

CORRÉLATIONS, CAUSALITÉ, RÉALITÉ

Contribution à un colloque organisé en Sorbonne par l'UIP
le 2 juin 2007

Bernard d'Espagnat

Ce colloque s'intitule: *Nouvelles perspectives sur la matière, la lumière et l'Univers*. Et il mérite bien son titre puisqu'il y sera question de théories et d'expériences vraiment nouvelles - remontant à moins d'une décennie ou à peu près - présentées par leurs auteurs mêmes.

Mais ces développements très nouveaux s'inscrivent eux-mêmes dans un flux continu de profonde remise en question des conceptions fondamentales sur la matière héritées des sciences dites "classiques". Et, chose étrange, cette fondamentale remise en question - qui remonte à la découverte de la mécanique quantique dans l'entre-deux-guerres, et s'est poursuivie par celle de la non-séparabilité - est profondément ignorée, non seulement du grand public mais même (sauf exceptions rares) de la "fraction pensante" du public: intellectuels, philosophes etc. En guise d'entrée en matière il n'est donc sans doute pas inutile que nous reprenions rapidement la question à la base pour bien cerner en quoi cette "remise en question" consiste.

Et d'abord, qu'étaient ces conceptions sur la matière qu'il va s'agir de réfuter? Eh bien, c'est simple. Un caillou, par exemple, a une forme, une position dans l'espace et éventuellement un mouvement. Si on possède ces trois données on a une connaissance valable du caillou. Celui-ci, d'autre part, est analysable en parties, qui, elles aussi, doivent être descriptibles au moyen de telles données. Et on se dit que cela doit être vrai aussi des parties dont se composent ces parties. Et cela, soit *ad infinitum* - mais on tombe alors sur le paradoxe pascalien du ciron ! - soit plutôt jusqu'à ce qu'on arrive à des parties ultimes, indivisibles par la pensée. L'idée est alors que les choses sont constituées de particules élémentaires ayant chacune une position, un mouvement et éventuellement une forme. Pour que les choses ne se désagrègent pas, il faut bien entendu que les particules composantes soient liées entre elles par des forces attractives (on pense à quelque chose comme la gravité), et puisque ce qui se passe, ici sur Terre, n'est pas appréciablement affecté par ce qui se passe sur Sirius on doit admettre que ces forces sont d'autant plus faibles que les particules qu'elles lient sont plus éloignées.

On arrive ainsi à une vision des choses - l'atomisme philosophique - qui est claire, rationnelle et adaptée à la mentalité de notre temps. D'ailleurs c'est bien celle que nous nous formons spontanément, simplement à partir des cours de chimie et de physique suivis au lycée. Je note en passant - pour la suite - que cet atomisme philosophique s'insère dans une conception plus générale - le réalisme local - définie comme étant l'idée que, "en droit", à la limite, nous pouvons connaître la réalité telle qu'elle est vraiment et que, dans cette réalité, les forces de liaison entre deux objets sont d'autant plus faibles que la distance entre ces objets est plus grande.

Mais voilà ! La grande remise en question dont nous parlions consiste en ceci que cette vision, celle de l'atomisme philosophique ou du réalisme local, s'est révélée être erronée. Il est très vrai que la réalité paraît conforme à l'atomisme philosophique à beaucoup d'égards, et que les résultats de la grande majorité des expériences scientifiques sont compatibles avec lui. Et cependant, en tant que description prétendument fidèle de la réalité en soi, cette conception est radicalement fautive.

Cela découle de la physique elle-même. Comment le montre-t-on? En fait il y a deux manières d'établir la chose. Je dirai, pour simplifier, la manière théorique et la manière expérimentale.

