

Le crépuscule du multitudinisme

Bernard d'Espagnat

Résumé. La notion de non-séparabilité est analysée à la lumière du théorème de Bell. Il est rappelé que, dans la formulation que Bell lui-même en a donnée, les prémisses de ce théorème, loin de renvoyer exclusivement à de l'observable, font nécessairement référence à une sous-jacente réalité conçue comme indépendante de l'humain. Ce qui est montré ici, c'est que, en dépit de ce fait, le théorème n'est pas en contradiction avec le célèbre « axiome philosophique » selon lequel les hommes ne peuvent connaître que des phénomènes et n'ont pas d'accès assuré à la réalité en soi. En conclusion, le théorème démontre bien qu'il nous faut renoncer à la vision du monde — dénommée ici *multitudinisme* — selon laquelle la réalité serait essentiellement constituée de (outre des champs locaux) des particules localisées interagissant par des forces décroissant avec la distance.

Abstract. Nonseparability is analysed in the light of the Bell theorem. The known fact is recalled that, in the form in which Bell himself expressed his theorem, its premisses, far from referring exclusively to observable facts, must explicitly involve the notion of some underlying Man-Independent Reality. What is shown is that in spite of this fact the theorem does *not* run counter to the famous « philosophical axiom » that human beings can only know phenomena and have no sure access to Reality-in-itself. So, to sum up, the theorem *does* prove that we have to give up the view of the World — called *multitudinism* — that represents Reality as being essentially composed of (in addition to local fields) localized particles interacting with distance-decreasing forces.

Note de l'éditeur : le texte qui suit est celui d'une conférence et en conserve le caractère « parlé ».

Comme vous le savez certainement tous, la physique d'aujourd'hui nous oblige à dépasser le mécanisme cartésien, fondé sur l'usage exclusif des concepts familiers (les « idées claires et distinctes », figure, position et mouvement), cimentés par l'emploi des mathématiques.

Je ne prendrai qu'un seul exemple, celui de la création de particules dans les chocs à haute énergie. C'est un phénomène qu'on produit dans les grands accélérateurs et qu'on observe grâce à des « chambres à bulles » où les particules laissent leurs traces. Nous accélérons deux protons. Ils ont chacun un certain mouvement, une certaine vitesse, une certaine énergie donc. Nous les faisons se rencontrer, puis ils se séparent de nouveau. Après le choc nous constatons que les deux protons sont intacts, mais qu'il y a aussi d'autres particules, qui sont des particules à part entière, avec masse, charge électrique etc. et qui ont été créées lors du choc, au dépend de l'énergie totale des protons incidents. Le phénomène est certes conforme à la loi $E = mc^2$ d'équivalence masse-énergie. Mais si nous voulions le décrire par le seul moyen des concepts familiers il nous faudrait dire que le mouvement des protons incidents a été transformé en particules. Or un mouvement, c'est une propriété des objets, et par conséquent nous évoquerions là une transformation d'une propriété d'objets en objets. Cela, c'est quelque chose qui dépasse tout à fait nos concepts familiers. En effet, dans l'attirail de nos concepts familiers il y a d'une part les objets et d'autre part les propriétés de ces objets, telles la position, le mouvement etc. ; et ce sont là deux catégories qui ne se transforment jamais l'une dans l'autre. Evoquer une telle transformation paraît aussi absurde que si l'on disait que l'on peut transformer la hauteur de la Tour Eiffel en une deuxième Tour Eiffel, ou bien que dans une collision entre deux taxis ceux-ci peuvent réapparaître intacts, leur mouvement étant transformé en quatre, cinq, six... autres taxis ! Ceci pour faire sentir qu'il y a vraiment dans la physique moderne un dépassement nécessaire du cadre des concepts familiers.

