Il n'y a pas de places imprenables, il n'y a que de mauvais généraux
Napoléon 1er

Mécanique quantique, variables cachées et inégalités de Bell

par Bernard Beauzamy,
Octobre 2023

Résumé Opérationnel

Le débat est très vif, depuis des dizaines d'années, à propos des explications possibles d'expériences relatives à l'"intrication" réalisées dans le cadre de la mécanique quantique : deux particules, ayant été en contact à un moment donné, partageraient ensuite des caractéristiques communes, quelle que soit la distance qui les sépare.

Ce qui rend difficile toute compréhension du sujet, c'est d'abord que les spécialistes se contredisent. Par exemple, sur la dualité onde-corpuscule, pour expliquer les fentes d'Young, la moitié des experts affirme que les particules se trouvent dans plusieurs endroits à la fois, tandis que l'autre moitié soutient, avec la même ardeur, que chaque particule se trouve dans un seul endroit.

Pour tenter d'y voir clair, nous procédons à l'analyse critique de l'article de D. Marchand : "Le "paradoxe" EPR et l'inégalité de Bell", qui est en ligne (cours de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris) :
https://cours.espci.fr/site.php?id=200&fileid=752

Cet article se consacre à l'analyse de l'intrication ; il est divisé en deux parties. La première décrit une analogie physique simple : un canon à clous. Malheureusement, l'auteur prouve alors qu'il ignore les lois fondamentales des probabilités. Dans la seconde, l'auteur applique le raisonnement à l'intrication de deux photons et, à ce moment, il prouve qu'il ignore également les lois fondamentales de la mécanique quantique. Même en physique atomique, deux ignorances ne font pas une science.

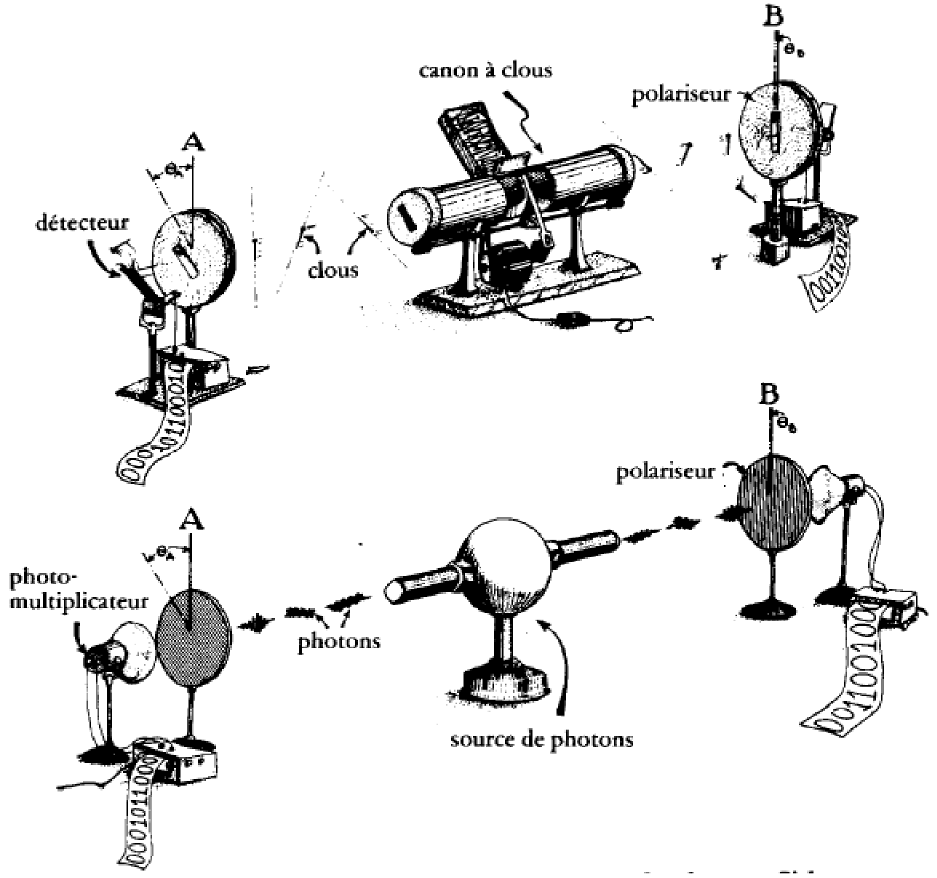
Nous donnons les prescriptions nécessaires pour que l'expérience des photons ait une valeur quantitative et sorte du mysticisme : il faut connaître la loi de probabilité régissant la différence de polarisation (contrairement à ce qui est dit, les deux photons émis simultanément n'ont pas de raison d'avoir exactement la même polarisation) et il faut connaître exactement la tolérance

du dispositif : la fente ayant une orientation donnée, quelle tolérance sur l'orientation du photon est acceptable pour qu'il passe par la fente ?

Enfin, nous concluons en nous référant à la position prise par Albert Einstein : il existe une explication assez simple au fait que deux photons intriqués manifestent des polarisations proches, en cas de mesure, même s'ils sont séparés par de grandes distances.

I. Première partie : le canon à clous

Le dessin ci-dessous est extrait de cet article.



Le texte qui suit est extrait de l'article ; nous mettons nos commentaires entre crochets : à ce stade, ils concernent des rectifications de vocabulaire. Notre analyse complète est donnée plus loin, dans un paragraphe séparé.

