

Certains chercheurs préconisent de créer un indice pour quantifier la fiabilité d'un résultat

également un coût, ont également été reproduits avec succès. Les expériences de réplication ont confirmé que l'on effectue plus rapidement une tâche lorsque la précédente est identique. Dans une série de chiffres qui défilent, on déterminera ainsi plus vite ceux qui sont impairs si l'on ne fait que cela, par rapport au cas où l'on doit alterner avec une autre tâche, comme «indiquer si un chiffre est supérieur à 5.»

Même quand une expérience de réplication échoue, les «grandes conclusions» restent souvent valides, car elles reposent sur tout un faisceau d'études. Prenons le cas d'un autre effet classique de la psychologie, l'«amorçage». Il est bien établi que des mots ou des personnes peuvent influencer inconsciemment nos jugements et nos décisions, notamment en activant des stéréotypes: une fille obtiendra ainsi de moins bons résultats en mathématiques si on lui rappelle qu'elle est une fille. L'étude sur le Trivial poursuit, que nous avons mentionnée précédemment, s'inscrivait dans ce contexte: l'idée était que l'image mentale d'un professeur «amorçé» l'intelligence et la recherche de connaissances dans notre esprit. Le fait que la réplication ait échoué n'invalide pas les très nombreuses études publiées dans le domaine de l'amorçage, qui reste un phénomène psychologique robuste. De même, le semi-échec de la réplication du test du marshmallow n'annule pas l'ensemble des recherches sur la maîtrise de soi.

Les fondements de la psychologie scientifique sont donc solides. La crise de la réplication a permis, non pas de décrédibiliser cette discipline, mais au contraire d'en redorer le blason en attestant de sa maturité et de sa capacité à se questionner. Elle nous rappelle aussi le caractère provisoire des connaissances scientifiques.

En 1938, le célèbre épistémologue Gaston Bachelard écrivait à leur propos: «Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit.» Gardons donc à l'esprit que les connaissances sont des constructions, elles-mêmes amenées à être, un jour ou l'autre, déconstruites pour être mieux reconstruites par la suite.

DES IDÉES QUI RESTENT INFLUENTES BIEN APRÈS LEUR RÉFUTATION

Le problème est que les résultats les plus étonnants se propagent comme une traînée de poudre, aussi bien chez les scientifiques (l'étude du stylo dans la bouche a été citée par près de 2000 articles scientifiques, d'après *Google Scholar*) que dans le grand public. Et même lorsqu'ils sont réfutés, ils continuent à circuler, voire à être dévoyés. Dans une conférence TED sur le langage corporel datant de 2012, Amy Cuddy, qui avait participé à l'étude «montrant» l'influence du *power posing*, la fameuse posture conquérante avec les bras en V, conseille d'adopter cette posture juste avant un entretien d'embauche et mentionne l'étude du stylo dans la bouche. Cette conférence est encore visible sur Internet et cumule un audimat impressionnant: elle a été visionnée plus de 50 millions de fois.

Une très grande prudence reste donc de mise avant d'utiliser les découvertes de la science à des fins commerciales ou politiques. Harold Pashler, de l'université de Californie à San Diego, préconise de créer un indice spécifique et de le mentionner dès que l'on cite un résultat scientifique. L'indice 1, le plus fiable, serait réservé à des études répliquées une ou plusieurs fois. L'indice 2 serait accordé à des résultats non répliqués, mais dotés d'une bonne puissance statistique (impliquant de multiples mesures et de nombreux participants), tandis que les études d'une puissance plus faible auraient un indice 3 et devraient être considérées comme préliminaires. Seuls les résultats d'indice 1 seraient alors mûrs pour une éventuelle exploitation commerciale ou politique.

C'est ainsi que pourraient être limités les malentendus et les interprétations abusives, tout en conservant le droit à l'erreur. Émettre des hypothèses erronées n'est pas une honte, bien au contraire: c'est inhérent à la recherche. De même, il est normal qu'un certain nombre d'expériences préliminaires ne soient pas confirmées par la suite. L'important est de savoir abandonner une piste qui a débouché sur une impasse. Pour l'astronome américain Phil Plait, «une partie du processus [de la science], c'est admettre qu'on a parfois tort. Et ça peut être vraiment très, très dur. [...] Mais la contrepartie est la meilleure qui soit: savoir et comprendre». ■

BIBLIOGRAPHIE

D. E. Huber et al., **Less "story" and more "reliability" in cognitive neuroscience**, *Cortex*, vol. 113, pp. 347-349, 2018.

H. Pashler et C. R. Harris, **Is the replicability crisis overblown? Three arguments examined**, *Perspectives on Psychological Science*, vol. 7, pp. 531-536, 2012.

