

L'idée consiste à analyser les corrélations entre les résultats des mesures des deux expérimentateurs. Si ces corrélations sont assez fortes, supérieures à une certaine valeur seuil (leur force est donnée par une « inégalité de Bell »), alors il est impossible de les expliquer classiquement en conservant à la fois la localité et l'indépendance du choix de la mesure. Dans le cadre de CHSH, le raisonnement est complexe et ne permet pas d'exposer simplement la nécessité de la non-localité.

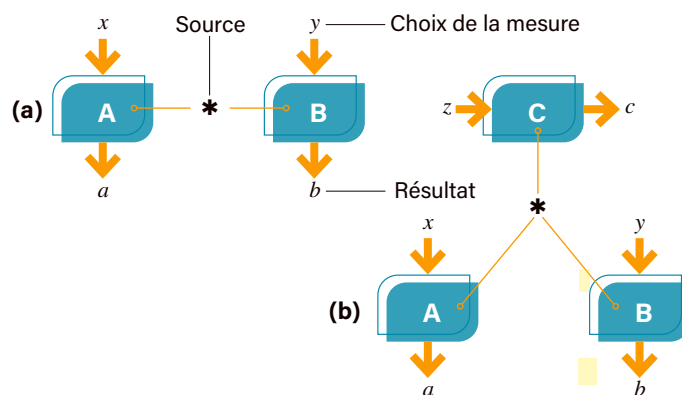
Une autre expérience de Bell, notée GHZ d'après les physiciens qui l'ont conçue (Daniel Greenberger, Michael Horne et Anton Zeilinger), est très intéressante, car le raisonnement associé exhibe clairement la mise en défaut de l'intuition classique. Il est bien entendu nécessaire de maîtriser le formalisme quantique pour calculer les prédictions des résultats dans le cadre de l'expérience GHZ. Cependant, si l'on admet ces prédictions, il est alors assez aisé de voir qu'elles sont incompatibles avec les principes de localité et de choix de mesure indépendant.

## DES CHATS QUANTIQUES

Dans ses réalisations concrètes, l'expérience GHZ fait le plus souvent intervenir des photons dont on mesure la polarisation. Cependant, comme nous n'avons pas conscience de croiser des photons au coin de chaque rue et comme nous pouvons *a priori* utiliser tout objet obéissant aux lois quantiques, prenons le parti (arbitraire) d'appeler ces objets « chats » et de remplacer l'état de polarisation par une couleur, tout en gardant les mêmes lois quantiques. Dans cette reformulation imagée de l'expérience, il sera possible de mesurer la couleur du pelage ( $P$ ) ou des yeux ( $Y$ ) des chats, pour trouver un résultat vert ( $v$ ) ou rose ( $r$ ).

Plus précisément, reformulée en termes de chats et de couleurs, l'expérience fonctionne de la façon suivante. Une source crée trois chats quantiques dans un état physique bien précis. Ceux-ci sont ensuite envoyés vers trois appareils de mesure situés dans trois pièces distinctes et éloignées les uns des autres. Trois scientifiques (appelons-les Aïda, Béatrice et Camélia) contrôlent ces appareils. Elles effectuent simultanément une mesure de la couleur soit du pelage, soit des yeux, sachant que les lois du monde quantique indiquent qu'il est impossible de mesurer ces deux attributs en même temps. Chacune choisit sa mesure de manière indépendante sans en informer ses collègues. Concrètement, chaque expérimentatrice tire à pile ou face pour décider si elle mesure la couleur des yeux ou du pelage (voir l'encadré page ci-contre).