A. Extrait de l'article

Imaginons un canon à clous, qui tire simultanément deux clous dans deux directions opposées. Imaginons qu'au lieu de partir pointe en avant, les clous qui sortent du canon aient leur tige perpendiculaire à l'axe de tir. Nous supposerons de plus que deux clous d'une même paire ont leurs tiges parallèles [*rectification : de même orientation*], mais les différentes paires possèdent des orientations parfaitement aléatoires les unes par rapport aux autres. On mitraille deux plaques de métal, A et B, percées chacune d'une fente. Ces fentes se comportent comme de véritables polariseurs parce qu'elles ne laissent passer que les clous dont l'orientation est parallèle [*identique*] à la leur et arrêtent tous les autres. Nous supposerons qu'il est possible de modifier l'orientation des polariseurs au cours de l'expérience. On place près des plaques deux observateurs qui comptent les clous passant ou ne passant pas la fente. Le passage d'un clou est marqué par un 1, le non-passage par un 0.

Au début, les deux polariseurs sont orientés dans la même direction. Comme les deux clous d'une même paire ont exactement la même orientation et que les polariseurs A et B sont alignés, chacun des clous ou bien passe par la fente ou bien « rate son coup ». Les succès et les échecs sont en parfaite corrélation en A et B [*mal dit : il ne s'agit pas de corrélation ; simplement, la liste des résultats est identique pour A et pour B*] :

Par exemple :

A : 0100011001000010110100110010110001000100
B : 0100011001000010110100110010110001000100

Chaque séquence de 0 et de 1 est aléatoire parce que le canon tire chaque paire dans toutes les directions [*mal dit : les paires sont toutes dans des plans perpendiculaires à l'axe des récepteurs, mais les orientations dans ces plans sont aléatoires*]. Remarquons que ces deux séquences aléatoires sont exactement corrélées [*identiques*].

A présent, modifions l'angle relatif des deux polariseurs en faisant pivoter dans le sens des aiguilles d'une montre la fente de la plaque A ; elle forme alors un angle θ avec la fente de la plaque B. Avec une telle géométrie, il est possible qu'un clou d'une paire passe par la fente A et que l'autre rate la fente B, ou l'inverse. De plus, comme les fentes sont assez larges, il est encore possible que les deux clous passent en A et B. Les succès et les échecs en A et B ne seront plus exactement corrélés [*les listes ne seront plus identiques*]. L'enregistrement des résultats aura alors une allure du genre :

A : 0001011000101011100011110010110010100100
B : 0011001000101011100011010010010010100100

Dans l'article, on indique par une flèche les "erreurs" de corrélation. Le nom d'"erreurs" convient parce qu'on peut considérer qu'il s'agit d'erreurs dans le résultat de A par rapport à celui de B, que nous prendrons comme référence *[le mot "erreur" ne convient pas du tout : il s'agit simplement de différences entre A et B].*

Dans l'exemple ci-dessus, il y a 4 erreurs sur 40 tirs, de sorte que le taux d'erreur E (θ) est égal à 10%.

Supposons maintenant que nous ne touchions pas au polariseur A et que nous fassions pivoter le polariseur B d'un angle θ, mais cette fois-ci dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Nous pouvons dire que les erreurs se trouvent dans le résultat obtenu en B, par rapport à A pris comme référence. Le taux d'erreur sera le même que précédemment, E (θ) =10%, puisque la géométrie est la même.

Enfin, faisons tourner le polariseur A d'un angle θ dans le sens des aiguilles d'une montre et le polariseur B également d'un angle θ, mais dans le sens contraire. L'angle relatif des deux polariseurs est maintenant de 2θ. Quel est le taux d'erreurs dans cette configuration ? Il est facile de répondre à cette question si nous supposons que les erreurs en A sont indépendantes de ce qui se passe en B, et vice-versa. Ce faisant, nous faisons l'hypothèse de causalité locale. Après tout, il n'y a aucune raison pour que la situation en B ait un quelconque effet sur le passage du clou dans la fente A. Puisque les erreurs en B étaient précédemment de E (θ), nous devons leur ajouter les erreurs provoquées par la rotation du polariseur A, c'est-à-dire, là encore, E(θ). Il semble donc que le nouveau taux d'erreur doive être égal à la somme des deux taux d'erreur mutuellement exclusifs, soit E(θ) + E(θ) = 2E(θ).

[Commentaire SCM : ceci est totalement absurde. Les deux clous d'une même paire sont, au lancement, exactement dans la même orientation. L'angle entre les deux polariseurs étant connu, le passage en A et en B sont liés de manière totalement déterministe : voir calcul plus bas.]

Mais attention : en faisant pivoter A d'un petit angle θ, nous avons perdu ce qui nous servait de référence pour le résultat enregistré en B ; de même, en faisant pivoter B, nous avons perdu ce qui nous servait de référence pour le résultat en A. Cela signifie que, lorsque de temps en temps, se produira une double erreur – c'est-à-dire une erreur à la fois en A et B - cette double erreur sera enregistrée comme "pas d'erreur". Par exemple, supposons qu'une paire de clous donne les résultats 1 en A et 1 en B lorsque les polariseurs sont parfaitement alignés. Si le polariseur A est légèrement tourné, le clou rate la fente et l'observateur note 0. On a donc une erreur de corrélation [*non : une différence dans les résultats*]. Mais puisque le polariseur en B a également été tourné, il est possible que le clou arrivant en B manque aussi la fente. On a alors affaire à une double erreur, au cours de laquelle deux 1 (1 en A et 1 en B) ont été transformés en deux zéros (0 en A et 0 en B). Comme ces deux zéros ne produisent aucune erreur de corrélation, la double erreur passe inaperçue, si bien que le taux d'erreur pour un angle 2θ entre les polariseurs, E (2θ), est nécessairement inférieur à la somme des taux d'erreurs enregistrés précédemment de façon séparée. C'est ce qu'exprime mathématiquement la formule :

$$E(2\theta) \leq 2E(\theta)$$

qui porte le nom d'inégalité de Bell.