Alors, serions nous devant une énigme dépassant notre entendement ? Bien au contraire, il faut savoir que ce surprenant phénomène avait été prévu par les théoriciens à partir de leurs équations. Ce qui montre que, appliquées à la physique, les mathématiques permettent vraiment de dépasser le cadre des concepts familiers. De forger des concepts nouveaux. Comment, alors, ne pas songer à la fameuse exclamation de Pythagore « les nombres sont l'essence des choses » ? Entendons : « les mathématiques sont l'essence — l'essence même ! — des choses ». Je n'ai pas le

temps de vous exposer comment la théorie décrit ce phénomène de création mais je ne résiste quand même pas à mon désir de vous dire deux mots du principe. Il a, en somme, émergé de la constatation que la notion de création n'est pas une notion scientifique. Telle quelle, on ne peut pas la maîtriser et moins encore la quantifier. Aussi convient-il de la ramener à ce qu'on domine. Or on domine bien la notion d'état d'un système et celle de changement d'état. Alors l'idée — géniale! — a consisté à dire que l'existence d'une particule est un état d'un certain « quelque chose », que l'existence de deux particules est un autre état de ce même « quelque chose », et ainsi de suite. La création d'une particule n'est dès lors rien d'autre qu'un changement d'état du dit « quelque chose ». C'est aussi simple que cela! Quantitativement c'est, croyez moi, considérablement plus compliqué! Mais on arrive par ce moyen à rendre compte des phénomènes observés à une précision qui va jusqu'à la septième décimale, ce qui vraiment n'est pas trop mal. . .

Encore une fois, je vous fais grâce des calculs — il y a bien des gens pour les faire! — mais en leur lieu et place je vous propose de réfléchir au principe même qu'on vient de voir. Certes, la question de la vraie nature de ce « quelque chose » ici mis en jeu est délicate. Mais il y a cependant un point qui doit être noté à son sujet. C'est que le rôle de « pierre d'angle » qu'implicitement la physique quantique lui attribue laisse entrevoir au cœur de cette physique une globalité qui la distingue beaucoup de la physique classique. Ce que je veux dire par là, c'est que la science classique favorisait beaucoup une vision multitudiniste de la Nature. Une vision dans laquelle la réalité constitutive, la « matière » comme on dit, était conçue comme fondamentalement constituée de myriades d'éléments simples, essentiellement des « atomes », des « particules », interagissant par des forces décroissant avec la distance. Dans la vision que je viens de résumer il n'en va plus ainsi puisque les particules n'y apparaissent plus comme les briques élémentaires de l'Univers. Puisque la seule « entité » qu'on pourrait éventuellement songer à y considérer comme une réalité fondamentale est ce « quelque chose » dont il vient d'être question, qui est essentiellement unique.

On voit là apparaître l'idée d'une certaine globalité. Et celle-ci s'est, petit à petit, révélée comme étant un trait très général de la physique si innovante qui a pris son essor au XX^{ème} siècle. Il s'agit certes d'une notion vague et protéiforme, ce qui explique sans doute que, dans les premiers temps, elle n'a été nettement appréhendée, ni par les épistémologues ni même, sauf exceptions rares (Schrödinger), par les physiciens. Mais on s'est aperçu petit à petit que, sous des figures propres à chaque domaine particulier, on la retrouve chaque fois que l'on veut interpréter

la physique fondamentale en termes de description d'une réalité sous-jacente aux phénomènes. En mécanique quantique on parle, à son sujet, de non-séparabilité.

Qui plus est, on sait que cette notion de globalité dépasse même le cadre de la théorie à présent en vigueur. Je veux dire que l'on sait maintenant que la non-séparabilité restera vraie même si le formalisme quantique doit un jour être remplacé par un autre, plus performant. Comme vous le savez, ceci découle du théorème de Bell et des expériences — telles celles d'Aspect — associées à ce théorème. Les résultats de ces dernières sont en effet incompatibles avec certaines conséquences de l'hypothèse inverse, celle de la « séparabilité ». Certes les scientifiques, et même les physiciens, continuent à s'exprimer en termes de particules, de molécules etc., bref à user d'un langage multitudiniste : et de leur point de vue ils ont raison car, comme nous l'avons vu, c'est là se référer à un modèle très utile dans beaucoup de cas. Mais il faut souligner qu'il ne s'agit que d'un modèle. Un peu comme dans le cas du modèle géocentrique de Ptolémée, l'ériger en description de ce qui « réellement est » est désormais, scientifiquement parlant, illégitime.

Cela, c'était la première partie de mon exposé, faite d'idées assez générales. Je voudrais maintenant tenir compte de ce que je m'adresse à des philosophes et examiner avec vous une question plus spécifique, qui est : quelle est au juste la nature du théorème de Bell ; que montre-t-il ?