J. P. A. Ioannidis, **Why most published research findings are false**, *PLoS Medicine*, vol. 2, pp. 696-701, 2005.

G. Bachelard, **La Formation de l'esprit scientifique**, Librairie philosophique J. Vrin, 1938.

L'intrication quantique défie l'intuition physique classique. Elle établit un lien instantané entre deux particules (en rouge et en bleu) même si elles sont très éloignées l'une de l'autre.

L'ESSENTIEL

> En 1964, le physicien John Bell a montré comment tester la nature de l'intrication quantique, phénomène par lequel deux particules conservent un lien « fantomatique » même quand elles sont très éloignées l'une de l'autre.

> Pour Einstein, l'intrication était la preuve que la physique quantique était incomplète : des « variables cachées locales » expliqueraient le phénomène.

> Plusieurs équipes ont mis en œuvre le test de Bell. Les résultats semblaient

écarter l'hypothèse des variables cachées et confirmaient les prédictions de la physique quantique. Mais ces expériences comportaient des failles (ou « échappatoires »), qui ne permettaient pas d'éliminer complètement l'hypothèse de variables cachées agissant en coulisses.

> Finalement, en 2015, plusieurs groupes ont réalisé les premiers tests de Bell sans échappatoire, qui excluent définitivement toute explication par des variables cachées locales.

LES AUTEURS



RONALD HANSON
physicien
à l'université
de technologie
de Delft,
aux Pays-Bas



KRISTER SHALM
physicien au NIST
(Institut américain
des normes et
de la technologie)
et à l'université
du Colorado
à Boulder

Certaines révolutions débutent très discrètement. Ce fut le cas de celle entamée en 1964, lorsque le physicien britannique John Bell, alors au Cern, expliqua comment répondre à une question philosophique profonde qui avait beaucoup préoccupé les fondateurs de la physique quantique. Il s'agissait de savoir si des particules séparées par de grandes distances conservent un lien tel que des mesures effectuées sur l'une influent instantanément sur l'autre. En physique classique, une telle influence est impossible, car aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Mais dans le cadre de la théorie quantique, cela semble être le cas. Grâce aux inégalités mathématiques qu'il a trouvées, Bell a ouvert la possibilité de sonder la nature de ce lien.

Pour comprendre ce que Bell a fait, nous devons revenir aux racines de la physique quantique. Les règles de cette théorie décrivent le comportement de la lumière et de la matière aux plus petites échelles. Les atomes, les électrons, les photons et les autres particules subatomiques ont un comportement différent des objets macroscopiques du quotidien. L'une des principales différences est que ces particules existent dans des états marqués du sceau de l'incertitude. Prenez par exemple le >

- spin (moment cinétique intrinsèque) d'un électron, une propriété purement quantique. Si un électron dont le spin est orienté horizontalement traverse un champ magnétique orienté verticalement, le spin basculera vers le haut avec une probabilité de 50%, et vers le bas avec une probabilité de 50%, le résultat étant vraiment aléatoire par nature.

Comparez cela à une pièce que l'on tire à pile ou face. Nous sommes tentés de penser que le lancer de pièce est aussi aléatoire, mais si nous connaissons précisément la masse de la pièce, la force employée pour la lancer, les détails des courants d'air qui l'atteignent, etc., nous pourrions prédire comment la pièce va retomber. Le caractère aléatoire provient dans ce cas d'un manque d'information sur le système.

UN ALÉA FONDAMENTAL

Pour le spin de l'électron, c'est une toute autre affaire. Même si nous connaissons parfaitement toutes les propriétés de l'électron et de son spin avant qu'il ne traverse le champ magnétique, l'incertitude quantique nous empêche de prévoir de quel côté le spin basculera. Avec un spin initial horizontal, l'électron est dans une superposition à poids égaux des états de spin «haut» et «bas». Si une mesure est réalisée sur l'électron selon l'axe vertical, cette superposition cesse d'exister: elle se réduit à l'un de ses termes et l'on obtient un résultat unique; on mesure un spin orienté soit vers le haut, soit vers le bas.

Quand les physiciens ont développé la théorie quantique au début du xx^e siècle, certains de ses fondateurs, comme Albert Einstein et Erwin Schrödinger, étaient gênés par le flou des états quantiques. Selon eux, la nature ne peut pas être vraiment floue, et une théorie allant au-delà de la physique quantique devrait prédire exactement le comportement des particules. Il serait alors possible de prévoir le résultat d'une mesure du spin de l'électron de la même façon qu'il est possible de savoir comment une pièce va retomber si vous détenez assez d'information.

Plus surprenant encore, une superposition d'états peut s'étendre sur deux particules ou plus, un phénomène que Schrödinger a nommé intrication (*Verschränkung* en allemand). D'après la théorie quantique, les propriétés des particules peuvent être intriquées de telle façon que leur valeur d'ensemble soit bien connue, mais que les valeurs individuelles restent complètement incertaines – un peu comme si l'on avait deux dés spéciaux qui, quand on les lance, donneraient chacun un résultat aléatoire, mais dont la somme serait toujours égale à 7.

Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen (le fameux trio EPR) ont analysé les conséquences de l'intrication. Imaginez que les spins de deux électrons soient intriqués de telle sorte que quand on les mesure selon un même axe,

on obtiendra toujours des valeurs opposées. Par exemple, si l'on mesure le spin d'un des électrons et qu'on trouve qu'il pointe vers le haut, l'autre pointera vers le bas. Cette corrélation tient toujours, même si les électrons sont très distants l'un de l'autre. Alors que l'état du premier électron ne devient déterminé qu'au moment de la mesure, il n'a aucun moyen de communiquer ce résultat à son partenaire. Comment la seconde particule «sait-elle» que le spin de la première pointe vers le haut? Einstein a qualifié cette synchronisation de «fantomatique action à distance».

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen ont publié un article désormais célèbre sur ce problème. Ils se sont appuyés sur deux hypothèses raisonnables. Premièrement, si l'on peut prédire avec certitude le résultat d'une mesure sur un système, celui-ci doit avoir une certaine propriété qui correspond à ce résultat. Einstein a nommé de telles propriétés des «éléments de réalité». Par exemple, si nous savons que le spin d'un électron pointe vers le haut, nous pouvons prédire avec certitude que s'il se propage dans un champ magnétique approprié, il sera toujours dévié vers le haut. Dans cette situation, le spin de l'électron serait un élément de réalité.

Deuxièmement, un événement survenant à un endroit ne peut pas affecter instantanément un événement lointain; les influences se propagent, au mieux, à la vitesse de la lumière. C'est le principe dit «de localité».

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.



© Université de Delft

À partir de ces deux principes, imaginons deux électrons intriqués tenus à distance par deux personnes, Alice et Bernard. Supposons qu'Alice mesure le spin de son électron selon la direction z . À cause de la parfaite anticorrélation du système intriqué, elle sait aussi quel sera le résultat si Bernard mesure le spin de son électron le long de la direction z . Dès lors, selon EPR, la composante en z du spin de l'électron de Bernard serait un élément de réalité. De la même façon, si Alice décide de mesurer plutôt le spin selon la direction x , elle connaîtra avec certitude le résultat de la mesure du spin de l'électron de Bernard selon l'axe des x . Dans ce cas, la composante en x du spin de l'électron de Bernard est un élément de réalité.

Mais Alice et Bernard étant très éloignés l'un de l'autre, la décision d'Alice de mesurer selon l'axe des x ou des z ne peut pas influencer sur ce qui se passe chez Bernard (principe de localité). Par conséquent, pour rendre compte des anticorrélations, la valeur du spin de l'électron de Bernard doit être parfaitement prévisible le long de l'axe des z comme de celui des x . Or cette conclusion est en contradiction avec la théorie quantique, dont les lois imposent que si le spin a une valeur bien définie dans une direction, il est nécessairement flou dans les autres.

Cette incohérence a conduit Einstein et ses collègues à conclure que la théorie quantique est incomplète. Ils ont suggéré qu'il serait possible de résoudre cette contradiction en complétant la théorie par des variables supplémentaires

inaccessibles pour Alice et Bernard (on parle de variables cachées). En d'autres termes, il existerait une théorie plus fondamentale que la physique quantique dans laquelle les électrons ont des propriétés supplémentaires par rapport à celles connues. Celles-ci décriraient comment les électrons se comportent lorsqu'on les mesure conjointement. Si nous y avions accès à ces variables cachées, nous pourrions prédire ce qui arriverait aux électrons. Le flou apparent des particules quantiques résulterait ainsi de notre ignorance. Pour désigner cet éventuel successeur de la physique quantique, les physiciens parlent de «théorie locale à variables cachées». Le qualificatif «local» se réfère ici au fait que les signaux cachés ne peuvent pas se propager plus vite que la lumière.

Pour les défenseurs de la physique quantique, tel le Danois Niels Bohr, celle-ci était complète et l'intrication ne créait pas de contradiction, considérant que la physique quantique est non locale par nature.

BELL RELANCE LE DÉBAT

Einstein ne mettait pas en doute les prédictions de la physique quantique elle-même; il pensait qu'il existait une vérité plus profonde qui gouverne la réalité. Après l'article EPR de 1935, l'intérêt pour ces questions fondamentales posées par la physique quantique est retombé. La possibilité des variables cachées a été considérée comme une question philosophique sans importance pratique, car on pensait que les ➤

