

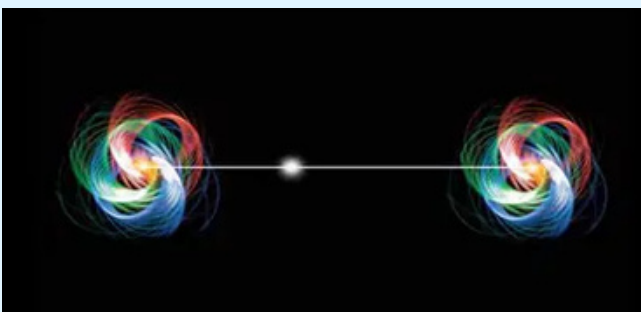
DU PARADOXE EPR À L'ÈRE DU SOFTWARE QUANTIQUE

Retour sur 90 ans d'intrication

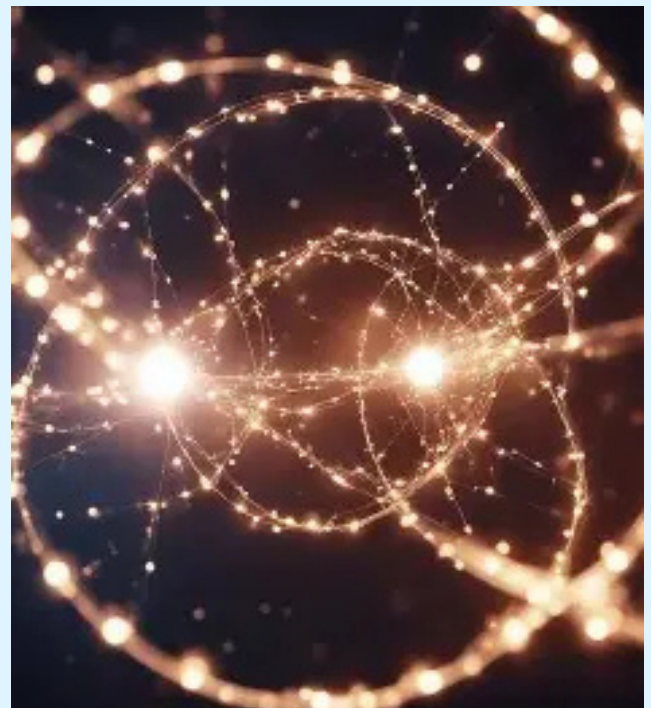
Il y a 90 ans aujourd'hui, le 15 mai 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen (EPR) publient dans la prestigieuse Physical Review, l'article "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ?" (A. Einstein, 1935). Ils y posent deux principes.

Le premier, la **complétude**, dit que chaque élément de réalité doit posséder un équivalent dans la théorie. Selon EPR, « *si, sans perturber un système, on peut prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique, il existe un élément de réalité correspondant* ». Une théorie est donc dite complète uniquement si elle intègre explicitement tous ces éléments de réalité dans ses variables — ce que la mécanique quantique standard ne fait pas, d'où la conclusion d'incomplétude tirée par les auteurs.

Le second, la **localité**, en cohérence avec la relativité restreinte, précise qu'aucune information ni influence causale ne peut voyager plus vite que la lumière. Autrement dit, la mesure réalisée sur une particule ne devrait pas pouvoir affecter instantanément une autre particule suffisamment éloignée. EPR considèrent la localité comme une exigence fondamentale que toute théorie physique "raisonnable" doit satisfaire.



En imaginant une paire de particules corrélées en position et en impulsion, ils argumentent qu'il est possible de prédire l'état d'une particule à distance sans la perturber, ce qui semble contredire le principe d'incertitude énoncé par Werner Heisenberg quelques années plus tôt (Heisenberg, 1927).



Leur conclusion est alors de dire que la mécanique quantique (MQ) est incomplète : « *si, sans perturber un système, on peut prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique, il existe un élément de réalité correspondant à cette grandeur* » — EPR, 1935.

Quelques mois plus tard, Erwin Schrödinger donne un nom à cette étrange corrélation des états EPR : **Entanglement** (Schrödinger, 1935). Il la qualifie comme le trait le plus caractéristique de la MQ. Il démontre qu'un système corrélé peut posséder un état pur, alors que chacun de ses sous-systèmes est décrit par un mélange statistique. Il se trouve que ce phénomène est impossible d'un point de vue de la physique classique.

Après trois décennies de débats théoriques, la question EPR quitte le domaine philosophique pour rejoindre celui du laboratoire expérimental à la fin des années 1960.

Tout commence à Berkeley en 1967. Carl Kocher et Eugène Commins observent la corrélation de polarisation de deux photons issus d'une cascade atomique du calcium (C. Kocher, 1967). Leurs résultats confirment les prédictions quantiques mais on ne parle pas encore d'état de Bell au sens strict.

Cinq années plus tard, Stuart Freedman et John Clauser perfectionnent cette même source atomique. Leur expérience de 1972 constitue le premier véritable test quantitatif (S. Freedman, 1972). Pour la première fois, le réalisme local est mis à mal non pas par un raisonnement, mais bel et bien par une mesure. Mais pour clore le débat, il faut un dispositif encore plus radical.

Entre 1980 et 1982, à Orsay, Alain Aspect et ses étudiants conçoivent une source de calcium de haute brillance couplée à deux commutateurs acousto-optiques oscillant à 50MHz (A. Aspect, 1982). Le verdict tombe : nouvelle violation. Cette expérience légitime un champ naissant : l'optique quantique expérimentale.



Au-delà du débat fondamental, l'intrication s'impose aujourd'hui comme une véritable "matière première" de l'ingénierie quantique.

Dans les télécommunications, elle sert de socle aux protocoles de sécurisation absolue et à la construction progressive d'un internet quantique où l'information est transportée non plus par des bits mais par des corrélations non-locales.



Dans le calcul, elle est l'ingrédient qui permet aux qubits de tisser des superpositions multipartites - condition *sine qua non* pour l'accélération algorithmique attendue en chimie, optimisation ou intelligence artificielle. Dans les sciences de la mesure, l'intrication offre un levier pour repousser la limite standard de précision : capteurs gravimétriques, horloges optiques ou magnétomètres atteignent déjà des sensibilités inaccessibles aux appareils classiques.

Enfin, sur le plan des infrastructures, elle ouvre la porte à de nouvelles formes de synchronisation temporelle et de distribution de référence susceptibles de redessiner les réseaux électriques, financiers ou de navigation. Autrement dit, l'intrication n'est plus seulement un objet de curiosité théorique ; elle irrigue désormais les grands axes de la cybersécurité, du calcul intensif, de la métrologie et des réseaux, constituant le fil conducteur de l'ère du logiciel quantique.

Chez QbitSoft, l'intrication est une ressource programmable.

Johanna Klein, Ph.D, Quantum Algorithm Expert

Références

- A. Aspect, J. D. (1982). Phys. Rev. Lett., 1804.
- A. Einstein, B. P. (1935). Physical Review(47), 777.
- C. Kocher, E. C. (1967). Phys. Rev. Lett., 575.
- Heisenberg, W. (1927). Zeitschrift für Physik, 43(3), 172-198.
- S. Freedman, J. C. (1972). Phys. Rev. Lett., 938.
- Schrödinger, E. (1935). Proc. Cambridge Phil. Soc., 31, 555.