

LES CHATS QUANTIQUES DE L'EXPÉRIENCE GHZ

Dans l'expérience GHZ, une source envoie simultanément trois photons intriqués à trois scientifiques, Aïda, Béatrice et Camélia. Celles-ci réalisent simultanément une mesure unique de polarisation dans une certaine direction, parmi deux possibles. On choisit ici de renommer les photons « chats » et la polarisation « couleur », soit sur le pelage (P), soit sur les yeux (Y), qui peuvent être soit verts (v), soit roses (r). Chaque expérimentatrice décide quoi mesurer par un tirage à pile ou face, sans communiquer son choix aux autres. La mécanique quantique prédit deux situations pour les résultats. Lorsque toutes les scientifiques mesurent P , elles trouvent un nombre impair (1 ou 3) de résultats v , et donc un nombre pair (0 ou 2) de résultats r . Lorsque l'une mesure P et les deux autres mesurent Y , elles trouvent un nombre pair (0 ou 2) de résultats v , et donc un nombre impair (1 ou 3) de résultats r . Les observations confirment ces prédictions.

En s'appuyant sur son intuition classique et macroscopique, notamment sur le principe de localité, un détective peut-il expliquer les résultats des mesures ? Son raisonnement l'amène à penser que la source au centre de l'expérience contient des chats verts ou roses, avec des yeux verts ou roses, c'est-à-dire avec des couleurs bien déterminées. À chaque fois, trois de ces chats parviennent aux appareils de mesure

des trois scientifiques. Il peut ainsi énumérer les 64 possibles configurations de trois chats soumises aux trois scientifiques. Considérons par exemple l'une de ces 64 configurations, représentée sur l'illustration, celle où Aïda reçoit un chat rose aux yeux verts, et Béatrice et Camélia des chats verts aux yeux roses. Suivant le résultat des tirages de pile ou face, plusieurs mesures sont possibles. Si, comme dans l'illustration, Aïda et Béatrice mesurent les yeux et Camélia mesure

résultats verts, ce qui est contraire aux prédictions quantiques et qui n'est jamais observé par le détective !

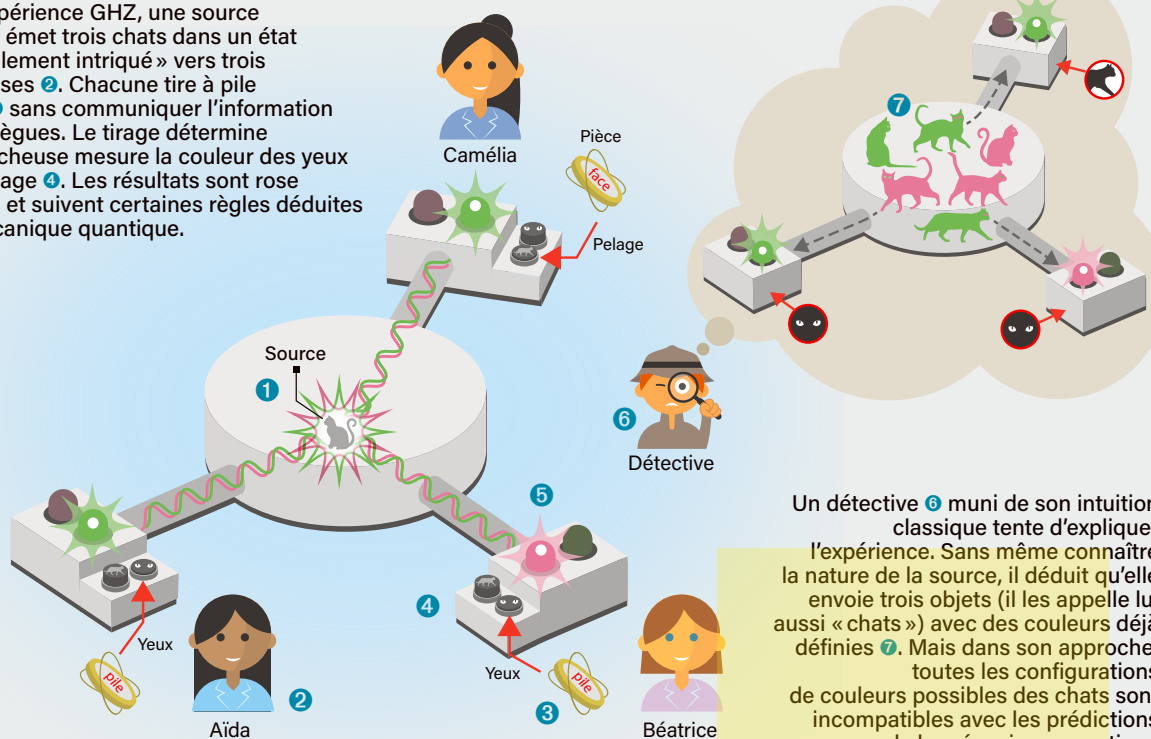
En prenant un par un les 64 cas possibles, comme nous venons de le faire avec un cas particulier, notre détective (ou un lecteur motivé) montre aisément, de la même façon, qu'aucune de ces possibilités n'est compatible avec les résultats indiqués par la physique quantique. Pour chaque combinaison possible, il existe toujours un choix de mesures incompatible avec les résultats prédits par la mécanique quantique et observés par le détective. Les résultats de l'expérience ne peuvent donc s'expliquer par aucune des combinaisons possibles.