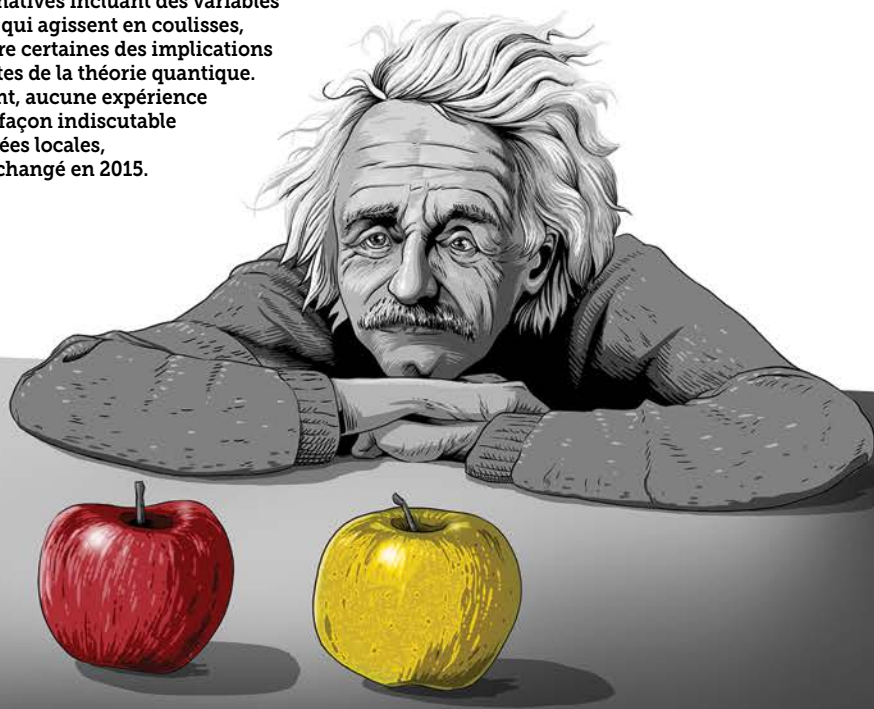


ÉLIMINER TOUTES LES ÉCHAPPATOIRES

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. Jusqu'à récemment, aucune expérience n'a pu exclure de façon indiscutable les variables cachées locales, mais le tableau 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...



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.



En 1964, John Bell a découvert que la théorie quantique donne des prédictions différentes des théories faisant intervenir des variables cachées locales. Il a trouvé un moyen de tester l'existence de celles-ci.

Le test de Bell : Deux observateurs feraient des mesures séparées de deux particules censées être intriquées. Bell a calculé la corrélation maximale qu'il pourrait y avoir entre les mesures des deux observateurs si des variables locales, limitées par la vitesse de la lumière, étaient impliquées.



Les chercheurs ont rapidement commencé à mettre en œuvre le test. Mais il restait deux failles qui laissaient un peu de marge pour d'éventuelles variables cachées.



1. Faille de localité

Les stations de mesure sont assez proches pour que les deux particules s'échangent des signaux à des vitesses inférieures à la lumière pendant le test.

2. Faille de détection

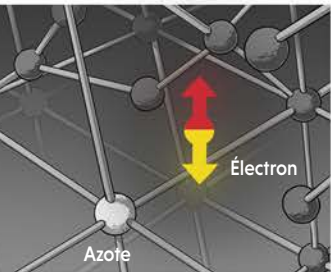
Les détecteurs ne peuvent mesurer qu'une partie des particules intriquées.

En 2015, plusieurs groupes de scientifiques ont conçu des versions du test de Bell qui éliminent les deux échappatoires. L'une d'elles, à l'université de technologie de Delft, a pour point de départ deux minuscules diamants.



Dans le réseau cristallin presque parfait du diamant, il existe occasionnellement un défaut : un atome d'azote.

Dans certains endroits, à côté d'un tel atome d'azote, il manque un atome de carbone, un « défaut » qui se comporte comme un piège à électrons.



Les électrons sont dotés d'un spin...

Haut Bas



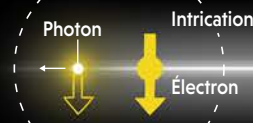
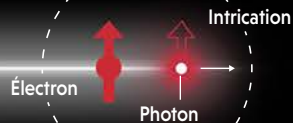
Ou en superposition, à la fois haut et bas

En utilisant deux électrons, dans deux diamants séparés de 1 280 mètres, les scientifiques sont sûrs qu'il n'y a pas assez de temps pour un échange de signal, même à la vitesse de la lumière, dans l'intervalle de temps qui sépare le choix d'orientation des détecteurs et la mesure des spins des électrons.

Faille de localité éliminée

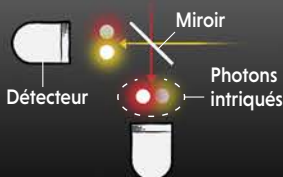


Avec des lasers, les physiciens excitent les électrons, qui émettent alors des photons intriqués avec leur état de spin.



Ces photons traversent le campus jusqu'à ce qu'ils se rencontrent dans un détecteur.

Quand les photons se rencontrent, ils s'intriquent. Par extension, leurs électrons respectifs (qui sont plus faciles à détecter et mesurer que les photons) s'intriquent eux aussi.



