

> Le théorème de Bell fournit ainsi des inégalités qui posent une limite supérieure aux corrélations qu'il est possible d'avoir dans n'importe quelle théorie locale à variables cachées. Si les données expérimentales dépassent cette limite (si elles «violent» les inégalités de Bell), cela signifie que les théories à variables cachées ne décrivent pas la nature.

Peu après la publication de Bell, le physicien John Clauser, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont trouvé des inégalités similaires, mais plus faciles à tester dans des expériences. Les chercheurs ont effectué les premières mesures à la fin des années 1960, et, depuis, les expériences n'ont cessé de se rapprocher du dispositif idéal proposé par Bell. Les expériences ont trouvé des corrélations qui violent l'inégalité de Bell, ce qui éliminait les théories locales à variables cachées. Mais jusqu'en 2015, toutes ces expériences reposaient sur une ou plusieurs hypothèses *ad hoc* à cause d'imperfections des dispositifs. Ces hypothèses comportaient des failles que les théories locales à variables cachées pouvaient en principe exploiter pour réussir le test.

Dans presque toutes les expériences de ce type au xx^e siècle, les scientifiques ont produit des photons intriqués à partir d'une source, et les ont envoyés dans des stations de mesure (représentant Alice et Bernard). Ces dernières enregistraient la polarisation d'un photon de la paire, c'est-à-dire la direction dans laquelle oscille le champ électrique du photon. Les chercheurs calculaient alors les corrélations moyennes entre les résultats des deux stations et examinaient si les inégalités de Bell étaient respectées ou violées.

Dans les premières expériences, les mesures étaient effectuées selon des directions fixes. Dans ce cas, une interaction avait le temps de s'établir entre les dispositifs et créer d'éventuelles corrélations. Autrement dit, des signaux cachés indiqueraient à Bernard, sans voyager plus vite que la lumière, quelle direction Alice a utilisée pour mesurer son photon. Cette «échappatoire (ou faille) de localité» signifie qu'une théorie locale à variables cachées obtiendrait les mêmes corrélations que la théorie quantique.

En 1982, Alain Aspect, de l'Institut d'optique, à Orsay, et ses collègues ont effectué un test amélioré dans lequel les photons étaient envoyés à deux extrémités d'une pièce. Pendant que ces photons intriqués étaient en vol, l'angle de polarisation du dispositif de mesure changeait périodiquement. À la fin des années 1990, Anton Zeilinger, aujourd'hui à l'université de Vienne, et son équipe ont perfectionné cette stratégie en utilisant des directions de mesure de polarisation vraiment aléatoires (et non simplement périodiques) et déterminées juste avant que les mesures n'aient lieu. Si les signaux cachés



existent, ils devraient se propager plus vite que la lumière pour influencer sur ces mesures. La faille de localité était hermétiquement comblée.

Mais ces expériences présentaient un inconvénient de taille : il est difficile de travailler avec des photons, particules qui peuvent se perdre en vol ou tout simplement ne pas être vues par les détecteurs. La plupart du temps, une mesure ne donnait pas de résultat, car les photons se perdaient en chemin. Les expérimentateurs étaient obligés d'éliminer les mesures ratées et de supposer que les mesures réussies étaient représentatives de l'ensemble des paires intriquées (l'«hypothèse d'échantillonnage sans biais»). Sans cette supposition, il est impossible de garantir que l'ajout des photons perdus ne donne pas un résultat compatible avec les théories à variables cachées.

ÉLIMINER LES FAILLES

Les scientifiques ont éliminé cette échappatoire de détection au début de ce siècle, en abandonnant les photons au profit d'autres systèmes intriqués et mesurés avec une bonne efficacité : des ions piégés, des atomes et des circuits supraconducteurs. Le problème est que, dans ces cas, les contraintes techniques imposaient que les particules soient assez proches, ce qui laissait ouverte la faille de localité. Un test de Bell pour lequel toutes les



échappatoires seraient supprimées est devenu l'un des grands défis de la science quantique.

