

LA SECONDE RÉVOLUTION QUANTIQUE : INTRICATIONS QUANTIQUES ET NON-LOCALITÉ QUANTIQUE



103-1- David Bohm, physicien : la non-localité entre en scène

En 1951-1952, David Bohm publie *Théorie quantique*, plus deux documents sur le sujet. Il remet en question l'interprétation classique de Copenhague et produit une version plus poussée de l'onde pilote de Louis de Broglie, qui avait été rejetée en 1927 (encore Solvay). Selon David Bohm, une particule a une trajectoire bien définie (position, vitesse) à chaque instant, mais que le principe d'incertitude cache en empêchant l'expérimentateur de la mesurer. C'est une théorie non-locale de la réalité que certains disent irréconciliable avec la relativité restreinte. Disons que cette objection elle-même est une interprétation et non une preuve scientifique que la théorie de David Bohm serait fausse.

Comme David Bohm fait appel à une dimension cachée de la réalité, qu'il appelle potentiel quantique (pour ceux qui veulent fouiller plus loin, voir les livres de David Bohm), Pauli et Heisenberg se sont permis de dire que la théorie de Bohm est "métaphysique et idéologique" (sic !). Ce n'est encore là qu'une opinion qui n'a rien de scientifique en soi. De plus, l'ouverture de David Bohm à une Intelligence supérieure et à un ordre "implicite" de la réalité dans l'Univers va faire qu'il sera mis à l'index sinon même au bûcher de la science dite officielle. Regrettable, mais vrai... Fermeture d'esprit, quand tu nous tiens !

Pourquoi parler ici de David Bohm (qui pourrait faire l'objet de plusieurs conférences) ? Parce que c'est à partir de ses travaux que tout l'édifice de la localité va s'effondrer. Nous allons, dans un instant, définir ce qu'est la localité et ce qu'est la non-localité. Depuis 1932, l'interprétation de Copenhague (revoir les textes précédents) était le dogme officiel en physique quantique, parce que le mathématicien Von Neumann (1932) avait "prouvé" que toute approche à variables cachées en physique quantique devait être éliminée. Un physicien alors inconnu prouva en 1964 que la preuve mathématique de Von Neumann était en fait... fausse.

103-2- Localité et non-localité

Ce physicien irlandais s'appelle John Bell (1928-1990). Dès 1949, il allait trouver puis démontrer une erreur dans les hypothèses de Von Neumann. Dans les faits, une théorie quantique à variables cachées n'est pas impossible. La preuve d'impossibilité était fausse, incorrecte.

On appelle "localité" la réalité observable et mesurable concernant la transmission d'une influence dans l'espace-temps d'un objet sur un autre. (Exemple : diriger un faisceau laser sur un détecteur placé sur la Lune est une influence locale partie de la Terre vers la Lune). C'est une influence de proche en proche (ici par des photons) qui se transmet dans notre espace-temps. (Le mot "notre" est important, car personne n'a pu prouver que notre

espace-temps est le seul qui existe. Cela rejoint certaines propositions de David Bohm.

Une influence (une cause) à effet instantané (ou qui violerait la relativité restreinte, v supérieure à c) – c est la vitesse de la lumière – est incompatible avec la réalité classique. En phénomène local (localité), ces influences se font de proche en proche, même à des vitesses relativistes (v se rapprochant alors de c ou quand $v = c$, ex. photons, etc.), même en relativité générale (pour les ondes gravitationnelles $v = c$). Remarquez bien que le terme "localité" n'a rien à voir avec la distance parcourue, on l'a vu avec la Lune. Les photons qui ont quitté le big-bang il y a près de 13,8 milliards d'années, et qui sont détectés aujourd'hui par le satellite Planck (photons micro-ondes du fond diffus cosmologique), c'est de la localité. La cause qui produit la détection est parfaitement claire, évidente et conforme à la relativité (elle respecte "notre" espace-temps).

On appelle "non-localité" la réalisation observable (mesurable) d'une influence à distance supraluminique (v plus grand que c), voire instantanée (v est infinie) d'un objet sur un autre. Si l'influence se produit dans notre espace-temps, cela viole la relativité restreinte d'Einstein (qui jusqu'à présent – 2013 – n'a jamais été prise en défaut). Autrement dit une telle influence est impossible dans notre espace-temps, et c'est pour cela qu'en 1935 avec l'article EPR, Einstein ne peut pas accepter la réalité d'une telle « influence fantomatique à distance » (sic).

Si une telle non-localité est impossible par notre espace-temps et qu'une telle "influence" existe entre, disons 2 particules, cette influence doit (éventuellement) se faire par une autre dimension de la réalité. Cette idée d'autres dimensions en physique n'est pas du tout saugrenue et même à l'ordre du jour, même si cela en dérange plusieurs.