Faille de détection éliminée

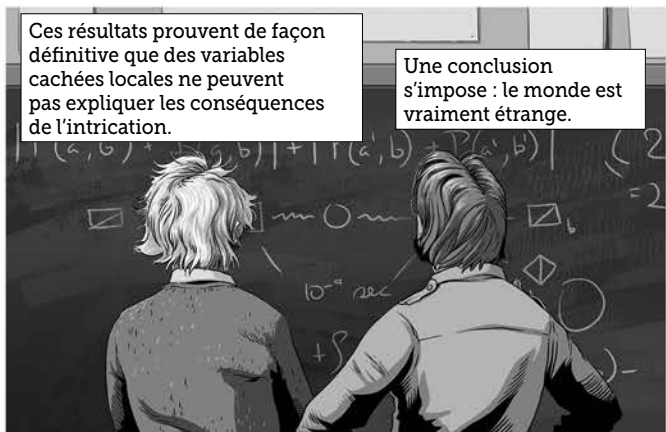
Pour la première fois, un test de Bell sans faille



À Delft, les physiciens ont effectué 245 mesures portant sur une paire d'électrons intriqués. Ils ont mesuré leurs spins dans chaque cas et ont trouvé que 80 % étaient corrélés, soit beaucoup plus qu'on n'obtiendrait avec des variables cachées locales. D'autres expériences ont donné des résultats similaires.

Ces résultats prouvent de façon définitive que des variables cachées locales ne peuvent pas expliquer les conséquences de l'intrication.

Une conclusion s'impose : le monde est vraiment étrange.



> prédictions des théories avec ou sans variables cachées seraient identiques. Mais tout cela a changé en 1964, quand Bell a montré que dans certaines circonstances, les prédictions des théories à variables cachées diffèrent de celles de la physique quantique. Il serait possible de tester avec une expérience si des variables cachées existent et expliquent l'intrication quantique.

Bell a reconsidéré l'expérience de pensée EPR, mais avec une petite variante qui change la donne: il laissait Alice et Bernard mesurer le spin de leurs électrons respectifs dans n'importe quelle direction. Dans l'expérience de pensée initiale, Alice et Bernard mesurent les spins selon le même axe et trouvent donc des résultats anticorrélés à 100%: ainsi, pour l'axe vertical, si Alice mesure «haut», alors Bernard mesure toujours «bas», et inversement. En revanche, si Alice et Bernard mesurent le long d'axes différents, les corrélations entre les résultats sont plus complexes, et c'est là qu'apparaissent les différences entre la théorie quantique et les théories à variables cachées.

Bell a montré que pour certains ensembles de directions, les corrélations entre les mesures d'Alice et de Bernard seraient plus fortes en physique quantique que dans toute théorie locale à

variables cachées. Mathématiquement, ces différences s'expriment par ce qu'on a nommé les «inégalités de Bell». Elles sont dues au fait que les variables cachées ne peuvent pas s'influencer plus vite que la vitesse de la lumière, et sont donc moins efficaces pour coordonner leurs efforts: les corrélations sont limitées. En physique quantique, les spins de deux électrons intriqués existent conjointement dans un unique état qui peut s'étendre sur de longues distances. Grâce à l'intrication, la théorie quantique prédit des corrélations jusqu'à 40% plus fortes que celles des théories à variables cachées.

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 (en d'autres termes, 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,

LIBRE ARBITRE ET SUPER- DÉTERMINISME

En 2015, plusieurs équipes, dont celles des auteurs, ont réalisé les premiers tests de Bell prenant en compte à la fois la faille de localité et celle de détection. Elles ont conclu que la physique quantique est complète et fondamentalement non locale. Mais la nature peut-elle encore comploter pour truquer ces résultats ? Il existe en effet une autre échappatoire : la faille de libre arbitre de l'expérimentateur sur le réglage des dispositifs de mesure. Il est envisageable que des variables cachées ou un autre phénomène du passé aient une action causale sur la configuration des détecteurs. Si les choix des physiciens pour l'orientation des polariseurs sont limités

d'une façon ou d'une autre, les résultats seraient biaisés. Dans les expériences de 2015, les chercheurs écartaient cette hypothèse en supposant que, si variables cachées il y a, elles n'émergent qu'avec la paire de photons intriqués et ne peuvent donc pas influencer causalement sur les systèmes de détection. Cependant, le formalisme sous-jacent aux inégalités de Bell ne précise pas où et quand les variables cachées intervenant dans l'expérience seraient créées. Pour écarter cette hypothèse d'un « complot de la nature » sur la configuration des détecteurs, l'idée est de définir la direction de polarisation mesurée par les instruments à partir d'événements survenus dans un passé lointain, comme la lumière émise par des étoiles distantes. En 2017, Anton Zeilinger et son équipe, à l'université de Vienne, ont utilisé une source de photons intriqués envoyés vers deux détecteurs distants de plus de un kilomètre. La configuration des deux polariseurs est contrôlée par deux télescopes pointant chacun sur une étoile distante de plus de 500 années-lumière. Les photons captés en



