.

Il faut attendre 1982 pour que la technologie progresse au point de permettre au physicien français Alain Aspect de montrer pour la première fois que l'intrication est une réalité. Depuis, plusieurs groupes, dont celui de Nicolas Gisin, ont répété l'expérience. La physique quantique commence alors à avoir le vent en poupe.

**Une réalité non-locale**

Les hypothèses de Bell traduisent toutefois une vision de la nature tellement ancrée dans les esprits que les premiers soupçons sont allés vers les résultats expérimentaux. Il n'est d'ailleurs pas impossible que les physiciens aient commis des erreurs. Les détecteurs ne sont peut-être pas assez précis – il s'agit tout de même de capter des photons un par



PHOTOMONTAGE: SAMUEL ROUGE

un – et toutes les particules qui sont passées inaperçues permettraient alors de rétablir l'inégalité de Bell. Cependant, avec le temps et la répétition du même résultat, il ne reste plus grand monde pour douter de la réalité de l'intrication. «Je suis convaincu qu'elle existe», souligne Nicolas Gisin. Mais du point de vue de la logique, être convaincu n'est pas un argument suffisant. Il est donc nécessaire de concevoir une expérience qui mette définitivement fin aux doutes. Elle n'existe

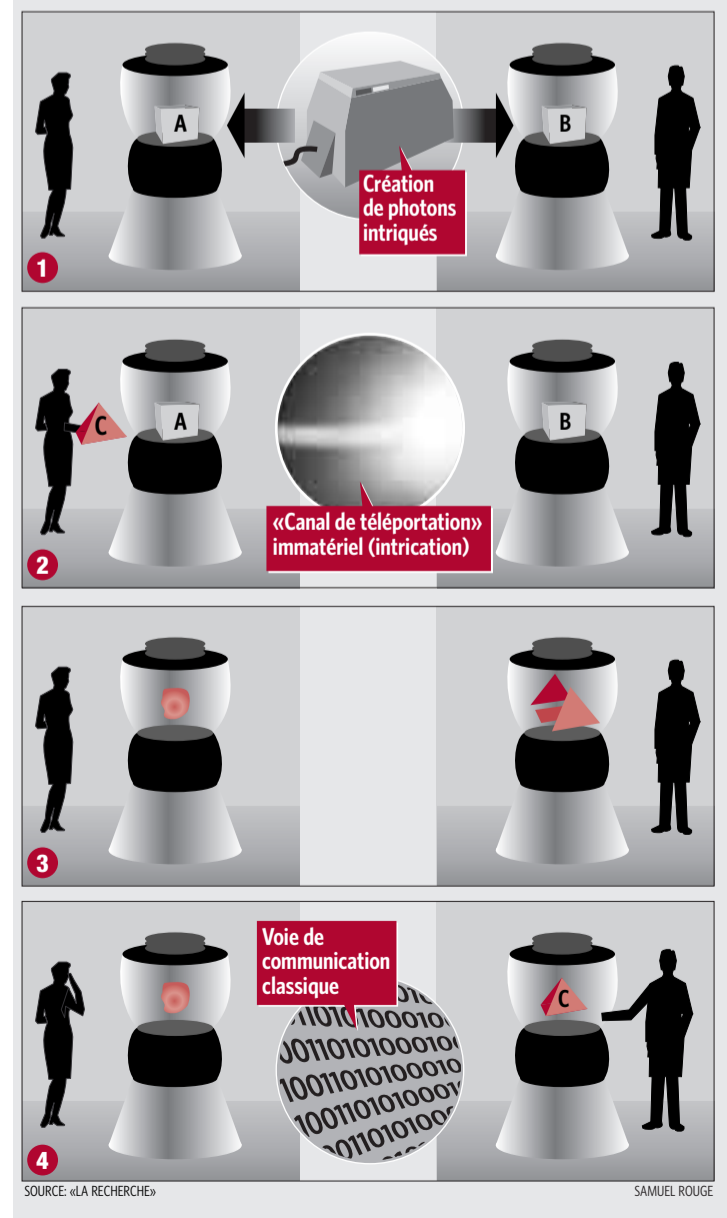
pas encore. Mais elle verra certainement le jour de mon vivant.»