103-3- John Bell et la localité en physique

(Revoir, au besoin, le texte sur les corrélations quantiques - intrications quantiques - avant de poursuivre la lecture)

John Bell remet sur la table l'expérience EPR de 1935. Il essaye de "sauver" la localité (pour la simple raison que la non-localité semble inconcevable et même métaphysique – voir David Bohm). Supposons 2 électrons (e-) corrélés (intriqués). Une des caractéristiques de l'électron est son "spin" S qui peut avoir seulement 2 valeurs : $+1/2$ ou $-1/2$. Le spin de l'électron A est noté S_a , Le spin de l'électron B est noté S_b .

Les 2 e- sont intriqués et se trouvent à une certaine distance l'un de l'autre. On mesure S_a (le résultat ne peut être connu d'avance, c'est un pur hasard, le résultat est imprévisible).

Si on mesure $S_a = +1/2$, alors nécessairement on trouve que $S_b = -1/2$

Si on mesure $S_a = -1/2$, alors, nécessairement on trouve que $S_b = +1/2$.

Cela est dû au fait que $e(A)$ et $e(B)$ sont intriqués (corrélés). Mais comment le résultat ci-dessus est-il possible ? Est-ce une influence locale ou une influence non-locale ? Voilà la question, et c'est ici que John Bell va créer une véritable révolution en physique, qui deviendra, en fait, le cœur même de la seconde révolution quantique.

103-4- John Bell : coup de masse pour la localité

Je ne détaille pas ici le fameux jeu de Bell avec deux partenaires Alice et Bob. C'est pourtant passionnant d'aller au fond du sujet, mais ce n'est pas indispensable pour la compréhension. Je vous renvoie au livre de Nicolas Gisin *L'impensable hasard*. Le livre est bon, mais quelques erreurs typographiques dans certains schémas compliquent la lecture du chercheur assidu et sérieux. Il faut donc corriger. Par ailleurs le talent de communicateur de l'auteur laisse un peu à désirer. Cela aurait pu être écrit avec beaucoup plus de clarté (chapitre 2). Tous les physiciens ne sont pas pédagogues. Mais le livre a un intérêt certain puisque, malgré tout, on réussit, avec patience et persévérance, à voir la preuve certaine de la violation des inégalités de Bell que l'on peut résumer ainsi :

« Aucune théorie à variables cachées locales ne peut reproduire les mêmes fréquences de corrélations que la mécanique quantique. » Autrement dit, les corrélations quantiques sont de nature non-locale (il n'y a pas d'explication locale possible pour un tel niveau de corrélations entre les 2 particules). C'est l'excellente phrase du physicien quantique Bernard d'Espagnat qui dit : « Aucune théorie à variables cachées locales n'est compatible avec les faits. » (*Traité de physique et de philosophie*)

Pour Alice et Bob, la probabilité de gagner au jeu de Bell est inférieure à trois chances sur quatre (inférieure à $3/4$). Par contre, si dans le jeu on fait intervenir 2 particules intriquées (une chez Alice et une chez Bob) on voit que la probabilité de gagner au jeu de Bell dépasse cette probabilité : la probabilité de gagner devient alors supérieure à $3/4$! Autrement dit, du simple fait qu'il y ait intrication quantique entre deux particules fait que les chances de gagner au jeu de Bell sont supérieures à celles de gagner s'il n'y a pas de corrélation quantique. La fréquence des corrélations dans les résultats est plus élevée que ce qui est prédit par un simple hasard aléatoire.

C'est le résumé du fameux théorème de Bell. Un physicien disait : « Celui qui n'est pas dérangé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête. »

103-5- Alain Aspect vérifie expérimentalement la violation des inégalités de Bell

En 1982 le physicien Alain Aspect annonce la confirmation expérimentale du théorème de Bell. Cette expérience entre deux particules intriquées sera reprise par d'autres et répétée maintes fois ensuite, en augmentant constamment la distance entre les deux particules.

Le théorème de Bell et les expériences d'Aspect et les suivantes annoncent la fin de la réalité locale (à la manière d'Einstein). Résumons l'essentiel à retenir :

- 1- IL N'Y A PAS DE VARIABLES CACHÉES LOCALES (PROPRES À LA SECONDE PARTICULE).
- 2- IL Y A UNE "INFLUENCE" DE NATURE SUPRALUMINIQUE OU MÊME INSTANTANÉE ENTRE LES PARTICULES A ET B. (Le principe de "non-séparabilité" est une expression qui n'explique rien).
- 3- LE MONDE QUANTIQUE PRÉSENTE DES CARACTÉRISTIQUES DE NON-LOCALITÉ (IL IGNORE NOTRE ESPACE-TEMPS).
- 4- LE PUR HASARD EXISTE. IL N'Y A PAS DE CAUSES LOCALES (DANS NOTRE ESPACE-TEMPS) POUVANT EXPLIQUER LE RÉSULTAT D'UNE MESURE QUANTIQUE (EXEMPLE : LA MESURE DU SPIN D'UN ÉLECTRON DONNERA $S_z = +1/2$ OU $S_z = -1/2$; MAIS, TANT QUE L'ON N'A PAS FAIT LA MESURE, ON NE SAIT PAS CE QUE SERA S_z ($-1/2$ OU $+1/2$); ET ON NE CONNAÎT AUCUNE CAUSE POUVANT INFLUENCER OU DÉTER-

