Annales de la Fondation Louis de Broglie,
Vol. 11, n° 4, 1986

A propos de la physique dans le livre de B. d'Espagnat "une incertaine réalité"*

par Damian CANALS-FRAU

Institut d'Optique, Université de Paris-Sud
Bâtiment 503,
Boîte Postale 43
91405 ORSAY Cedex

(manuscrit reçu le 8 Avril 1986)

Résumé : L'auteur commente quelques-unes des données physiques qui servent de base à ce livre. En particulier, il conteste, et les conséquences tirées du théorème de BELL, et le concept de "non-séparabilité". En plus, il trouve néfaste pour la physique le fait de considérer la "réduction" de la fonction d'onde comme un processus physique. D'autre part, il suggère une explication simple des corrélations quantiques observées. Mais, il ne participe en rien à la discussion des problèmes philosophiques évoqués dans ce livre.

*Gauthier-Villars, Bordas ; Paris 1985.

Introduction.

Je ne devrais pas prendre la plume pour essayer de commenter ce livre, puisque je ne suis pas qualifié pour parler de philosophie, ni même de métaphysique.

Dans une "Note à l'usage des physiciens théoriciens", il est dit, page 14 : "...D'une part, en effet, il fallait que chaque lecteur, quelle que fût sa spécialité, soit initié à l'essentiel de ce qui, dans les données de base de notre discipline, conduit à des problèmes philosophiquement bien posés et intéressants et permet d'étudier ceux-ci. D'autre part, le livre devait être résolument orienté vers la discussion de, précisément, ces aspects philosophiques puisque tel est le but qu'il vise".

Cela me confirme qu'effectivement je devrais m'abstenir. Si nonobstant j'écris ces lignes, c'est à cause de l'affirmation de B. d'ESPAGNAT (page 189) que la notion de réalité indépendante a bien un sens*. Et que c'est l'étude de la physique qui éclaire, *a posteriori*, le point de savoir si cette réalité indépendante est voilée ou non**.

Ma devise étant celle de la plupart des physiciens post-classiques : "Les seuls énoncés qui ont un sens physique sont ceux dont la véracité ou la fausseté peut être tranchée par une expérience", c'est l'invocation à la physique qui me trouble. Non que de nouvelles connaissances physiques ne puissent modifier le contenu de la métaphysique et restreindre son

*Dans la mesure où cette réalité indépendante "explique" la régularité observée dans les phénomènes et l'accord intersubjectif des observateurs.

**Dans une première version de ce manuscrit, j'avais écrit de façon sans doute trop abrupte et non nuancée, que "ce sont des résultats de physique théorique et expérimentale qui l'obligent (lui, d'ESPAGNAT) à conclure qu'un "réel" existe, fut-il 'voilé'". J'avais soumis cette version à l'auteur du livre. Je remercie M. d'ESPAGNAT de m'avoir signalé que mon affirmation était fausse, ce qui m'a permis de corriger mon erreur.

champ d'application mais parce que je ne partage pas la façon dont l'auteur interprète les conséquences des travaux de physique théorique dont il fait mention (théorème de BELL), ni la façon dont il décrit un phénomène quantique baptisé un peu hâtivement "non-séparabilité". De même, son évocation d'une interprétation possible -mais sûrement fort hasardeuse- de la fonction d'onde et de sa "réduction", me permet de rappeler la méthodologie physique post-classique.

J'ose donc poser quelques questions qui pourraient être la suite des 23 questions et réponses de l'auteur (chapitre 11).

Question 24.

La déduction théorique de BELL[1)] part de la prise en considération de deux systèmes, indépendants dans le sens macroscopique courant. En plus, elle ne laisse aucune place à la possibilité éventuelle que ces systèmes puissent se comporter comme ayant des phases[2)] -à l'image de certains phénomènes optiques et aussi d'autres particules élémentaires.