La manière théorique consiste à montrer qu'il y a incompatibilité entre le réalisme local - et donc a fortiori l'atomisme philosophique - d'une part et, d'autre part, une grande théorie abondamment corroborée par l'expérience dans les domaines les plus divers. En l'espèce, il s'agit là, comme je le disais, de la mécanique quantique. Cette mécanique quantique est excellente aussi longtemps qu'il s'agit de prédire des résultats d'observation. Elle n'a, en ce domaine, jamais

été prise en défaut, même quand ce qu'elle prévoyait semblait à première vue tout à fait incroyable et contraire au bon sens. Je m'en voudrais d'empiéter sur les thèmes d'autres intervenants mais je crois et j'espère que M. Brassard, ici présent, parlera aujourd'hui d'effets que lui et ses collègues ont prévus et qui sont vraiment remarquables: téléportation, codes cryptographiques impossibles à briser... En revanche cette mécanique quantique est extrêmement difficile à interpréter en tant que description des choses. Et quand on tente de le faire on tombe immanquablement sur des descriptions dans lesquelles certains événements ont des effets considérables se produisant instantanément à des distances arbitrairement grandes: on est donc obligé d'admettre quelque chose d'entièrement nouveau, à savoir l'existence d'influences instantanées ne décroissant pas avec la distance. Pour faire bref, on parle, à leur sujet, d'influences non locales. Il est vrai que ces influences ne peuvent servir à transmettre de l'énergie ou des signaux. Mais elles n'en sont pas moins là. De sorte qu'on aboutit à une description de la réalité fondamentale qui la rend totalement différente des phénomènes que nous observons: lesquels, par conséquent, doivent être considérés comme n'étant que des apparences. Pour parler de cette réalité fondamentale Bohm dit qu'elle satisfait à un ordre implicite. A son sujet, je parle, moi, de réel voilé. De toute manière ces influences non locales semblent conférer à la réalité fondamentale un caractère de globalité tout à fait contraire à cet atomisme philosophique dont nous parlions. Bref, celui-ci est une description trompeuse de celle- là.

Cette manière de réfuter l'atomisme philosophique en montrant son incompatibilité avec la mécanique quantique est excellente et convaincante, mais elle a néanmoins un talon d'Achille. En effet, il se pourrait bien que ce que le poète Paul Valéry disait des civilisations, à savoir, qu'elles sont mortelles, soit valable aussi pour les théories. C'est un fait que la théorie géocentrique de Ptolémée, après un règne de quinze cents ans, s'est effondrée. C'est un fait que la mécanique newtonienne, après avoir été tenue pendant 150 ans pour l'expression même de la vérité, a été remplacée par la relativité générale, basée sur des concepts totalement différents. Qui sait si, de même, la mécanique quantique ne sera pas remplacée un jour par une théorie plus vaste, fondée sur des concepts tout à fait autres? Et si c'est le cas on peut espérer (pourquoi pas?) que, dans le cadre de ces nouveaux concepts, la théorie-à-venir ne prédira plus ces bizarres influences indépendantes de la distance, contraires à l'atomisme philosophique.

C'est pourquoi il est très heureux que, pour réfuter l'atomisme, il existe, comme je le disais, une seconde méthode: fondée, elle, non sur la théorie mais directement sur l'expérience. Contrairement à ce qu'il semble, la possibilité d'une telle réfutation par l'expérience n'a rien du tout d'évident, et l'impossibilité d'utiliser les influences non locales pour transmettre des signaux utilisables en a même longtemps fait douter. Aussi n'est-ce que dans le courant des années soixante que le physicien John S. Bell put, par un raisonnement très ingénieux, établir un test expérimental permettant de départager entre l'idée que les influences non locales prédites par la mécanique quantique existent vraiment et celle que le réalisme local est vrai.