Pour cette expérience GHZ, la mécanique quantique prédit les résultats suivants. Lorsque toutes les scientifiques mesurent  $P$ ,



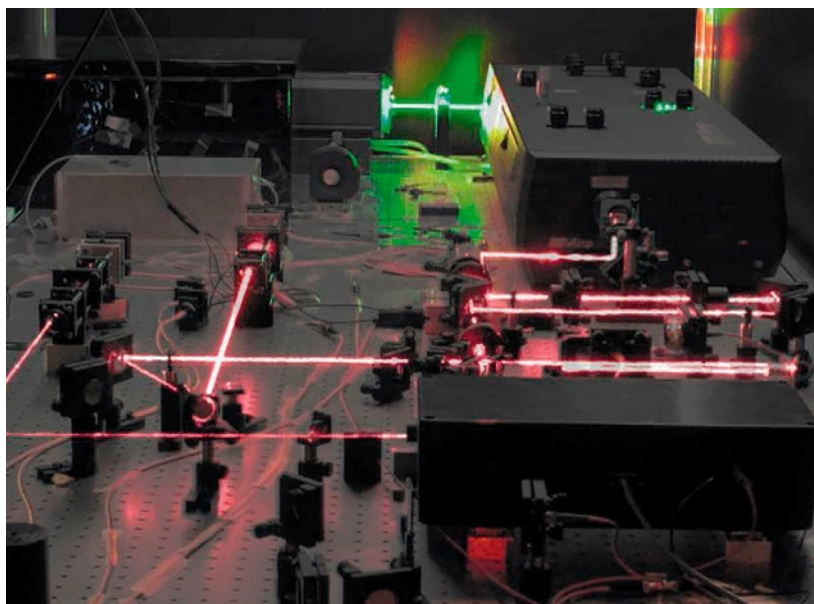
Dans les expériences de Bell, on utilise une source unique de photons intriqués. S'il y a deux observateurs, il s'agit d'une expérience de type CHSH (a), s'il y en a trois, c'est une expérience de type GHZ (b). Ces expériences ont historiquement permis de montrer que la mécanique quantique est non locale en calculant les corrélations entre les résultats des mesures.

elles trouvent un nombre impair (1 ou 3) de résultats  $v$  et donc pair (0 ou 2) de résultats  $r$ . Lorsque l'une mesure  $P$  et les deux autres  $Y$ , elles trouvent un nombre pair (0 ou 2) de résultats  $v$  et donc impair (1 ou 3) de résultats  $r$ . La mécanique quantique prédit également ce qui se passe lorsque toutes mesurent  $Y$ , ou lorsque l'une mesure  $Y$  et les deux autres  $P$ , mais ces deux situations ne sont pas intéressantes du point de vue de l'étude de la non-localité quantique (dans une expérience GHZ réelle, les propriétés  $Y$  et  $P$  considérées ne sont pas interchangeables). Lorsque l'expérience GHZ est réalisée un grand nombre de fois, les chercheuses retrouvent exactement les prédictions de la mécanique quantique et vérifient à chaque fois les propriétés énoncées ci-dessus.

Imaginons maintenant qu'un détective assiste à l'expérience. Conformément à ses capacités de déduction issues de son expérience du monde macroscopique, il cherche une « explication classique » aux résultats en se fondant notamment sur les principes de localité et de l'indépendance du choix de la mesure (concrètement, il peut partir du principe que les tirages à pile ou face ne sont soumis à aucune influence, voir l'encadré page 31).

Le détective ne sait en rien comment l'expérience fonctionne. Il n'a accès qu'aux tirages successifs des scientifiques et aux résultats de leurs mesures : cela lui permet de constater que les deux cas de figure prévus par la théorie et énoncés plus haut sont vérifiés. Il peut donc remarquer que les résultats des trois scientifiques sont corrélés.

Or il n'existe que deux façons d'expliquer des événements corrélés : soit les résultats produits par les appareils sont reliés par une même cause, soit un ou plusieurs appareils de mesure communiquent vers un ou plusieurs autres dispositifs distants (par exemple, l'appareil d'Aïda envoie à l'expérience de Béatrice l'information du choix d'Aïda). Cependant, les mesures étant réalisées de façon parfaitement simultanée, à des endroits différents, la seconde explication est incompatible avec le



Les expériences de Bell sont réalisées avec des lasers et différents systèmes optiques. Pour s'assurer que l'expérience ne présente pas de faille de communication et prouver que la physique quantique est non locale, les détecteurs sont parfois installés dans des bâtiments éloignés et reliés par des fibres optiques.

principe de localité: l'information n'a pas le temps d'être échangée entre les appareils de mesure. Les résultats doivent donc avoir une cause commune.