Lors d'une expérience sur le test de Bell, une équipe de physiciens a utilisé la lumière de plusieurs étoiles de la Voie lactée pour choisir la configuration des détecteurs de leur expérience.

provenant d'une telle étoile et émis il y a plusieurs centaines d'années ont une longueur d'onde propre. Cette dernière est utilisée pour sélectionner une des deux configurations possibles pour chaque instrument, selon qu'elle est supérieure à 700 nanomètres (« rouge »), ou inférieure (« bleue »). Les mesures conduisent à une violation des inégalités de Bell, tout en contrôlant en partie la faille de libre arbitre. En effet, si un mécanisme impliquant les variables cachées a exploité cette échappatoire, il doit avoir agi il y a plus de 500 ans ! En utilisant des sources

lumineuses de plus en plus lointaines – étoiles, quasars ou même le fond diffus cosmologique – il sera possible de repousser d'autant les limites sur cette échappatoire. Cependant, la faille ne pourra jamais être complètement éliminée... En poussant à l'extrême ce raisonnement, cela conduit à l'idée de superdéterminisme, qui suppose l'absence totale de libre arbitre dans un monde où tout est prédéterminé depuis le début de l'Univers. Cependant, la plupart des physiciens rejettent cette idée, qui n'est pas réfutable.

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.



Grâce à l'intrication quantique, il est possible de créer des générateurs de nombres vraiment aléatoires



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.

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, ce qu'on appelle un test de Bell sans échappatoire (ou sans faille). 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.

ÉLIMINER LES FAILLES

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 page 55 et l'encadré pages 56 et 57*). 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.

TÉLÉPORTATION D'INTRICATION

Ce chronométrage strict nous a imposé de séparer les deux électrons de plus de un kilomètre, une distance supérieure de deux ordres de grandeur aux précédents records mondiaux pour des particules de matière 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 traitons la perte de photons en amont. De cette façon, nous éliminons la faille de détection, parce que nous n'excluons aucun résultat des tests de Bell sur des électrons intriqués. La perte de photons liée à la grande distance de séparation ne limite donc pas la qualité de l'intrication, mais, en revanche, elle réduit de façon drastique le nombre d'événements à notre disposition pour le test de Bell – quelques-uns par heure.

Après plusieurs semaines de mesures en juin 2015, nous avons trouvé que l'inégalité de Bell était violée à hauteur de 20 %, en accord avec les prédictions de la théorie quantique. La probabilité d'obtenir par hasard un tel résultat dans le cadre d'un modèle à variables cachées locales (et en admettant que les dispositifs aient conspiré en utilisant toutes les données disponibles) était de 3,9 %. Lors d'une deuxième série de mesures en décembre 2015, nous avons trouvé un taux similaire de violation des inégalités de Bell.

La même année, trois autres groupes ont effectué des tests de Bell sans échappatoire. En septembre, l'équipe du NIST (l'Institut américain des normes et de la technologie), dirigée par l'un d'entre nous (Krister Shalm), et celle

L'INTRICATION QUANTIQUE SUFFIT-ELLE POUR FAIRE DES SYSTÈMES SÉCURISÉS ?

L'intrication quantique est exploitée dans de nombreuses applications, en particulier pour sécuriser des communications. Il est par exemple possible d'utiliser des photons intriqués pour établir, à distance, une clé de chiffrement qui sera utilisée pour sécuriser un message. Alice et Bernard mesurent la polarisation d'une série de photons intriqués (la polarisation « horizontale » codant pour le bit « 0 » et « verticale » pour le bit « 1 »). En plus de fournir la clé, ce système indique aussi si la transmission de la clé a été interceptée par un ennemi. En effet, une mesure sur un photon influe sur son état. Dès lors, si quelqu'un « écoute » la transmission de la clé, Alice et Bernard

peuvent le savoir et il leur suffit de renvoyer une nouvelle clé jusqu'à être certain que celle-ci n'a pas été compromise. Si la théorie est robuste, c'est souvent la réalisation expérimentale qui introduit des failles. Par exemple, la transmission des photons dans une fibre optique de plus de 10 kilomètres de longueur conduit à une perte de signal : un attaquant pourrait alors exploiter la faille de détection. En 2016, Sébastien Tanzilli, du CNRS et de l'université Côte-d'Azur, Nicolas Gisin, de l'université de Genève, et leurs collègues ont étudié le cas où l'attaquant a un contrôle relatif (mais non total) sur l'efficacité de détection du système. En interceptant une partie des photons, il peut acquérir une partie de la clé. Malgré cela, les chercheurs ont montré que des inégalités de Bell plus générales restent violées. Tant que son contrôle reste limité, l'adversaire peut ainsi être démasqué. Les systèmes de cryptographie quantique offrent une grande robustesse contre des attaques et sont efficaces pour sécuriser un réseau de communication, mais ils ne sont pas pour autant invulnérables. Mal conçus, ces systèmes s'exposent à des failles fatales que les attaquants cherchent inlassablement...

d'Anton Zeilinger ont utilisé des photons intriqués. Peu après, Harald Weinfurter, de l'université Ludwig-Maximilian, à Munich, et ses collègues ont utilisé des atomes de rubidium distants de 400 mètres dans un protocole similaire à celui du groupe de Ronald Hanson.

