

est tout simplement d'envoyer les données de ces générateurs à une nouvelle scientifique, Camélia: les trois chercheuses sont connectées par trois sources (la source «CHSH» entre Aïda et Béatrice, et les deux générateurs de nombres aléatoires) dans un réseau en triangle. On demande à chacune des scientifiques d'annoncer les nombres aléatoires qu'elles reçoivent (en plus du résultat de l'expérience CHSH pour Aïda et Béatrice). En utilisant les caractéristiques spécifiques de ce type d'expérience, Tobias Fritz a montré qu'un détective qui connaît la topologie expérimentale pourra relier ce qu'il observe à une expérience CHSH standard, contrôlée par les inégalités de Bell, et ne trouvera donc aucune explication aux résultats satisfaisant au principe de localité. De façon inattendue, cet exemple de non-localité dans un réseau triangle ne fait pas appel à l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure, ce qui montre que cette hypothèse n'est plus nécessaire pour la non-localité en réseau. Elle est remplacée par l'hypothèse d'indépendance des sources.

Avec plusieurs collègues (Elisa Bäumer, Sadra Boreiri et Salman Beigi), nous avons étudié le réseau en triangle en simplifiant au

maximum le problème. Nous avons considéré trois sources émettant des états intriqués identiques vers trois observateurs réalisant le même type de mesure. Comme nous l'avons mentionné, le choix de l'expérience et de la stratégie des mesures est crucial: dans tous les cas connus jusqu'alors (à l'exception de l'exemple précédent), soit les corrélations que l'on obtient étaient locales, soit la non-localité n'avait pas pu être démontrée. Avec un choix judicieux de mesures, nous avons proposé le premier exemple d'une expérience quantique non locale dans le réseau en triangle, pour lequel notre preuve de non-localité repose sur un argument indépendant des expériences de Bell standard (avec une unique source).

Notre exemple d'expérience est intéressant, car il fait intervenir tous les éléments attendus pour un réseau quantique: états intriqués et mesures intriquées (*voir l'encadré page 38*). Ces caractéristiques, ainsi que notre preuve, indiquent que notre expérience pourrait bien être fondamentalement différente de toutes les expériences de Bell standard, comme l'expérience CHSH ou GHZ. Cette affirmation est confortée par de nombreux arguments, mais il reste à le démontrer formellement.

MUSÉE DE L'HOMME

AUX DE FRONTIÈRES L'HUMAIN

Exposition
13 oct. 2021 -
30 mai 2022

Musée de l'Homme
Place du Trocadéro
Paris 16°

Pour la Science

MHN 2021 - Œuvre Quotidien de Samuel YAL. Photo © Anna Katharina Schneiderger

ÉTAT INTRICUÉ ET MESURES INTRICUÉES

De même qu'il existe en physique quantique des « états intriqués » qui ne correspondent à rien de connu autour de nous (un chat « mort et vivant »), il existe aussi des façons de mesurer des objets, dites « mesures intriquées », qui ne correspondent, elles non plus, à aucune mesure envisageable dans notre monde classique.

L'image du chat de Schrödinger, « mort et vivant », illustre le fait que toute propriété quantique mesurable peut être intriquée en deux états (ou plus). Ainsi, comme un chat classique pouvant être retrouvé dans l'état mort ou dans l'état vivant, un chat quantique pourra se trouver (avant qu'on l'observe !) dans l'état mort et vivant. Cette logique est reproductible : le pelage du chat peut être rose et vert, le chat peut arriver de la

gauche et arriver de la droite. En réalité, le formalisme de la physique quantique donne une caractérisation quantitative de cette « intrication » : pour être totalement précis sur l'état du chat de Schrödinger, il faudrait par exemple dire qu'il est « maximalement intriqué de façon positive entre les états mort et vivant ». Il pourrait tout aussi bien être « maximalement intriqué de façon négative entre les états mort et vivant ». La différence entre ces deux états, l'un « positif » et l'autre « négatif », indique ce qui se passe quand les chats, ou les photons, interfèrent entre eux. Elle est purement quantique et donc difficile à saisir : ces états sont aussi différents l'un de l'autre que le sont les états « mort » et « vivant », et sont aisément distinguables à l'aide de mesures.

Imaginons maintenant qu'une physicienne, nommée Aïda, reçoit un unique chat, qui peut emprunter deux chemins pour arriver jusqu'à elle : le chemin gauche ou le chemin droit. Aïda reçoit le chat et se demande d'où celui-ci arrive. Dans notre monde classique, Aïda ne peut guère faire plus que de déterminer le chemin emprunté par le chat : elle mesurera si le chat vient de la gauche ou s'il vient de la droite. Mais en physique quantique, Aïda peut réaliser un nouveau type de mesure, qui n'a pas d'équivalent classique : par exemple, elle peut mesurer si le chat vient d'une façon « maximalement intriquée de façon positive entre le chemin gauche et le chemin droit », ou s'il vient d'une façon « maximalement intriquée de façon négative entre le chemin gauche et le chemin droit ».