Par contre, les expériences ont été faites sur des systèmes pas totalement "indépendants", puisqu'ils sont en l'état singulet, ou ils ont été émis en cascade (c'est-à-dire, qu'ils se partagent une propriété physique depuis leur "naissance"). En plus, le montage expérimental ne s'oppose en rien à la possibilité que les phases puissent jouer un rôle à un moment donné, soit à la "naissance", soit plus tard.

Alors d'une part, théorie de BELL et expérience divergent donc au moins sur deux points. Et d'autre part, l'existence de fait de deux possibilités -indépendance *et* impossibilité pour les phases de se manifester- interdit donc tout argument du type "*a* entraîne *b*, or *b* est faux, donc *a* est faux" (note page 113).

Même si dans l'ensemble de la déduction de BELL il n'y avait d'autres paralogismes[3)] (qui lui ont permis de conclure qu'"...ainsi nous ne pouvons pas écarter l'intervention sur un des côtés comme influence causale sur l'autre."[4)],

la seule conclusion qu'il aurait alors pu tirer de ses travaux et des expériences faites, c'est que les particules élémentaires en l'état singulet, ou émises en cascade, ne se comportent ni comme des systèmes indépendants, ni comme des systèmes dépourvus de phases.

La belle affaire ! Du moment que nous savions que les particules sur lesquelles on allait faire des mesures étaient en l'état singulet, ou avaient été émises en cascade, nous savions aussi qu'elles n'étaient ni totalement indépendantes, ni totalement dépendantes (dans le sens courant de ces mots), puisqu'elles se partageaient une propriété physique.

Ne pensez-vous pas que contraint par la physique et par la logique, le moins qu'on puisse faire est de défendre le point de vue suivant : on ne peut pas invoquer les expériences faites pour confirmer ou infirmer les inégalités de BELL -ou des inégalités analogues assises sur la même base- puisque ces expériences ne sont pas la contrepartie des considérations théoriques sur lesquelles la formulation de BELL est assise ?

Question 25.

A propos de séparabilité et de non-séparabilité, vous dites aussi ce que tous les physiciens savent : que les systèmes non-séparables sont quand même séparables "dans tous les sens des mots qui ont un rapport quelconque à l'action" (page 111). Et que cette non-séparabilité ne peut pas non plus être utilisée pour transmettre un signal (page 116).

Il s'avère donc qu'on vide le mot "séparable" de toute sa signification courante, et on peut se demander si ce n'est qu'une question d'un choix malheureux de langage, de dire qu'une certaine séparabilité *très particulière* et *très restreinte* se trouve être violée. Et alors, l'idée naturelle que véhicule le concept "non-séparable" peut induire en erreur tous ceux -non-physiciens- qui n'ont pas constamment à l'esprit les restrictions imposées à la signification primaire du mot séparable. En plus, la définition du "principe de séparabilité" (page 107) n'est-elle, en fait, qu'une définition ad hoc qui permet d'exclure les expériences réalisées sur des électrons en l'état singulet et sur des photons émis en cascade ?

Ces expériences permettent de conclure qu'une certaine propriété physique se trouve être répartie entre les systèmes partiels. Elles ont été faites sur des particules élémentaires ayant un comportement quantique ("comportement quantique" est pris ici dans un sens purement expérimental). Comportement que nous savons prévoir mais dont actuellement nous ne pouvons pas "démonter le mécanisme", c'est-à-dire, en faire un modèle basé sur des conceptions de la vie courante. Alors, au lieu de définir laborieusement et ad hoc un "principe de séparabilité", ne ferait-on pas mieux de parler d'un principe de conservation des propriétés physiques ?

D'après nos renseignements sur la "source" qui est à l'origine des systèmes qui nous intéressent ici, ces systèmes ont une propriété dont la valeur de l'un est -disons- complémentaire de celle de l'autre. Je répète. Ces systèmes sont "nés" en se partageant une propriété, ou en interagissant, se sont mutuellement influencés de telle sorte qu'ils se trouvent maintenant dans un état de spin total déterminé : spin global égal zéro, dans le cas des électrons en l'état singulet. Et la distance qui peut séparer les systèmes ultérieurement n'a aucune signification, puisqu'ils conserveront leurs propriétés tout le temps que rien n'agira sur eux.