Alors, si l'on admet que l'intrication existe bel et bien, laquelle des deux hypothèses de Bell est défaillante? «Le libre arbitre ne me paraît pas pouvoir être remis en cause», note Nicolas Gisin. Dans le cas contraire, il faudrait admettre que tous les choix des gens sont prédéterminés, que l'univers entier est déterministe. Ce n'est clairement pas mon avis.» Un avis qui implique du coup que c'est la vitesse de la lumière

qui n'est plus une limite universelle. Grave accusation.

«En fait, ce n'est pas exactement cela», précise le professeur. L'intrication montre plutôt qu'il existe une réalité dite non locale. Un même événement peut se dérouler en deux endroits différents. Cela ne pose pas forcément un problème pour la vitesse de la lumière, puisque la physique quantique stipule que cet événement non local est parfaitement indéterminé tant qu'on ne l'a pas mesuré. Le résultat – cela a été vérifié maintes fois – de cette mesure est d'ailleurs totalement aléatoire. Il faut juste admettre que deux particules intriquées partagent le même hasard. Imaginez que deux joueurs soient intriqués et jouent à pile ou face chacun dans son coin. Individuellement, ils obtiendront tous les deux des tirages totalement aléatoires. Mais si l'on compare par la suite les deux listes de résultats, on remarquera qu'elles sont identiques.»

### Mode d'emploi pour téléporter des particules et des atomes



L'intrication quantique, ce lien impalpable qui peut unir deux particules, trouble encore les scientifiques. De cette propriété typique du monde quantique est pourtant déjà née une application fascinante: la téléportation. Inutile de rêver; personne ne parle ici de dématérialiser des objets ou des personnes pour les faire réapparaître ailleurs, comme dans le feuilleton *Star Trek*. Ce que les physiciens parviennent à téléporter, c'est plutôt la «carte d'identité» des particules. Jusqu'en 1993, cette idée avait été bannie pour une simple et bonne raison: le «principe de Heisenberg». Selon ce précepte, effectuer une mesure simultanée et précise de la position et de la vitesse d'une particule est impossible. Comment dès lors téléporter une entité si difficile à appréhender? Voici la marche à suivre.

- 1 Depuis des années, les physiciens parviennent à créer des paires de photons (grains de lumière) intriqués. Si donc l'on «touche» l'un de ces deux «jumeaux», l'autre ressent la même influence, aussi éloigné soit-il, et cela simultanément. Grâce à deux terminaux, Alice et Bob, partagent un couple de tels photons intriqués (A et B).
- 2 Alice veut téléporter chez Bob la particule C, ou du moins sa structure intime, via ce canal immatériel constitué par l'intrication entre A et B. Elle rapproche la particule C de A, puis mesure les caractéristiques de cet amalgame.
- 3 Ce faisant, elle ne mesure aucune particule directement, respec-

tant ainsi le principe de Heisenberg. Mais instantanément, le photon B sent qu'on a «attenté» à l'identité de son jumeau intriqué A, et subit le même effet.

4 Alice envoie alors à Bob, par une voie de communication classique, les résultats de la mesure qu'elle vient d'effectuer. Sur la base de ces informations, Bob n'a plus qu'à ajuster l'identité du photon B – qui n'est en fait déjà plus B –, de sorte qu'il se transforme en une réplique parfaite de la particule originale C.

Les démonstrations de la téléportation quantique sur courte distance datent de 1997. En 2003, l'équipe genevoise de Nicolas Gisin la reproduit, mais avec cette fois des photons éloignés de 6 km. Enfin, en juin 2004, des physiciens autrichiens et américains téléportent même des atomes. Mais pour l'instant, difficile d'aller plus loin: l'intrication reste une propriété confinée au monde atomique, quantique, différent de notre environnement macroscopique.

Les chercheurs pensent par contre déjà à des applications. En informatique, la téléportation permettrait de transmettre des informations, créant ainsi des ordinateurs quantiques bien plus puissants que les machines actuelles. Et en cryptographie, des données pourraient être véhiculées par téléportation de façon très sûre: vu que le canal de transfert – l'intrication – est immatériel, comme imaginaire, personne ne peut intercepter le message. **Olivier Dessibourg**

**Demain:  
La Terre à cœur ouvert**