La conclusion qui s'impose est que la cause des corrélations entre les mesures ne peut être de nature classique, et est nécessairement non locale. Pour tirer cette conclusion, il faut cependant admettre l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure. Cette hypothèse interdit l'existence d'une cause commune déterminant à la fois la couleur des chats et les résultats des tirages à pile ou face, cause qui pourrait éviter que les trois scientifiques ne mesurent les situations problématiques, comme quand elles mesurent toutes le pelage dans le cas des chats pris en exemple.

La cause des corrélations est nécessairement non locale

le pelage, elles obtiennent un nombre pair de résultats v (plus exactement, deux), ce qui est compatible avec les observations du détective et les prédictions quantiques. C'est toujours le cas tant que deux des chercheuses mesurent les yeux et la troisième mesure le pelage. Cependant, si les trois mesurent le pelage, elles obtiennent un nombre pair (deux) de

Dans l'expérience GHZ, une source unique ① émet trois chats dans un état « maximalement intriqué » vers trois chercheuses ②. Chacune tire à pile ou face ③ sans communiquer l'information à ses collègues. Le tirage détermine si la chercheuse mesure la couleur des yeux ou du pelage ④. Les résultats sont rose ou vert ⑤ et suivent certaines règles déduites de la mécanique quantique.



Un détective ⑦ muni de son intuition classique tente d'expliquer l'expérience. Sans même connaître la nature de la source, il déduit qu'elle envoie trois objets (il les appelle lui aussi « chats ») avec des couleurs déjà définies ⑦. Mais dans son approche, toutes les configurations de couleurs possibles des chats sont incompatibles avec les prédictions de la mécanique quantique et les observations.

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.

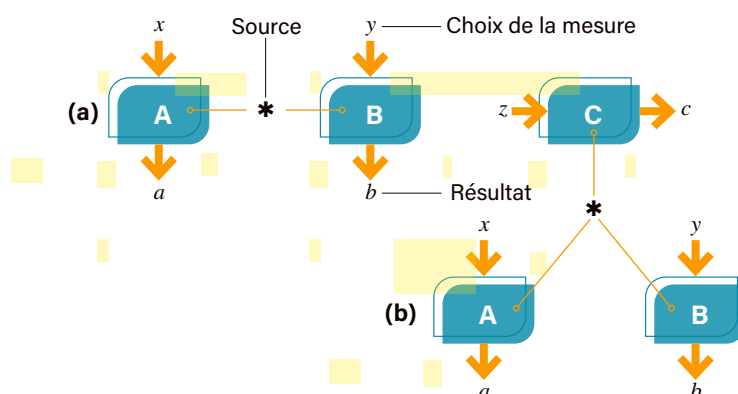
Une autre expérience de Bell, notée GHZ d'après les physiciens qui l'ont conçue (Daniel Greenberger, Michael Horne et Anton Zeilinger), est très intéressante, car le raisonnement associé exhibe clairement la mise en défaut de l'intuition classique. Il est bien entendu nécessaire de maîtriser le formalisme 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