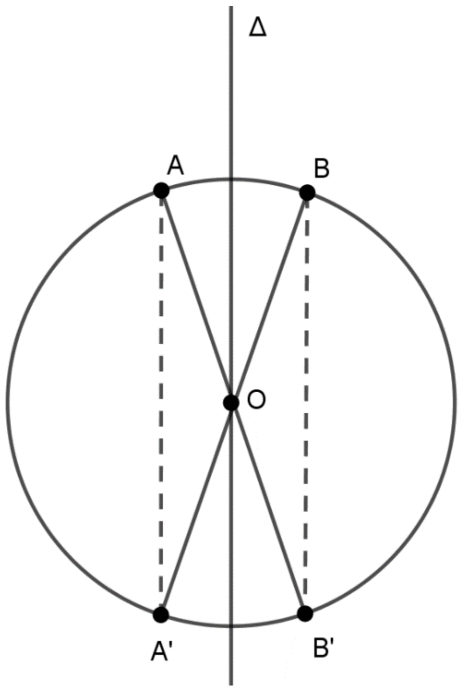
B. La description de la SCM

La description faite plus haut est fondamentalement incorrecte, essentiellement du fait d'un vocabulaire inapproprié.

Faisons une description précise du dispositif.

Le canon à clous est situé à l'origine ; il tire vers les $x<0$ et vers les $x>0$. Les deux récepteurs sont situés respectivement en $x=-1$ et $x=1$. Les paires de clous sont émises simultanément et les deux clous, dans chaque paire, ont la même orientation. Celle-ci est définie par un "segment" de longueur 1, situé dans le plan vertical perpendiculaire à Ox. L'orientation du segment est définie par un angle φ, angle avec l'horizontale : l'équation du support est donc de la forme $z=y\tan(\varphi)$ et l'angle φ suit une loi uniforme entre 0 et 2π ; l'orientation des segments est donc aléatoire, suivant une loi uniforme : aucune direction n'est privilégiée. Mathématiquement parlant, un segment est représenté par un diamètre d'un cercle : les milieux de tous les segments sont à l'origine, les segments sont d'épaisseur nulle et on ne distingue pas entre les deux extrémités (elles ne sont pas peintes de couleurs différentes).

Un récepteur comporte une fente, selon le modèle suivant :



La fente est constituée de l'ensemble $AOBA'OB'$; en réalité, la partie hachurée ne sert à rien. Un clou qui arrive est un segment dont le milieu est en O ; il passera si et seulement si son extrémité supérieure est entre A et B (et donc son extrémité inférieure entre A' et B'.

Notons φ_1 l'angle du segment avec la verticale (donc $\varphi_1 = \varphi - \frac{\pi}{2}$, puisque φ est l'angle avec l'horizontale) et ε l'angle $(OA, \Delta) = (\Delta, OB)$; la largeur de la fente est donc 2ε.

La condition nécessaire et suffisante pour que le segment passe dans la fente est donc $|\varphi_1| < \varepsilon,$ ou encore :

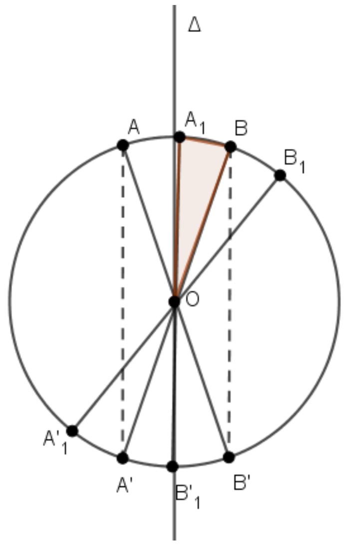
$$\frac{\pi}{2} - \varepsilon < \varphi < \frac{\pi}{2} + \varepsilon.$$

Il s'agit toujours d'inégalités strictes : le segment ne peut pas frotter sur les bords de la fente. Celle-ci est entièrement caractérisée par l'arc de cercle AB et son symétrique $A'B'$.

La proportion de segments qui passent dans la fente, pour chaque récepteur, est donc $p = \frac{4\varepsilon}{2\pi} = \frac{2\varepsilon}{\pi}$ (un segment peut arriver la tête en bas). Cette proportion est évidemment indépendante de l'orientation du récepteur, puisque l'émetteur émet uniformément dans toutes les directions.

Considérons maintenant ce qui se passe au second récepteur. Celui-ci a une fente de même forme, mais l'axe de la fente fait un angle ϑ avec la verticale (on peut évidemment supposer que la fente du premier récepteur est verticale).

Contrairement à ce que dit l'article, le sort du second segment est entièrement connu à partir du sort du premier. Le second segment a le même angle avec la verticale, donc on peut calculer facilement l'angle qu'il fait avec l'axe de la seconde fente, puisque l'angle ϑ des axes des deux fentes est connu.