Il existe plusieurs versions du théorème mais je m'en tiendrai à une seule, celle proposée par Bell lui-même. Selon lui, son théorème s'inscrit dans le cadre du réalisme objectiviste et il y réfute la causalité locale. Je dois donc commencer par définir ces deux concepts.

Le réalisme objectiviste

Je l'appelle aussi : « réalisme des accidents ». En philosophie, le mot « accident » a souvent servi à désigner les propriétés contingentes (et éventuellement transitoires) des choses, telles que leurs formes, leurs positions ou leurs mouvements. On peut donc appeler « réalisme des accidents » la thèse des personnes qui, sans affirmer que nous pourrions jamais accéder à, vraiment, « la réalité ultime des êtres » estiment que les « accidents » en question ne sont pas de simples « apparences », mais sont, bien au contraire, des réalités, dont il y a un sens à dire qu'elles sont ce qu'elles sont, indépendamment de la connaissance qu'éventuellement on en a : autrement dit, que — de même que les objets qui leurs servent

de supports — elles existeraient même si nul être n'existait capable de les appréhender.

Enfin, pour compléter la définition de ce réalisme, je précise qu'il comporte l'idée qu'à chaque instant l'état objectif de tout « système physique » quel qu'il soit (corpuscule, champ, objet macroscopique etc.) est caractérisé par un certain nombre de données, connues ou inconnues, connaissables ou inconnaissables, qui sont de la nature de nombres réels.

Tel qu'ainsi spécifié, le réalisme des accidents (ou « objectiviste ») paraît avoir été la position de Galilée et il semble qu'il soit aussi la position adoptée plus ou moins instinctivement par la majorité des scientifiques d'aujourd'hui.

La causalité locale

On sait qu'une des grandes lois de la relativité restreinte est qu'aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Dans le cadre d'une conception satisfaisant au réalisme objectiviste la notion de signal ne peut, bien entendu, être, en physique, confinée aux « signaux humains » que nous nous envoyons les uns aux autres. Elle coïncide par conséquent avec celle d'influences physiques. La loi en question (appelons-la, en bref, la « loi relativiste ») affirme donc que ce qui se passe en un certain point de l'espace-temps (soit, en langage de tous les jours : en un point de l'espace à un instant donné) ne peut influencer ce qui se passe en un autre point de l'espace-temps si ces deux points sont tels que la lumière ne peut les joindre (s'ils sont à ce point éloignés dans l'espace et proches dans le temps que la lumière ne peut aller de l'un à l'autre). Comme on le sait, dans le langage de la relativité restreinte on appelle « événement » ce qui se passe en un point de l'espace-temps, et à chaque événement A on associe un « cône de lumière arrière » comportant tous les points de l'espace-temps d'où peut partir un signal pouvant atteindre A sans violer la loi ici considérée.

La loi relativiste interdit à un événement B extérieur au cône de lumière de A d'influencer A. Cela dit, il est évident qu'entre A et B il peut quand-même y avoir une corrélation si A et B dépendent de quelque cause commune. Dans ce cas, pour un observateur extérieur la probabilité de survenance de A n'est, malgré tout, pas la même selon que B a lieu ou non. En revanche, si je parle maintenant, non, simplement de « la probabilité de A » mais de « la probabilité que A se produise lorsque sont donnés tous les événements susceptibles de le produire » — c'est à

dire tous les événements intérieurs au cône de lumière arrière de A — alors, vu la loi relativiste — on s'attend à ce que cette probabilité-là (qui est ce qu'on appelle une « probabilité conditionnelle » : celle que prendrait en considération un « démon de Laplace » qui connaîtrait tous les événements que je viens de dire) soit indépendante de B . C'est là le contenu de l'hypothèse de causalité locale, qui s'énonce donc ainsi :

La probabilité (conditionnelle) pour que l'événement A se produise lorsque l'on pose la spécification complète de tous les événements situés dans le cône arrière de A est indépendante des événements extérieurs à ce cône de lumière.

Cela dit, on peut énoncer le théorème de Bell. Il consiste en la démonstration (que je ne donnerai pas ici) du fait que l'hypothèse de causalité locale implique — entre certains « nombres de clics » observés sur des instruments — des inégalités, dites « inégalités de Bell » que l'expérience contredit.