Grâce aux progrès réalisés dans le contrôle et la mesure des systèmes quantiques, il est devenu possible en 2015 d'effectuer un test de Bell avec un dispositif idéal, un test de Bell sans échappatoire. En fait, en peu de temps, quatre groupes différents de physiciens ont trouvé des résultats violant les inégalités de Bell tout en éliminant les deux échappatoires. Ces expériences ont ainsi fourni des preuves indiscutables qui réfutent les théories locales à variables cachées.

TÉLÉPORTATION D'INTRICATION

L'un d'entre nous (Ronald Hanson) a effectué avec ses collègues la première expérience éliminant toutes les échappatoires à l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas (voir la photo ci-dessus et l'encadré page suivante). Nous avons intriqué les spins de deux électrons présents chacun dans un défaut cristallin d'un diamant, c'est-à-dire dans un site où il manque un atome de carbone. Les deux électrons intriqués étaient dans des laboratoires situés de part et d'autre du campus, et pour être sûrs qu'aucune communication n'était possible entre les deux, nous avons utilisé un générateur de nombres aléatoires rapide pour sélectionner la direction de mesure. Cette mesure était finalisée et enregistrée localement sur un disque dur avant que

la moindre information concernant la mesure de l'autre côté n'ait eu le temps d'arriver, même à la vitesse de la lumière. Un signal caché indiquant à l'un des dispositifs de mesure la direction utilisée par l'autre n'aurait pas eu le temps de faire le trajet entre les deux laboratoires: on contrôlait ainsi entièrement la faille de localité.

Ce chronométrage strict a imposé de séparer les deux électrons de plus de 1 kilomètre, une distance supérieure de deux ordres de grandeur aux précédents records mondiaux pour des particules intriquées. Comment intriquer des électrons sur une telle distance? Nous avons utilisé une technique nommée «téléportation d'intrication», où l'on commence par intriquer chaque électron avec un photon. Nous envoyons alors les photons à la rencontre l'un de l'autre, à mi-chemin des deux laboratoires. Ils se retrouvent sur un miroir semi-réfléchissant où nous avons placé des détecteurs de chaque côté. Si nous détectons les photons sur des côtés opposés du miroir, alors les spins des électrons intriqués avec chaque photon deviennent eux-mêmes intriqués. En d'autres termes, l'intrication entre les électrons et les photons est transférée aux deux électrons.

Ce processus de transfert échoue souvent, car les photons se perdent entre les diamants et le miroir, comme dans les expériences précédentes. Mais nous ne lançons un test de Bell que si les deux photons sont détectés; ainsi, nous >