Dans le dessin ci-contre, les deux fentes ont été superposées ; la fente AOB tourne d'un angle de 20° et devient A_1OB_1 ; on comprend très bien ce qui arrive : le premier segment passe s'il est entre A et B et le second s'il est entre A_1 et B_1. Comme les deux segments ont la même orientation, cela revient à regarder la figure constituée d'une superposition des deux fentes et un seul segment.

– On aura succès conjoint (les deux segments passeront) si le segment unique est entre A_1 et B (intersection des deux fentes)
– On aura échec conjoint si le segment unique est en dehors de AB_1 (réunion des deux fentes) ;
– On aura succès de l'un et échec de l'autre, et donc différence de résultat, si le segment unique est entre A et A_1 ou entre B et B_1. Les probabilités de chaque cas sont faciles à calculer.

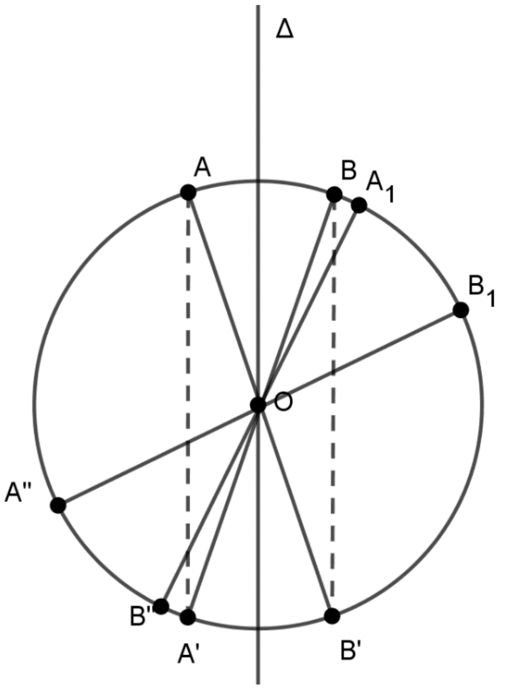
Cas 1 : les deux fentes ont une partie commune

La première s'étend sur $\left]\frac{\pi}{2}-\varepsilon, \frac{\pi}{2}+\varepsilon\right[$, la seconde sur $\left]\frac{\pi}{2}-\varepsilon-\vartheta, \frac{\pi}{2}+\varepsilon-\vartheta\right[$; il y aura recouvrement si $\frac{\pi}{2}-\varepsilon<\frac{\pi}{2}+\varepsilon-\vartheta$, soit $\vartheta<2\varepsilon$. L'arc BA_1 s'étend de $\frac{\pi}{2}-\varepsilon$ à $\frac{\pi}{2}+\varepsilon-\vartheta$; il a donc pour longueur $2\varepsilon-\vartheta$. L'arc AA_1 s'étend de $\frac{\pi}{2}+\varepsilon$ à $\frac{\pi}{2}+\varepsilon-\vartheta$: il a pour longueur ϑ, et de même pour l'arc BB_1.

La probabilité d'une différence (appelée succès de l'un et échec de l'autre) est donc $p_d=\frac{4\vartheta}{2\pi}=\frac{2\vartheta}{\pi}$ si $\vartheta<2\varepsilon$, c'est-à-dire tant que A_1 reste entre A et B.

Cas 2 : les deux fentes n'ont plus de partie commune

Si A_1 est à droite de B, les deux fentes n'ont plus de partie commune.



Si le segment tombe entre A et B, ou entre A_1 et B_1, il passera pour l'un des récepteurs et non pour l'autre ; la probabilité est $p_d = \frac{8\varepsilon}{2\pi} = \frac{4\varepsilon}{\pi}$ qui est indépendant de ϑ.

Nous avons donc obtenu :

Proposition. – *Notons ε la demi-largeur de la fente (angle de tolérance) et ϑ l'angle de rotation entre les deux capteurs. La probabilité d'une différence de résultat entre les bâtons lancés à gauche et à droite est :*

$$p_d(\vartheta) = \frac{2\vartheta}{\pi} \text{ si } \vartheta < 2\varepsilon;$$

$$p_d(\vartheta) = \frac{4\varepsilon}{\pi} \text{ si } \vartheta \geq 2\varepsilon.$$

Il est donc évident que $p_d(2\vartheta) \leq 2p_d(\vartheta)$, mais pas du tout pour les raisons mentionnées dans l'article. En particulier, il n'y a aucune indépendance entre les comportements aux deux capteurs.

II. Seconde Partie : le canon à photons

Nous retournons maintenant à la lecture de l'article, seconde partie.

A. Lecture de l'article

Ces deux hypothèses – **objectivité** et **causalité locale** – sont essentielles à la démonstration de l'inégalité de Bell. Que se passe-t-il si maintenant nous remplaçons les clous par des photons ?

Au lieu d'un canon à clous, nous allons utiliser comme source de particules des positroniums. Un positronium est un "atome" constitué d'un seul électron lié à un positron (ou anti-électron) ; cet atome se décompose, de façon totalement aléatoire, en deux photons émis dans des directions opposées, et (c'est là le point crucial), dont les polarisations relatives sont exactement corrélées [*identiques*]- tout comme celles des clous. La désintégration du positronium est telle que si l'un des photons a une polarisation le long d'une certaine direction, l'autre photon, celui qui part dans la direction opposée, a la même polarisation. La direction absolue de la polarisation des deux photons change de manière aléatoire d'une désintégration à l'autre, mais leur polarisation relative reste la même. C'est là une caractéristique importante de la source – qui fait qu'elle ressemble au canon à clous.