Finalement, que recouvre pour le physicien le concept "non-séparable" que vous utilisez ? "Ces questions de langage sont plus importantes qu'il ne semble et valent donc d'être examinées", dites-vous dans un autre contexte, page 164. En fait, on peut y voir, *superposés*, deux phénomènes :

a) Une loi de conservation. Soit ce que vous appelez (par exemple, page 117) "causes communes à la source". Par exemple, conservation de l'impulsion, du moment magnétique, du spin global, etc.

b) Dans le monde microscopique il s'y ajoute un comportement quantique : certaines particules élémentaires qui ont interagi par le passé présentent des corrélations quand on les mesure.

Pour ces corrélations nous n'avons pas réussi à

donner une explication basée sur des concepts macroscopiques. Plus précisément : dans le cas de corrélations strictes nous pouvons construire un modèle, mais ce modèle n'est pas satisfaisant puisqu'il échoue pour les corrélations non-strictes[5].

Le fait de conclure que ces systèmes sont non-séparables (après avoir vidé le mot séparable de son sens courant) apporte-t-il une connaissance nouvelle à la physique ? Ne peut-il que causer des troubles aux philosophes, puisqu'il peut les induire en erreur ?

Vu que le comportement de ces systèmes ne peut pas être utilisé pour transmettre un signal, ni être interprété comme relevant d'une "action" entre les systèmes partiels, un autre concept, comme par exemple celui de "partage", ne peut-il pas sembler plus adéquat ? On dirait alors : Les systèmes partiels qui ont interagi par le passé -dont les zones d'influence individuelles dans l'espace-temps se sont superposées au moins partiellement dans le passé- se sont influencés de façon telle qu'ils ont développé une complémentarité. Cet état de choses restera le même tout le temps que rien n'agira sur les systèmes partiels, indépendamment de la distance qui les sépare. En mesurant ces systèmes en deux points de l'espace-temps, cette complémentarité se manifestera d'une façon ou d'une autre. Les corrélations étranges que nous observons et que nous appelons corrélations quantiques ne sont sûrement pas étrangères à cette complémentarité, vu que les systèmes qui n'ont pas interagi par le passé -ou qui n'ont pas été émis en cascade- ne les présentent pas.

J'aimerais *suggérer* que dans le cas des spins, cette "étrangeté" est en rapport avec la quantification spatiale : ne pensez-vous pas que le jour où nous aurons un modèle pour la quantification spatiale nous en aurons aussi pour les corrélations quantiques qui nous occupent ? Que ces corrélations quantiques ne sont que la conséquence de la conservation du spin global ("cause commune à la source") *et* de la quantification spatiale (interaction avec le champ magnétique de l'appareil de mesure) ?

Dans le cas des photons émis en cascade (expériences de CLAUSER, de FRY, d'ASPECT et d'autres[6]) la situation

est analogue : à la "naissance", les polarisations de chaque paire de photons "nés" d'un même atome sont complémentaires et elles le resteront jusqu'à l'interaction avec les polariseurs, indépendamment de la distance qui pourrait les séparer. L'importance de ces expériences réside dans le fait d'avoir confirmé expérimentalement la prédiction de la mécanique quantique.

Question 26.

Vous parlez des difficultés soulevées par la réduction de la fonction d'onde après une mesure (page 7) comme on le fait généralement dans le plupart de traités de Mécanique Quantique. Cette façon de voir est à l'origine de difficultés insurmontables *si* on la considère comme un processus physique. Mais ce "processus physique" ne se déroule nulle part : il ne s'agit que d'une extrapolation verbale non conforme à la méthodologie physique qui est à la base de la mécanique quantique. Tout le temps que la seule conséquence néfaste de cet état de choses était de rendre la mécanique quantique difficilement compréhensible aux étudiants, il n'y avait pas de danger majeur. Maintenant que des lecteurs non-avertis pourraient en tirer des conclusions physiquement fantaisistes, il serait prudent de rappeler que nos conceptions sont plus en accord avec les faits.