Ce test est fondé sur l'étude statistique de corrélations entre résultats de mesures effectuées, en des lieux distants l'un de l'autre, sur deux particules ayant interagi dans le passé. Bell a montré que sous l'hypothèse du réalisme local les probabilités d'obtention de certains couples de résultats (un résultat par particule) doivent nécessairement satisfaire à certaines inégalités, dites inégalités de Bell. Alors que, au contraire, les probabilités de ces mêmes événements telles que la mécanique quantique les calcule violent ces inégalités. Il ne restait plus, si j'ose dire, qu'à faire le test. En fait ce furent des expériences très délicates mais, comme vous le savez tous, elles furent finalement menées à bien, les premiers résultats véritablement décisifs ayant été fournis par l'équipe d'Alain Aspect. Or ces résultats ont confirmé les prévisions quantiques, autrement dit, ils ont invalidé le réalisme local, donc en particulier l'atomisme philosophique. C'est ce que l'on appelle, soit la non-localité si l'on considère les deux événements-mesures comme étant vraiment séparés et comme s'influençant mutuellement, soit la non-séparabilité si on préfère les considérer comme constituant je ne sais quel grand tout inséparable. Grâce à ces expériences nous savons maintenant que même le jour, s'il advient, où la mécanique quantique sera remplacée par une théorie toute différente la non-séparabilité restera vraie, et que donc l'atomisme philosophique restera réfuté.

Jusqu'ici je n'ai fait que me livrer à un rappel de choses bien connues ou qui devraient

l'être. Maintenant je voudrais aller un peu plus loin. Mais pour cela je dois d'abord être plus précis à propos des expériences de type Aspect. Dans ces expériences, qui utilisent comme particules des photons, deux photons créés simultanément lors de la désexcitation d'un même atome se séparent et sont envoyés, l'un sur un détecteur de polarisation situé à grande distance, disons, "à droite" et l'autre sur un détecteur de polarisation situé, lui aussi, à grande distance mais "à gauche". Quand les détecteurs sont orientés parallèlement l'un à l'autre on constate une corrélation stricte: si sur l'un d'eux le résultat est « + », sur l'autre, très éloigné, le résultat est « + ». Si sur l'un il est « - », sur l'autre il est « - » aussi. Mais les mesures statistiques auxquelles j'ai fait allusion violent, je l'ai dit, les inégalités de Bell, et c'est ce qui nous interdit "l'explication élémentaire", celle attribuant la corrélation stricte à ce que les deux photons auraient émergé de l'atome-source avec une polarisation définie, la même pour les deux. C'est bien pourquoi on est obligé de se rabattre sur cette notion bizarre d'influences non locales et de dire (comme la mécanique quantique le suggère) qu'au départ les photons ne sont porteurs d'aucune polarisation déterminée. Si celui qui arrive le premier sur son détecteur est, disons, le photon de droite nous devons dire que c'est son interaction avec son détecteur qui lui confère - aléatoirement - une polarisation bien définie - et que, par cet effet bizarre d'influences non locales, l'autre photon, très éloigné, se voit instantanément doté de cette même polarisation, qui sera détectée ensuite à gauche!

Voilà ce qu'il faut bien admettre, quelque bizarre que ce soit! Mais la bizarrerie ne s'arrête pas là! Dans l'exemple que je viens d'utiliser l'événement "résultat de l'interaction photon de droite-détecteur de droite" joue manifestement le rôle de cause, et l'événement "résultat de l'interaction photon de gauche-détecteur de gauche" celui d'effet. Mais dans les expériences d'Aspect ces deux événements sont si éloignés dans l'espace et si rapprochés dans le temps que la lumière n'aurait pas le temps d'aller de l'un à l'autre. Et dans ces conditions la relativité nous apprend que, pour certains observateurs en mouvement rapide par rapport au laboratoire, l'ordre temporel de ces deux événements est inversé. C'est celui de gauche qui se produit en premier. Notre "observateur rapide" serait donc obligé de dire que l'effet - l'événement de gauche - précède sa cause!