Commentaires.

- 1) Bien sûr, cette violation de la causalité locale n'est pas directement équivalente à la non-séparabilité. Disons plutôt qu'elle était suggérée par elle. Qualitativement, cela se saisit assez bien sur l'exemple de deux particules qui étaient ensemble et se sont ensuite séparées. Car si ces particules continuent à ne faire qu'une seule « réalité », comme le suggère la non-séparabilité, on peut trouver « normal » que cela se reflète dans l'existence d'influences instantanées de l'une sur l'autre.
- 2) Comme vous le voyez, le théorème n'a pour prémisses aucune théorie physique particulière. Notamment pas la mécanique quantique. Il se trouve que les prédictions observables de la mécanique quantique violent, elles aussi ces inégalités, et c'est ce qui a mis « sur la piste » du théorème. Mais c'est tout. Donc le théorème restera valable même si la mécanique quantique est, un jour, remplacée.
- 3) Cela dit, il y a un problème plus subtil et touchant davantage à la philosophie. J'ai dit que la causalité locale s'inscrit, donc semble n'avoir de sens, que dans la conception du réalisme objectiviste. Alors, *primo*, est-ce vrai ? Et *secondo*, si c'est vrai cela semble bien vouloir dire que le théorème de Bell nous apprend quelque chose (la violation, par l'expérience, de la causalité locale) dépassant le cadre de la simple représentation et concernant la réalité-en-soi. Mais alors on doit faire face à la célèbre objection des philosophes,

qui est que pour savoir si une affirmation portant sur des phénomènes, c'est à dire sur des représentations, exprime correctement un trait de la réalité en soi il faudrait pouvoir comparer les deux, la représentation et la réalité en soi, ce qui évidemment est impossible puisque nous n'avons accès à la seconde que par l'intermédiaire de la première.

Alors, premier point : est-il vrai que le concept de causalité locale dépasse nécessairement le cadre des phénomènes ? Qu'il n'a de sens que dans un cadre réaliste ?

Pour en juger, rappelons-nous que la causalité locale met en jeu une probabilité conditionnelle avec des conditions fantastiquement strictes. C'est la probabilité de l'événement A lorsque l'on pose la spécification complète de tous les événements situés dans le cône arrière de A. Or cette spécification complète dépasse totalement les capacités humaines. Elle ne peut pas être, même idéalement, réalisée. Elle ne peut être que pensée. Et sa « pensée » n'a de sens que dans le cadre d'une conception réaliste.

Passons donc au deuxième point. *Quid* de la « célèbre objection » ? L'expérience d'Aspect, comme toute expérience scientifique, ne porte que sur des « objets d'une expérience possible » comme disait Kant, autrement dit sur des phénomènes. Comment peut-elle nous apprendre quelque chose sur la réalité en soi ?

La réponse est à rechercher dans la forme même du postulat du réalisme objectiviste. Celui-ci implique que, bien qu'inconnue (et même, peut-être, inconnaissable) dans le détail, la réalité en soi n'est pas supposée radicalement inconnue puisqu'elle est adéquatement représentée par un ensemble — discret ou continu — de nombres réels : autrement dit de paramètres dont le fait qu'ils ont telles et telles valeurs a des conséquences observables. Il est vrai que l'on ne connaît ni ces valeurs, ni même la nature physique de ces paramètres. Mais ce que le théorème de Bell démontre c'est que *quelles que soient* cette nature et ces valeurs, si l'on cherche à imposer une certaine condition (celle de « causalité locale ») à des fonctions (nos fameuses probabilités conditionnelles) qui mettent ces paramètres en jeu, on se met en contradiction avec telles et telles données de fait. Il n'y a rien là qui viole la grande règle de l'idéalisme philosophique selon laquelle seule une idée peut être comparée à une autre idée. En effet, c'est dès la première étape — la *représentation* de la réalité-en-soi par certains paramètres (même s'ils sont inconnus) ayant, par hypothèse, des effets observables — que l'on a posé l'hypothèse permettant le saut décisif, celui de la réalité-en-soi à l'idée (à savoir,