Les équipes du NIST et de Vienne ont intriqué les états de polarisation de deux photons au moyen de lasers intenses dirigés sur un matériau cristallin particulier. Très rarement (environ une fois pour un milliard de photons pénétrant dans le cristal), un photon émis par un laser interagissait d'une façon particulière en donnant naissance à une paire de photons dont les états de polarisation étaient intriqués. Avec des lasers assez puissants, les chercheurs ont produit des dizaines de milliers de paires de photons intriqués par seconde. On envoyait alors ces photons

vers des stations séparées (de 184 mètres dans l'expérience du NIST, de 60 mètres dans l'expérience de Vienne) où l'on mesurait les états de polarisation. La direction de mesure était décidée pendant le temps de vol des photons, ce qui éliminait la faille de localité.

Pour la faille de détection, il fallait récupérer plus des deux tiers des photons intriqués pour que l'on soit sûr d'avoir un échantillon représentatif. Au NIST, nous avons développé des détecteurs de photons uniques ultraperformants et constitués de matériaux supraconducteurs froids. Ces capteurs sont capables d'observer plus de 90% des photons qui les atteignent. La faille de détection était ainsi supprimée.

En répétant plus de 100 000 fois par seconde ces mesures, nous avons très vite accumulé des résultats statistiques significatifs sur les corrélations entre les états de polarisation des photons; les corrélations observées dans les deux expériences étaient beaucoup plus fortes que celles prédites par les théories à variables cachées. De fait, la probabilité que les résultats du NIST soient le fruit du hasard est de l'ordre de un milliardième, et les chances sont encore plus faibles avec l'expérience viennoise. Aujourd'hui, le groupe du NIST utilise une version améliorée du dispositif pour violer les inégalités de Bell à un degré similaire en moins d'une minute, et des perfectionnements attendus accéléreront encore le processus de deux ordres de grandeur.

DES GÉNÉRATEURS D'ALÉA

Ces expériences nous obligent à conclure que tous les modèles à variables cachées, tels ceux que soutenait Einstein, sont incompatibles avec la nature. Les corrélations que nous avons observées entre particules défient notre intuition, et nous démontrent que la fantomatique action à distance a bien lieu.

Nos résultats mettent aussi en avant la remarquable puissance de l'intrication pour d'éventuelles applications. À court terme, une situation où des tests de Bell sans faille seraient utiles est la génération de nombres aléatoires. De nombreuses techniques de cryptographie reposent sur la capacité à produire des nombres aléatoires. Or, en pratique, ces derniers sont difficiles à produire. Les générateurs de nombres aléatoires sont loin d'être infaillibles et s'il est possible d'anticiper les nombres qu'ils produisent, de nombreux systèmes financiers et de communication seraient en danger. Une bonne source de nombres aléatoires est donc d'une importance cruciale.

Pour générer des nombres aléatoires, on recourt le plus souvent à des algorithmes ou à des processus physiques. Avec les algorithmes, si l'on connaît les paramètres utilisés comme valeurs initiales, il est souvent possible de prédire le résultat. Avec les processus physiques,

une compréhension détaillée de la physique sous-jacente du système est nécessaire. Il suffit qu'un détail vous échappe, et un pirate exploitera cette faille. L'histoire de la cryptographie regorge d'exemples de générateurs de nombres aléatoires des deux types qui ont été cassés.

La physique quantique est une aubaine pour ces applications. Il est possible d'«extraire» le hasard inhérent aux processus quantiques afin de produire des nombres véritablement aléatoires. On peut convertir les corrélations mesurées dans un test de Bell sans échappatoire en une chaîne de nombres aléatoires. En 2018, l'équipe du NIST a utilisé son dispositif pour produire 1024 bits véritablement aléatoires à partir de 10 minutes de données expérimentales. La violation des inégalités de Bell garantit que la chaîne de bits est aléatoire.

Il est possible de quantifier la robustesse du système: il y a une chance sur un billion que la chaîne de bits du NIST ne soit pas parfaitement aléatoire. En comparaison, il faudrait plusieurs centaines de milliers d'années à un générateur classique de nombres aléatoires pour acquérir assez de données assurant une telle qualité d'aléa. Les chercheurs travaillent maintenant à développer un outil public: le générateur servirait de source de référence de nombres aléatoires datés et transmis sur internet à intervalles fixes pour être utilisés dans des applications de sécurité.