Les photons partent dans des directions opposées et passent au travers de polariseurs très éloignés l'un de l'autre, placés en A et B. Quant aux observateurs, ce sont des tubes photomultiplicateurs placés derrière chacun des polariseurs et capables de détecter des photons uniques. Si un photomultiplicateur détecte un photon, l'événement est signalé par un 1 ; si aucun photon n'est détecté, l'appareil marque un 0. Dans la configuration initiale, les deux polariseurs A et B sont parfaitement alignés l'un par rapport à l'autre. Faisons en sorte que le polariseur B soit fixe et que A puisse tourner sur lui-même ; soit ϑ l'angle relatif des deux polariseurs. Dans la configuration initiale, donc, $\vartheta = 0$.

Si un photon touche le polariseur, il a une certaine probabilité de passer à travers et d'être détecté. Si un photon a une polarisation parallèle à la direction de passage du polariseur, il parvient jusqu'au détecteur et on enregistre un 1. Si la polarisation du photon est perpendiculaire à la direction du polariseur, le photon ne passe pas et on enregistre un 0. Pour toute orientation, il existe une certaine probabilité comprise entre 0 et 1 que le photon passe à travers.

La polarisation absolue des photons a une direction totalement aléatoire, par rapport à celle du polariseur, de sorte que dans la configuration originale ($\vartheta = 0$), chaque détecteur enregistre une série de 0 et de 1. Supposons que les séries se présentent de la façon suivante ;

$$\boxed{\begin{array}{l} A: 011010110000101101110011000101110\cdots \\ \\ B: 011010110000101101110011000101110\cdots \end{array}}$$

C'est exactement la même chose que dans le cas du canon à clous. Les séries sont identiques, parce que les deux photons d'une même paire possèdent une polarisation identique et que l'angle entre les polariseurs est égal à 0. De plus, chaque série comporte un nombre égal de 0 et de 1, puisqu'un photon a autant de chance d'atteindre le détecteur que de ne pas y parvenir.

[Si $\vartheta = 0$, il est certain que les deux séries seront identiques ; par contre, il n'y a aucune raison qu'elles comportent le même nombre de 0 et de 1 : 1 signifie que le photon est passé par la fente, et ceci est proportionnel à la taille de la fente, qui n'apparaît pas ici. En tout état de cause, le nombre de 1 devrait être très faible devant le nombre de 0, sauf si la fente est très large ; déjà ici, on constate une description insuffisante de l'appareil de mesure.]

A présent, faisons pivoter le polariseur A d'un angle $\vartheta = 25°$. Du coup, les deux photons d'une même paire n'ont plus tous les deux exactement la même probabilité d'atteindre les polariseurs et d'être détectés [*A priori, si : les lancements se faisant dans des directions aléatoires selon une loi uniforme, la probabilité du premier d'atteindre sa fente est la même que pour le second, et ce quel que soit l'angle des fentes*].

Les séries ne sont donc plus entièrement identiques, elles présentent de temps en temps des « erreurs » de corrélation [*des différences*]. Cependant, en moyenne, les séries A ou B comportent le même nombre de 0 et de 1, parce que la probabilité de passage dans le polariseur est indépendante de son orientation [*la probabilité de passer par une fente est indépendante de l'orientation, puisque les lancers ont des directions selon une loi uniforme : c'est précisément ce que nous venons de dire plus haut]*. On a maintenant le résultat :

$$\boxed{\begin{array}{l} A: 00101111011000111110110100111000101011100\cdots \\ \\ B: 01100111011000111010110100110000101011100\cdots \end{array}}$$

Nous avons signalé d'une flèche les « erreurs » de corrélation [*ce ne sont pas des erreurs, mais des différences*]. Dans l'exemple ci-dessus, il y a 4 erreurs sur 40 événements, de sorte que le taux d'erreur est $E(\vartheta) = 10\%$.

Pour l'instant, l'expérience des photons ressemble à celle du canon à clous. Les photons se comportent comme des clous, comme des objets visualisables. Si nous supposons que l'état de polarisation des photons en A et B est objectif –hypothèse d'objectivité– et qu'une mesure en A n'affecte pas les événements en B -hypothèse de causalité locale, cette expérience doit satisfaire à l'inégalité de Bell $E(2\vartheta) \leq 2E(\vartheta)$.

Or, si nous doublons l'angle pour avoir $2\vartheta = 50°$, nous obtenons le résultat suivant :

```
A :10001110011001101  11001  111110110101 000 1 00···
    ▌▌    ▌   ▌    ▌▌▌      ▌              ▌▌▌▌
B :11101111010001110 01001100110110101   101 010···
```

soit 12 erreurs sur 40 événements et donc $E(2\vartheta) = 30\%$. Mais nous avions $E(\vartheta) = 10\%$, $2E(\vartheta) = 20\%$; l'inégalité de Bell $E(2\vartheta) \leq 2E(\vartheta)$ n'est donc pas vérifiée.

L'inégalité de Bell est donc contredite par cette expérience portant sur des photons. Conclusion :

- ou l'hypothèse d'objectivité est fausse pour les photons ;
- ou bien c'est celle de causalité locale ;
- ou encore les deux à la fois

Voilà qui est très remarquable !