Ainsi, le détective peut faire une première déduction. Sans le supposer *a priori*, il déduit qu'il existe une source unique émettant des objets vers les trois appareils de mesure. Le détective n'a aucune idée de la nature de ces objets, mais il sait que ces objets transportent avec eux certaines propriétés ( $P$  et  $Y$ , chacune de valeur  $v$  ou  $r$ ), puisque celles-ci sont mesurées par les trois chercheuses. Et il peut nommer de façon arbitraire ces objets «chats», les propriétés «pelage» et «yeux» avec des valeurs «vert» et «rose».

Dans sa tentative d'explication classique, le détective liste toutes les configurations possibles de trois chats, sachant qu'il existe quatre types de félins (vert aux yeux verts, vert aux yeux roses, rose aux yeux verts et rose aux yeux roses). Il comptabilise  $4^3 = 64$  configurations en tout. En prenant chaque cas, et en considérant les tirages possibles, le détective met en évidence que, quelle que soit la configuration des chats mesurés par les chercheuses, il existe toujours une configuration de mesure qui est en contradiction avec les observations, c'est-à-dire en contradiction avec les propriétés de parité indiquées plus haut. Par exemple, si l'on suppose qu'Aïda reçoit un chat rose aux yeux verts, et que Béatrice et Camélia reçoivent des chats verts aux yeux roses, et si les résultats des tirages à pile ou face indiquent à toutes de mesurer le

pelage, elles obtiendraient deux résultats  $v$ , en contradiction avec les observations (le nombre de résultats  $v$  est 1 ou 3).

De façon générale, quelle que soit la couleur des chats mesurés par les trois chercheuses, une contradiction de ce type est toujours présente (voir l'encadré page 32). Ainsi, la tentative d'explication du détective ne tient pas et l'oblige à remettre en question la possibilité de l'indépendance du choix de la mesure ou la localité. Et la négation de l'un ou l'autre de ces principes remet en cause profondément les intuitions classiques du détective.

## UN TRIO DE CHATS MAXIMALEMENT INTRIKUÉ

Rien n'indique, *a priori*, lequel de ces principes est à écarter. L'interprétation historique de la mécanique quantique, dite «de Copenhague», rejette le principe de localité. Et ce choix est partagé par la grande majorité des spécialistes. Il remet en cause notre vision initiale de trois chats empruntant chacun leur tunnel, pour ne les voir plus que comme une seule entité indissociable et non locale. En termes techniques, l'état du trio de chats est un état intriqué, et plus précisément un «état maximalement intriqué à trois qubits» (un qubit, ou bit quantique, étant l'unité d'information quantique).

Dans les années 1960, cette expérience GHZ à trois chats (ou trois photons) était techniquement hors d'atteinte. Et elle reste toujours difficile à réaliser. En effet, pour produire des photons intriqués, les chercheurs font appel à des cristaux excités par des lasers. Il y a alors une certaine probabilité d'émettre une paire de photons intriqués. Mais il n'existe pas de source à trois photons intriqués bien maîtrisée techniquement. C'est pourquoi les physiciens expérimentateurs lui préfèrent l'expérience CHSH, qui permet d'arriver aux mêmes conclusions, mais cette fois-ci avec seulement deux scientifiques, Aïda et Béatrice, partageant deux «chats quantiques».

L'expérience CHSH a été réalisée à plusieurs reprises depuis la proposition de Bell en 1964, avec la première expérience de Stuart Freedman et John Clauser (en 1972), puis celle de l'équipe d'Alain Aspect (en 1981), celle de Genève (en 1998, menée par l'un de nous, Nicolas Gisin)... Ces premières expériences présentaient des limitations techniques qui ne permettaient pas d'exclure la présence de failles: les dispositifs de mesure, trop proches, pouvaient échanger de l'information, la perte de photons trop importante dans le circuit pouvait créer un biais dans l'échantillon mesuré, etc. Les conclusions sur la non-localité étaient établies avec la réserve des failles potentielles.