ici : un ensemble de nombres) supposée la représenter. Le reste n'est plus qu'une question de calcul et de comparaison à l'expérience. Pour dire les choses autrement : le postulat du réalisme objectiviste *pose*, en dernière analyse, que la réalité-en-soi de la source (de l'atome émetteur) est fidèlement décrite par une parmi une infinité de représentations possibles, sans que nous puissions savoir, ni de façon certaine ni même en probabilité, laquelle de ces représentations idéelles est la représentation fidèle. Et la beauté du théorème de Bell est, précisément, de montrer que, de cette connaissance qui nous échappe, nous n'avons, en fait, pas besoin. Il prouve que *quelle que soit* celle, parmi toutes ces représentations, qui est la représentation fidèle — quelle que soit la probabilité, petite ou grande, pour que « la fidèle » soit celle-ci ou celle-là — imposer, relativement à elle, la condition de causalité locale a des conséquences testables (les inégalités de Bell). Ainsi, il faut juger qu'en dernière analyse l'objection philosophique considérée ne s'applique pas au théorème de Bell. Les inégalités en question étant violées par l'expérience il faut conclure que la causalité locale est réfutée. Autrement dit, que, pour être adéquate, toute représentation de la réalité qui fait appel à des grandeurs (c'est là qu'intervient la notion de nombres) et qui met cette réalité dans l'espace-temps doit admettre l'existence d'influences à distances plus rapides que la lumière (donc, dans certains repères, instantanées).

Pour conclure j'aimerais revenir aux « grandes idées générales ». Et je voudrais en faire ressortir deux, qui me paraissent très importantes.

La première est l'existence d'un « théorème complémentaire », qui montre que si la mécanique quantique est correcte dans ses prévisions, les influences « instantanées » dont il s'agit ne peuvent en aucun cas transmettre des signaux utilisables. Pour le philosophe réaliste, ce résultat comporte un enseignement très important : car il lui apprend quelque chose dont beaucoup ne se doutent guère, à savoir qu'il existe nécessairement un immense décalage entre « le réel » et « l'opérationnel ». Et pour le physicien ce résultat est également d'une importance fondamentale. Je dirai qu'il lui apporte un immense soulagement puisqu'il montre que la théorie de la relativité, qu'il utilise à tout bout de champ, reste valable sur le plan opérationnel.

Comme vous le voyez, c'est finalement ici la mécanique quantique qui nous sort — nous physiciens — d'un très sérieux embarras. Mais elle ne le fait que si on la suppose universelle. Et ceci m'amène à la seconde « grande idée » que je voudrais mettre en valeur. Au fond, voyez-vous, par souci de clarté j'ai, ici, présenté les choses un peu à l'envers. Je veux dire que j'ai minimisé le rôle absolument fondamental joué par la mécanique

quantique dans cette découverte de la violation de la causalité locale. En fait, tout est venu de l'étude du comportement de ces paires de particules auxquelles j'ai fait allusion : des particules qui étaient ensemble et se sont ensuite séparées. On sait bien que les particules obéissent à la mécanique quantique. On a donc étudié le phénomène dans le cadre de la mécanique quantique et on s'est aperçu qu'on était là (en général) dans un cas où, selon ce formalisme mathématique, les particules n'ont pas le jeu de propriétés individuelles qu'elles auraient si elles étaient vraiment deux entités pleinement distinctes. Selon le schéma de ce formalisme, elles sont donc vraiment non-séparables. Alors, le sont-elles physiquement ? Je veux dire : s'agit-il ici de quelque chose d'observable ? La réponse est « oui » car Bell a montré que cette description de la paire par la mécanique quantique entraîne la violation des inégalités... de Bell (et donc de la causalité locale). Ensuite, comme nous le savons, Aspect a montré que ces inégalités sont, effectivement, violées.

Etant donné que la séparabilité et la causalité locale étaient des idées qui semblaient presque s'imposer, la prévision de leur violation par la mécanique quantique est un gros succès de celle-ci. Or cette mécanique est une théorie très générale. On voit mal comment limiter son domaine de validité. On est donc amené à estimer que ce que je disais à propos de la violation de la causalité locale est vrai aussi, en ce qui concerne la non-séparabilité : dans le cadre du réalisme, toute représentation de la réalité qui viole la non-séparabilité doit être tenue pour incorrecte. D'où, finalement, le bien fondé du titre de cet exposé : aujourd'hui, toute vision multitudiniste du réel-en-soi semble condamnée par la physique.