B. *Commentaire de la SCM*

C'est surtout l'absurdité du raisonnement qui est remarquable. L'auteur ne semble pas remarquer que son expérience "clous" et son expérience "photons" donnent des résultats radicalement divergents et irréconciliables. Expliquons ceci :

Dans l'expérience clous, nous avons une fente d'une certaine largeur (largeur angulaire, notée 2ε dans la première partie). Nous constatons que la probabilité de différence est constante dès que l'angle entre les deux instruments de mesure dépasse une certaine valeur :

$$p_d(\vartheta) = \frac{4\varepsilon}{\pi} \text{ si } \vartheta \geq 2\varepsilon.$$

Cette constatation est très intuitive : si la fente fait 2°, la tourner de 20° ou 30° ne change rien : aucun segment (ou clou) ne peut passer par les deux à la fois ; il y a différence si l'un des segments passe par la fente, ce qui implique automatiquement que l'autre ne le peut pas, puisque les segments sont alignés et que les fentes ne le sont pas.

En mécanique quantique, en admettant la représentation par fonction d'onde et le formalisme hilbertien, on démontre que la probabilité de probabilité de mesurer simultanément le photon 1 avec la polarisation V_α et le photon 2 avec la polarisation V_β est donnée par la formule :

$$P(V_\alpha, V_\beta) = \frac{1}{2}\cos^2(\alpha - \beta)$$

Ici, l'un des polariseurs est vertical et l'autre fait un angle α ; la formule se réduit donc à :

$$P(V_\alpha, V_0) = \frac{1}{2}\cos^2(\alpha)$$

Il est complètement évident que cette quantité n'est jamais constante, à la différence de la précédente : la comparaison avec un émetteur de clous n'est donc pas pertinente. Cela n'a rien à voir avec des hypothèses d'objectivité ou de causalité, ni avec des variables cachées !

Essayons de comprendre en quoi consiste le dispositif "photons" et en quoi il diffère du dispositifs "clous".

1. **Emetteur**

Dans le cas des clous, on comprend bien le principe : les clous sont émis avec une orientation aléatoire selon une loi uniforme, deux clous d'une même paire ayant la même orientation. Les clous se propagent sans changer d'orientation.

Dans le cas des photons, on ne comprend pas le principe de l'émission : comment est-on certain que l'émission se fait selon une loi uniforme, comment est-on certain que les deux photons ont exactement la même orientation, et comment sait-on que cette orientation ne se modifie pas au cours du trajet ?

2. **Récepteur**

Dans le cas des clous, on comprend bien quelle est la géométrie de la fente : il y a une certaine tolérance, caractérisée par l'angle ε ci-dessus.

Dans le cas des photons, on ne comprend pas quelle est la tolérance. D'où sort le calcul de la probabilité, pour un angle α donné ? La configuration du récepteur (taille de la fente) doit bien intervenir, d'une façon ou d'une autre ; ce n'est pas mentionné.

L'article utilise une argumentation qui est en contradiction fondamentale avec les concepts de la mécanique quantique. Citons à nouveau :

*"Un positronium est un "atome" constitué d'un seul électron lié à un positron (ou anti-électron) ; cet "atome" se décompose, de façon totalement aléatoire, en deux photons émis dans des directions opposées, et (c'est là le point crucial), dont les polarisations relatives sont **exactement corrélées** - tout comme celles des clous."*

En mécanique quantique, tout est probabiliste ; il est donc impossible que les polarisations des deux photons soient exactement identiques. Au moment de l'émission, la polarisation du second diffère de celle du premier selon une certaine loi de probabilité ; on peut admettre que le maximum est en 0, et que la probabilité décroît avec l'angle.

Ensuite, il faudrait vérifier que la polarisation reste constante dans le temps ; pourquoi ne varierait-elle pas entre l'émission et la réception ?

Nous reprenons la lecture de l'article et abordons la conclusion.

III. Conclusion

A. Retour à l'article

Originellement, John Bell cherchait un moyen de tester l'hypothèse de variables cachées dans le monde quotidien, celui des tables, des chaises, des cailloux. Cela le conduisit à montrer que le fait que son inégalité soit violée par la théorie quantique n'excluait pas forcément l'idée d'un monde objectif décrit par des variables cachées, à condition toutefois que la réalité décrite par ces variables soit non-locale. Rien ne s'oppose à ce qu'existe, par- delà la réalité quantique, une autre réalité, décrite par des variables cachées, dans laquelle les influences s'exerceraient instantanément et sur n'importe quelle distance, sans médiation évidente. Certes, il est possible de croire que le monde quantique est objectif – ce que souhaitait Einstein – mais alors il faut accepter les influences non-locales – à quoi Einstein et la plupart des physiciens se refusent.

Pour comprendre de manière intuitive comment l'objectivité implique la non-localité, comparons les résultats obtenus avec $\vartheta = 25°$ et $\vartheta = 50°$. Il y a beaucoup plus d'erreurs [*ce ne sont pas des erreurs, mais des différences*] lorsque $\vartheta = 50°$ que lorsque $\vartheta = 25°$: 12 contre 4 [*ceci montre bien que l'analogie avec les clous n'est pas correcte].*