Plus généralement, les techniques développées dans les expériences de Bell sans faille rendraient possibles le déploiement de nouveaux types de réseaux de communication. De tels réseaux, qui constituent ce que l'on appelle souvent l'«internet quantique», effectueraient des tâches dépassant les capacités des réseaux classiques. Un internet quantique garantirait des communications sécurisées, la synchronisation des horloges, et bien d'autres tâches sensibles.

De tels projets reposent sur l'intrication quantique et la qualité des dispositifs, comme dans nos expériences. En 2017, l'équipe de Delft a fait la démonstration d'une méthode pour améliorer la qualité des spins intriqués, et en 2018, elle a amélioré ses taux d'intrication de trois ordres de grandeur. En s'appuyant sur ces progrès, les chercheurs travaillent au développement d'une première version rudimentaire d'un internet quantique qui devrait être déployé en 2020 dans quelques villes des Pays-Bas.

Il y a quatre-vingts ans, quand la théorie quantique faisait ses débuts, les sceptiques se chagrinaient de sa contradiction apparente avec des siècles d'intuition physique. Désormais, quatre expériences ont asséné le coup final à cette intuition; mais, en même temps, ces résultats ont ouvert une porte pour exploiter la nature d'une façon que ni Einstein ni Bell n'avaient anticipée. La révolution silencieuse que John Bell a mise en branle bat maintenant son plein. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Maldacena, **L'intrication quantique est-elle un trou de ver ?**, *Pour la Science*, n° 475, mai 2017.

B. Hensen *et al.*, **Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers**, *Nature*, vol. 526, pp. 682-686, 2015.

M. Giustina *et al.*, **Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250401, 2015.

L. K. Shalm *et al.*, **Strong loophole-free test of local realism**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250402, 2015.

L'ESSENTIEL

> Les Balo sont de petites bactéries qui se nourrissent exclusivement d'autres bactéries.

> Contrairement à d'autres bactéries prédatrices, elles chassent en solitaire.

> Depuis quelques années, on s'aperçoit que les Balo sont

présents partout où on les cherche et que ce sont sûrement de puissants régulateurs écologiques.

> Leurs applications potentielles sont multiples, notamment dans la lutte contre l'antibiorésistance.

LES AUTEURS



STÉPHAN JACQUET
directeur de recherche à l'Inra,
au Centre alpin de recherche
sur les réseaux trophiques
et écosystèmes limniques,
à Thonon-les-Bains



JADE EZZEDINE
doctorant au sein
du même laboratoire

Ces bactéries qui en dévorent d'autres

Dans les profondeurs des grands lacs de montagne et ailleurs, des bactéries se nourrissent de leurs semblables avec une efficacité redoutable. Nommées Balo, ces bactéries prédatrices offrent une alternative prometteuse aux antibiotiques.

Au beau milieu du Léman, le plus grand lac naturel profond d'Europe occidentale, l'attaque a été foudroyante. Peu de chance d'en réchapper ! La victime est une bactérie aquatique, *Limnohabitans planktonicus*, dont la taille ne dépasse pas deux micromètres. Sa prédatrice... est aussi une bactérie, plus petite. Du genre *Peredibacter*, elle se délecte de ses semblables. La proie, qui se nourrissait de matière organique dissoute libérée par le phytoplancton alentour, n'a rien senti venir. Force est de constater que la loi de la jungle s'applique aussi au monde microbien.

Les bactéries aquatiques jouent un rôle fonctionnel clé au sein des écosystèmes, ce qui n'empêche pas qu'elles soient les proies de prédateurs ou de parasites très efficaces. Outre les bactériophages ou phages – des virus mangeurs de bactéries –, qui se sont révélés, au cours des trois dernières décennies, un facteur majeur de régulation de l'abondance des bactéries dans les milieux aquatiques et de leur diversité, d'autres prédateurs, comme les

organismes unicellulaires flagellés, les ciliés ou certains métazoaires appartenant au zooplancton (ou plancton animal), sont bien connus des biologistes. Les bactéries qui se nourrissent de leurs consœurs le sont moins, mais depuis peu, on s'accorde à y voir un groupe qui compte aussi dans le contrôle des populations bactériennes. Certaines sont regroupées dans un groupe fonctionnel, les *Bdellovibrio* et organismes apparentés ou Balo (pour *Bdellovibrio and like organisms*).

Depuis quelques années, grâce aux nouvelles techniques de séquençage et de manipulation génétique, de bio-informatique et de microscopie, on commence à mieux connaître ces bactéries et leur impact écologique. Au point d'en faire de sérieux candidats dans la lutte antibactérienne en aquaculture, mais aussi en agriculture et en médecine.

UNE DÉCOUVERTE FORTUITE

En sciences, le hasard est parfois un facteur important d'innovation. La poussée d'Archimède, la radioactivité, la pénicilline, l'ADN et nombre d'autres avancées sont ainsi les fruits >