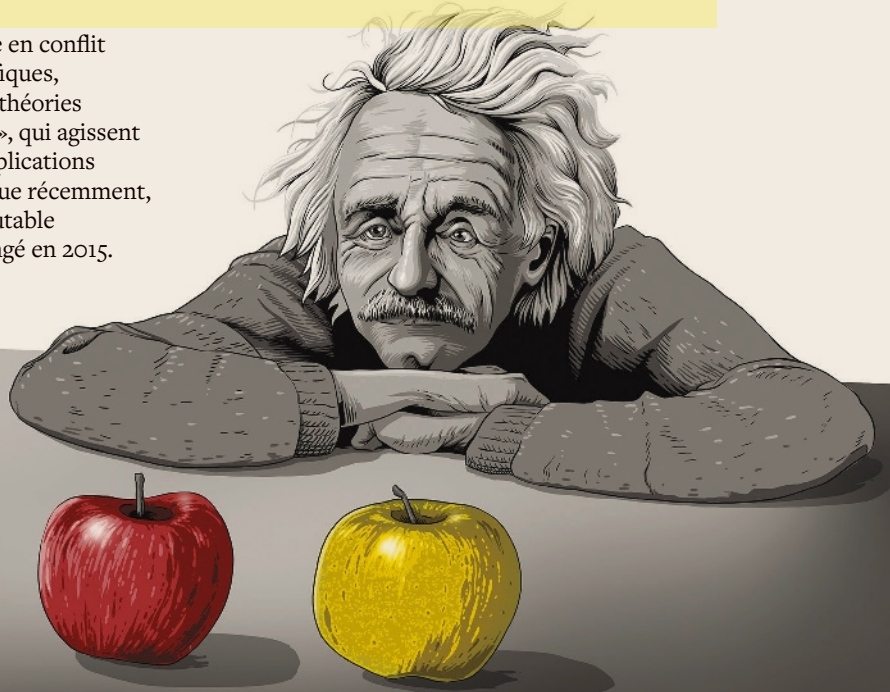
Vue d'ensemble du campus de l'université de Delft, aux Pays-Bas, où Ronald Hanson et ses collègues ont réalisé leur expérience du test de Bell sans faille. Les stations (à gauche et en haut à droite) hébergent les cristaux au sein desquels des électrons peuvent être intriqués à distance par l'intermédiaire de photons qu'ils émettent. Les stations sont distantes de 1280 mètres, mais sont reliées à une station intermédiaire qui assure la bonne réception et l'intrication des photons émis par les deux cristaux.

ÉLIMINER TOUTES LES ÉCHAPPATOIRES

La physique quantique décrit un univers qui entre en conflit avec notre intuition de la réalité. Certains scientifiques, en particulier Albert Einstein, ont espéré que des théories alternatives incluant des variables dites «cachées», qui agissent en coulisses, feraient disparaître certaines des implications les plus déroutantes de la théorie quantique. Jusque récemment, aucune expérience n'a pu exclure de façon indiscutable les variables cachées locales, mais la donne a changé en 2015.

Les objections d'Einstein à la physique quantique reposaient sur deux principes fondamentaux : le **réalisme** et la **localité**.

Le réalisme est la notion selon laquelle les objets ont des propriétés déterminées : une pomme, par exemple, est rouge, ou jaune.
La localité est l'idée selon laquelle les objets n'interagissent qu'avec leur environnement direct ; les influences ne peuvent se propager plus vite que la lumière.



Mais la théorie quantique brosse de la réalité un tableau beaucoup plus étrange que cela.



Selon la physique quantique, une particule peut être dans deux états à la fois (dans une superposition d'états).

Par exemple, une pomme quantique...



... peut ne pas être rouge ou...

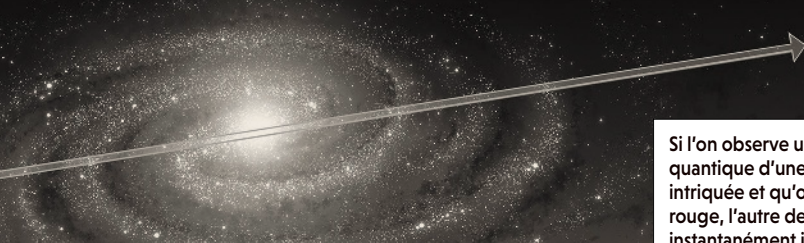


... jaune mais...



... une superposition des deux.

Les particules peuvent même être intriquées. Comme si c'était un système fait d'une pomme rouge et d'une pomme jaune, mais sans que chaque pomme ait une couleur définie avant d'être vue.



Si l'on observe une pomme quantique d'une paire intriquée et qu'on la trouve rouge, l'autre devient instantanément jaune, quelle que soit leur distance mutuelle.

Einstein n'admettait pas ce phénomène, qu'il qualifiait de « fantomatique action à distance ». Pour éviter d'invoquer des influences se propageant plus vite que la lumière, il supposait l'existence de variables cachées locales, inconnues des observateurs et censées contrôler cette intrication.