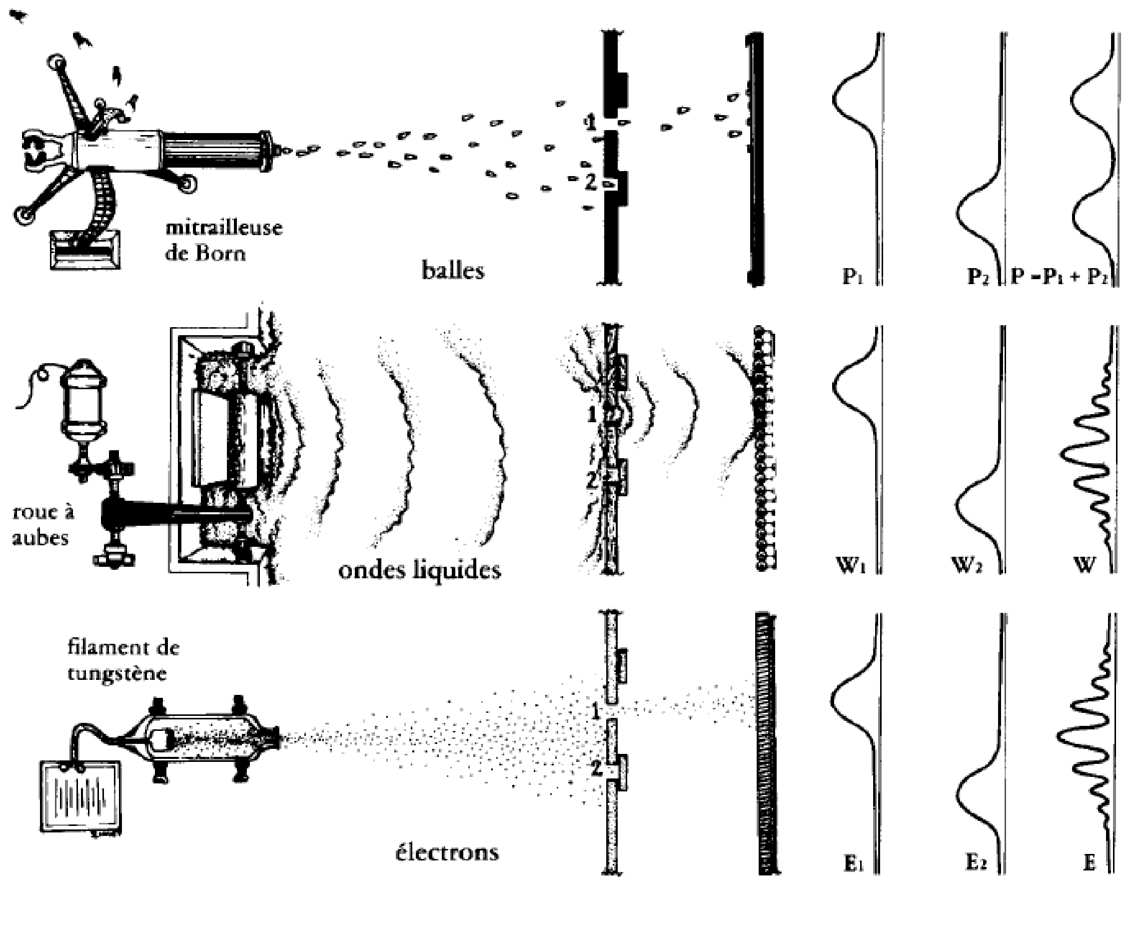
On dirait que le fait d'avoir tourné le polariseur *A* a influencé la polarisation des photons qui doivent être détectés par *B*, produisant ainsi toutes ces erreurs "supplémentaires", responsables du fait que l'inégalité de Bell est contredite. Imaginons que l'observateur *B* se trouve sur Terre et l'observateur *A* sur une galaxie lointaine à des années-lumière de là. Tout se passe comme si en faisant pivoter le polariseur*A*, on avait émis un signal plus rapide que la lumière, capable de modifier instantanément le résultat de *B*.

Au point où nous en sommes (la fin de la localité !), il nous faut aller plus avant, car aucun des termes de l'alternative – une réalité non objective ou une réalité non-locale – n'est acceptable. Certains vulgarisateurs des travaux de Bell confrontés à cette alternative n'ontpas hésité à proclamer qu'il s'agissait d'une vérification de la télépathie et que toutes les parties de l'univers étaient instantanément liées les unes aux autres. D'autres en ont conclu qu'il existait un mode de communication plus rapide que la lumière. Tout cela n'a pas de sens ; la théorie quantique et l'inégalité de Bell n'impliquent rien de tel. Ces commentateurs ont simplement pris leurs désirs pour des réalités.

Pour en arriver à la conclusion que les photons sont soumis à des influences non- locales, nous nous sommes une fois de plus laissés aller à les imaginer dans un état bien défini. Ce n'est que si nous pouvons montrer que les photons existent bel et bien dans un état défini de polarisation, sans pour autant modifier cet état, que nous pourrons dire que l'expérience de Bell manifeste l'existence d'influences non-locales.

La vérification est aisée, lorsqu'il s'agit de clous – il suffit d'installer une caméra à défilement très rapide et de filmer les clous lorsqu'ils arrivent près des polariseurs. Cela ne troublera en rien leur état. Le problème, c'est que l'expérience du canon à clous ne contredisait pas l'inégalité de Bell, ce qui n'est pas le cas avec l'expérience des photons.

Si nous essayons à présent de vérifier l'état de polarisation d'un photon, nous voyons que ce n'est pas possible sans du même coup modifier les conditions initiales de l'expérience, à savoir que deux photons d'une même paire doivent avoir des polarisations identiques. Lorsque nous mesurons la polarisation d'un photon, nous le plaçons dans un état défini, ce qui change les conditions initiales de l'expérience. C'est exactement la même chose que dans l'expérience des deux trous de Young : en observant grâce à une source lumineuse placée derrière le trou par quel trou l'électron est passé, nous avons là aussi modifié la figure observée sur l'écran.