MINER LE RÉSULTAT. (ALORS QUE POUR UN TIRAGE DE DÉES OU DE PILE OU FACE, IL EXISTE BEL ET BIEN DES CAUSES LOCALES – COMPLEXES, MAIS CONNUES - QUI DÉTERMINENT LE RÉSULTAT).

103-6- Conclusions

Les intrications quantiques avec leurs caractéristiques de non-localité constituent le cœur même de la seconde révolution quantique. Cela implique un type inconnu "d'influence" instantanée (ou du moins supraluminique) qui ne tient pas compte de notre espace-temps. (Dans les faits, les intrications quantiques ne violent pas la relativité restreinte, mais plutôt, font appel à "autre chose" et c'est cette "autre chose" qui est justement le cœur du "mystère" quantique. Richard Feynman disait : « Personne n'y comprend rien. »

Einstein (qui n'avait pas accès aux mesures comme aujourd'hui) croyait : 1- Au réalisme indépendant de l'observateur ; 2- À la causalité (le hasard n'a pas sa place) ; 3- À la localité des événements. Et finalement, dans les années 1950, il dira : « Le cœur du problème n'est pas tellement la causalité, mais le réalisme. »

103-7- Communications quantiques ?

On pourrait penser, au premier abord, que le phénomène des intrications quantiques et la non-localité de ces phénomènes ("influences" non-locales) peuvent servir à communiquer instantanément (ou du moins à une vitesse v supérieure à celle de la lumière), peu importe la distance entre A et B. Dans les faits, cela est impossible puisque le résultat de la mesure sur A est du pur hasard. On ne peut donc pas choisir le message (chiffres) à envoyer. C'est le théorème de la non-signalisation.

Par contre, les corrélations quantiques permettent la cryptographie quantique (codage), par exemple pour produire un mot de passe "incassable". Car A sait (voit) instantanément si quelqu'un (ou quelque chose) a modifié le code B (le code de contrôle est A).

On peut aussi générer des nombres non plus seulement de façon aléatoire, mais en se servant véritablement du pur hasard. Tout cela peut avoir des applications concrètes, mais cela nous ferait sortir du sujet.

103-8- Interprétations de la physique quantique

Un sondage a été fait auprès de quelques physiciens pour connaître leur interprétation de la physique quantique : comment expliquer le comportement des électrons lors des sauts quantiques; comment expliquer le paradoxe de la mesure (pourquoi un résultat plutôt qu'un autre au moment de la mesure), comment expliquer les corrélations quantiques qui sont caractérisées par la non-localité ? En 1999, Sur 84 physiciens,

4 ont choisi l'interprétation de Copenhague.

30 ont opté pour la théorie des mondes multiples d'Everett.

50 n'ont opté pour aucune de ces deux interprétations (on ne dit pas ce qu'ils ont choisi ou imaginé !) Et qu'en est-il aujourd'hui ?

En plus de ces deux interprétations (on voit que celle des mondes multiples domine, même si plusieurs disent que ce n'est pas de la physique – voir George Ellis, *Ciel et Espace* juillet 2013), il y en a d'autres :

- L'interprétation de David Bohm (qui est bien démontrée), mais qui dérange plusieurs.
- L'interprétation pragmatiste
- Ceux qui disent : laissons tomber ou rejettent les interprétations. Cette approche est en fait antiscientifique parce que le propre de la science est justement de vouloir comprendre. Oui, le cœur de la physique quantique dérange l'esprit humain qui cherche trop souvent à se limiter lui-même et à limiter.

Le physicien (prix Nobel) Gérard 't Hooft disait : « Une interprétation (une théorie) qui donne "peut-être" comme réponse devrait être reconnue comme inexacte. »

Et Roger Penrose : « L'attitude, l'interprétation d'Einstein n'est probablement pas si fausse. » Et il ne faudrait (surtout) pas oublier l'interprétation du physicien génial David Bohm.

Enfin, expliquer les corrélations quantiques en disant que les 2 particules intriquées ne forment qu'un seul système n'explique absolument rien du tout. C'est une sorte d'image, une vue de l'esprit qui est bien loin de la physique explicative. Le but de la science n'est-il pas d'expliquer et de comprendre ? Bien sûr que oui.

Marc Saint Hilaire