À la suite d'une telle mesure, Aïda ne sait pas si le chat a emprunté le chemin gauche ou le chemin droit. Cependant, elle acquiert la même quantité d'information sur le « trajet » effectué par le chat pour arriver jusqu'à elle : cette information réside dans le mot « positif » ou « négatif ». Il nous faut inventer un mot pour parler de ce type nouveau de mesure. Le phénomène étant lié à l'intrication, nous disons que le chat (unique) « vient de la gauche et vient de la droite » (de façon positive ou négative, suivant le résultat de la mesure). Ce nouveau type de mesure, propre à la physique quantique, est nommé « mesure intriquée ».

Avec un réseau en triangle, nous sommes encore bien loin d'un réseau internet, mais cet exemple a déjà de nombreux attrait. Il concerne un réseau bouclant sur lui-même, une configuration très difficile à traiter mathématiquement. Et tout comme l'expérience de Tobias Fritz, il s'affranchit de l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure, ce qui permet en principe d'envisager ce système comme un générateur de nombres aléatoires sans choix de mesure initial. Cette caractéristique, qui reste à démontrer, se ferait au prix d'une hypothèse forte, celle de l'indépendance des trois sources disposées en triangle. Enfin, de la même façon que la non-localité de Bell a permis le développement d'applications diverses, il semble raisonnable de penser que la non-localité en réseau, que celui-ci soit triangulaire ou plus complexe, conduira à des utilisations spécifiques.

Depuis les premiers développements de la mécanique quantique, cette théorie n'a pas fini de nous surprendre. Les travaux et les réflexions autour de la non-localité et de la nouvelle non-localité en réseau illustrent son caractère contre-intuitif. Mais ils ne sont pas les seuls et il existe d'autres principes « évidents » qui semblent incompatibles avec cette théorie. Par exemple, en 2018, Daniela Frauchiger et Renato Renner, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, ont montré qu'en mécanique quantique, des raisonnements très simples du type : « Je sais que A implique B » et « je sais que mon ami

a démontré A », donc « je sais que B est vraie », ne sont plus du tout valides de façon évidente.

Ces résultats si perturbants semblent être de nature à rendre fou tout détective. Est-ce vraiment raisonnable, ou même possible, de mener une enquête au sein du monde quantique, où les intuitions sont bouleversées ? Et serons-nous toujours dans l'incapacité de nous forger une intuition quantique ? Un début de réponse se cache peut-être dans l'image du détective et de ses enfants amateurs de jeux vidéo. Reprenons notre même détective, fatigué des affaires du monde quantique, chargé cette fois-ci d'une enquête dans le jeu vidéo Mario. De nouveau, dans ce monde, un meurtre peut lui sembler inexplicable, proche de l'absurde. Les règles régissant les meurtres (un saut sur l'adversaire) y sont totalement différentes des siennes. Pourtant, elles sont familières à ses enfants ! Notre vocabulaire et l'intuition de ce qui est possible ou impossible, logique ou absurde nous viennent de ce que nous vivons et voyons. C'est en vivant sur Terre que le détective se forge son intuition. C'est en jouant à Mario que ses enfants maîtrisent les règles de ce jeu. De même, c'est par les expériences de pensée et les expériences réelles que les scientifiques se construisent une intuition du monde de la physique quantique et inventent leurs propres mots pour décrire ce nouveau « monde réel », qui donnera peut-être naissance un jour à l'internet quantique. ■

BIBLIOGRAPHIE

M.-O. Renou *et al.*, **Genuine quantum nonlocality in the triangle network**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, article 140401, 2019.

R. Hanson et K. Shalm, **Des tests sans faille de l'intrication quantique**, *Pour la Science*, n° 504, pp. 52-61, octobre 2019.

T. Fritz, **Beyond Bell's theorem II : Scenarios with arbitrary causal structure**, *Comm. Math. Phys.*, vol. 341, pp. 391-434, 2016.

C. Branciard *et al.*, **Characterizing the nonlocal correlations created via entanglement swapping**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, article 170401, 2010.

PAS DE BAIGNOIRE EN OR MASSIF MAIS JE FAIS PARTIE DU 1%

ELISABETH LAVILLE

est fondatrice d'Utopies,
membre du collectif
1% for the Planet.
Chaque année,
Utopies reverse
1% de son chiffre d'affaires
lié à ses offres
climat/biodiversité
à la protection de
l'environnement.

Rejoignez le mouvement sur
onepercentfortheplanet.fr



**FOR THE
PLANET®**