Sous ses trois formes, l'expérience des deux trous d'Young : la mitrailleuse de Max Born, les ondes liquides et les électrons.

Autant il nous est possible de représenter comment les balles et les ondes liquides (objets relevant de la physiqueclassique) produisent les résultats observés sur les écrans de détection, autant il nous est impossible de représenter ce qui advient aux électrons (particules quantiques) au niveau des deux trous.

De même, ici le fait de déterminer l'état objectif du photon modifie les conditions dans lesquelles a été établie l'inégalité de Bell. Toute tentative pour vérifier expérimentalement l'hypothèse d'objectivité entraîne une modification des conditions expérimentales telle que nous ne pouvons plus nous servir de la violation de l'inégalité de Bell pour conclure à l'existence d'influences non-locales.

Supposons donc que nous ne tentions pas de vérifier l'état des photons. Après tout, nous connaissons les résultats de l'expérience en A et en B et ces renseignements qui font partie du monde macroscopique au même titre que les tables, les chaises et les chats sont certainement objectifs. L'observateur placé en B ne peut-il lire le résultat, voir que l'inégalité de Bell est contredite et en conclure que la causalité locale est également contredite ? Eh bien, non car souvenons-nous que la source émet des photons par paires, avec une polarisation aléatoire. Cela signifie que les enregistrements effectués en A et en B constituent des séquences totalement aléatoires de 0 et de 1, quel que soit l'angle choisi.

A première vue, nous pourrions croire qu'en modifiant le polariseur en A, nous avons directement influé sur le nombre d'erreurs enregistrées en B. Mais alors, rien qu'en modifiantde diverses façons le polariseur en A et en étudiant les modifications du nombre d'erreurs enregistrées en B, l'observateur en B pourrait décrypter un message envoyé par A. On obtiendrait ainsi un télégraphe contraire à la notion de causalité.

Mais en réalité, aucune information de ce type ne peut être transmise de A à B à l'aide d'un tel système, car avec un seul et unique enregistrement d'événements, soit en A, soit en B, nous ne sommes guèreplus avancés que si nous possédions un message ultra secret rédigé dans un code aléatoire –un tel message est impossible à déchiffrer. Ainsi donc, du fait que les séquences enregistrées en A et en B sont totalement aléatoires, il n'est pas possible de communiquer entre A et B. il n'y a donc pas de non-localité.

Deux séquences aléatoires peuvent fournir une information non aléatoire lorsqu'elles sont comparées l'une à l'autre. L'information se trouve dans la corrélation née de la comparaison. Il en va de même avec les enregistrements effectués en A et en B : l'information concernant l'angle relatif des polariseurs est inscrite dans la corrélation des deux enregistrements, mais pas dans chaque enregistrement pris individuellement. Lorsqu'on modifie l'angle du polariseur, une séquence aléatoire est transformée en une autre séquence aléatoire et il est impossible de dire ce qui se passe en n'étudiant qu'un seul enregistrement. Ce type de processus aléatoire se déroule effectivement dans la nature, et c'est pour cela que nous rejetons l'idée d'une véritable non-localité.

Modifiée de manière aléatoire, une séquence aléatoire reste une séquence aléatoire ! – le désordre reste désordonné. C'est précisément ce qui se passe dans le cas des séquences aléatoires enregistrées en A et B. Par contre, la comparaison des séquences permet de savoir que les conditions expérimentales ont été modifiées du fait des mouvements des polariseurs

– l’information réside dans la corrélation, pas dans les enregistrements individuels. Cette corrélation est entièrement prévue par la théorie quantique.

En conclusion, l’expérience de Bell n’implique pas l’existence de véritables influences non-locales, même si nous acceptons l’objectivité du monde microscopique. Elle implique simplement que l’on peut modifier instantanément la corrélation de deux séquences aléatoires d’événements survenus aux deux extrémités de la galaxie. Mais la corrélation de deux ensembles d’événements très éloignés les uns des autres ne constitue pas un objet local et l’information qu’elle peut contenir ne peut servir à contredire le principe de causalité locale.

Avec l’inégalité de Bell et l’expérience d’EPR, nous avons pénétré au cœur même de "l’étrangeté quantique".

B. Commentaire SCM

Il n'est pas nécessaire d'invoquer un principe de "causalité locale" ou d'"étrangeté quantique" : les photons ne sont pas nécessairement polarisés exactement dans la même direction ; les principes fondamentaux de la mécanique quantique s'y opposent clairement. Il faudrait disposer d'une densité de probabilité portant sur l'angle possible entre la polarisation de A et celle de B ; si cette loi n'est pas explicitée, tout le reste est dépourvu de valeur explicative.

Il faudrait aussi expliciter la nature des fentes et leur largeur : quel est l'angle admissible, pour un photon polarisé, pour qu'il accepte de passer par une fente verticale ? Il n'est pas évident, du reste, que cette tolérance soit la même pour toutes les inclinaisons : la Nature n'est pas nécessairement invariante par rotation.

Nous pouvons rejoindre la position d'Albert Einstein : il y aurait une explication assez simple au fait que deux photons intriqués révèlent la même polarisation lorsqu'ils sont mesurés. Prenons pour simplifier le cas de deux valeurs possibles (comme pour le spin de l'électron). Admettons que l'électron ait deux "couleurs" possibles, rouge et bleu (c'est ce que Einstein appelait "variable cachée"). Lors de l'intrication, les deux éléments de la paire sont assujettis à être de la même couleur, qu'ils garderont toute leur vie, et au moment de la mesure, la couleur détermine le spin.