On pourrait certes me répondre que ce qui compte vraiment c'est ce que voient les observateurs attachés à chacun des détecteurs et que, ceux-ci, liés comme ils le sont au même référentiel (celui du laboratoire), sont nécessairement d'accord quant à celui des deux événements qui survient le premier. Mais je crois que notre ami Antoine Suarez parlera tout à l'heure des belles expériences qu'il a initiées. Or dans celles-ci, comme il l'expliquera, tel n'est pas le cas. Dans elles, si étrange que cela paraisse, pour l'observateur de droite le photon de droite est détecté avant le photon de gauche alors que pour l'observateur de gauche le photon de gauche est détecté avant le photon de droite. Dans ces conditions, chacun des deux photons étant détecté avant l'autre, il est clair que son état ne peut pas avoir été provoqué à distance par celui de l'autre. Et pourtant si on répète l'expérience un grand nombre de fois une corrélation stricte apparaît ! Là, voyez-vous - comme me le faisait récemment remarquer dans une lettre notre collègue Pierre Sabatier -, on ne peut vraiment plus expliquer cette corrélation en décrivant ce qui "se passe réellement", indépendamment de nous, dans la réalité extérieure. On constate une corrélation dans les phénomènes. On est bien conscient qu'elle doit être due à quelque chose de réel et l'on ne conçoit pas comment ce quelque chose pourrait être autre chose qu'une succession d'événements. Mais on n'arrive pas à rendre cette conception cohérente avec ce qui est observé. Il faut donc bien conclure que certaines structures de cette réalité sont inaccessibles à notre entendement: qu'elles nous sont cachées ou, autrement dit que cette réalité en soi est voilée.

Tout à l'heure, à propos de l'atomisme philosophique, je vous disais qu'en somme il y a deux manières de réfuter cette conception, la théorique et l'expérimentale, et je vous faisais observer que l'expérimentale a, sur la théorique, l'avantage d'être à l'abri de tout éventuel bouleversement remplaçant la physique quantique par une physique plus vaste, axée sur des notions très différentes. Pour terminer je voudrais simplement noter que cette remarque vaut aussi lorsqu'il s'agit de montrer que la réalité est, comme j'ai coutume de le dire, "voilée" ou "non physique". L'existence de ce "voile" s'établit aisément à partir de la théorie - j'entends à partir de la mécanique quantique - car celle-ci, comme je vous le disais, est essentiellement prédictive et

on ne peut la rendre descriptive qu'en la particularisant en modèles dont aucun n'est vraiment crédible. Mais nous venons de constater que ce caractère "voilé" de la réalité en soi se manifeste aussi à partir des expériences de Suarez et Gisin⁽¹⁾. Et il va de soi que, là aussi, le fait que la conclusion découle uniquement de l'expérience la met à l'abri de tout éventuel bouleversement de la théorie.

Toutefois j'aimerais souligner qu'en contrepartie, si j'ose dire, dans les deux cas la méthode expérimentale ne va pas aussi loin que la théorique. Cela tient à ce qu'elle conserve intacte la notion d'événement en soi. Dans le cadre de la mécanique quantique orthodoxe, qui, comme je l'ai dit, est, avant tout, prévisionnelle d'observations, il y a certes des événements: ce sont les résultats de mesure. Mais ceux-ci mettent en jeu la notion - humaine - de "mesure", de sorte qu'en toute rigueur ils ne sont jamais vraiment des "en soi". Et, de fait, la notion même d'événement en soi paraît incompatible avec l'idée d'une mécanique quantique universelle, du moins aussi longtemps que l'on écarte les modèles difficilement crédibles dont je parlais. Ainsi, si, au vu de ses succès immenses en tous domaines, nous accordons foi à la mécanique quantique nous sommes amenés à juger que la réalité en soi est à ce point "voilée", indescriptible par nos concepts, que même la notion d'événement ne lui est pas applicable. Si, au contraire, en dépit de tous les succès de cette mécanique, nous nourrissons des doutes relativement à sa pérennité nous ne pouvons évidemment plus dire cela. Toutefois, comme nous venons de le voir, même alors nous sommes assurés, grâce aux expériences de Suarez et Gisin, que - en un sens, bien sûr, plus restreint - le Réel, malgré tout, restera voilé.

NOTE

(1) - André Stefanov, Hugo Zbinden, Nicolas Gisin, et Antoine Suarez, Phys. Rev. Lett. 88.120404

(2002); Phys. Rev. A, 042115 (2003).