Ne pensez-vous pas que dans le cadre de la méthodologie physique post-classique il n'y a aucune raison valable de considérer la fonction d'onde et sa réduction comme des processus physiques ?

Cette méthodologie consiste justement -entre autres- à ne faire intervenir dans l'établissement de nos formules de physique que ce que nous savons sur les objets de nos études, sans laisser la moindre place à nos états d'âme. C'est-à-dire, sans y mêler ce que nous croyons du comment les objets *devraient* se comporter. C'est dans ce sens que la mécanique quantique construite d'après cette méthodologie ne pourra *jamais* être prise en défaut.

Dans le paragraphe à cheval sur les pages 130 et 131, vous vous expliquez plus clairement. Mais quand vous dites : "En général cette opération, appelée "réduction de la

fonction d'onde" fait apparaître une nouvelle fonction qualitativement fort différente de l'ancienne ; et la transition de l'une à l'autre qui survient à l'instant de la mesure n'est pas décrite par l'équation de Schrödinger.", ne pensez-vous pas que les mots "fait apparaître" peuvent encore facilement induire en erreur ? Qu'il serait peut-être utile d'insister sur le sens que lui ont donné les physiciens qui ont inscrit pour la première fois la fonction d'onde dans le cadre de la nouvelle physique, née dans les années 20 ?

Ils l'ont écrite à partir des connaissances qu'ils avaient du phénomène physique qu'ils voulaient décrire -et en accord avec la méthodologie post-classique- et c'est seulement à son module carré qu'ils ont donné une signification en rapport avec la physique expérimentale : Une signification de probabilité.

Alors, quand on fait une mesure, d'une part on "bouleverse" la situation existante par l'intervention de l'appareil de mesure, et d'autre part on obtient de nouvelles données (le résultat de la mesure). Ce qui a deux conséquences : D'une part cela nous met face à une nouvelle conjoncture physique (résultante du bouleversement produit par l'intervention de l'appareil de mesure) et d'autre part, cela rend forcément caduque la probabilité basée sur le module carré de la fonction d'onde antérieure (puisqu'elle n'est plus adaptée à cette nouvelle conjoncture). Et cette nouvelle conjoncture nous la décrirons par une nouvelle fonction d'onde basée sur nos nouvelles données.

Alors, le fait de mesurer apparaît plutôt comme une violation de l'évolution naturelle des systèmes.

Ne pensez-vous pas que si on ajoute encore qu'il n'y a pas de "réduction" à proprement parler, mais simplement deux situations physiques différentes -avant et après mesure- auxquelles correspondent aussi deux fonctions d'onde différentes, les choses sont plus claires ? Et que si on dit qu'après la mesure le système n'est plus le "même" on évite des quiproquos ? Bien que cela puisse choquer l'"homme de la rue", mais pas le physicien qui s'occupe de microphysique.

Question 27.

La note en bas de page 212 me trouble.

a) Oui, *toute* mesure ne perturbe pas de façon décelable l'"état" du système mesuré, puisqu'il y a l'exception de celles faites sur des systèmes qui sont déjà dans l'état propre.

Ne pensez-vous pas qu'une explication plausible du pourquoi de cette exception a été donnéedans Ann. Fond. L. de Broglie, 10, 133 (1985), page 136 ?

b) En physique classique on peut "augmenter son information" sur un des deux systèmes corrélés, en mesurant une grandeur physique adéquate sur l'autre.

Mais, ne pensez-vous pas que cela ne nous donne pas le "résultat de la mesure" du deuxième système, puisque celui-ci n'aura pas été modifié comme l'a été le premier qui a été mesuré, bien que "...ses diverses caractéristiques (du premier système) ne sauraient avoir été appréciablement modifiées par l'interaction avec l'instrument..." (extrait de note, page 130-131 ; la parenthèse est de moi).

c) Une mesure finit toujours par un "résultat" affiché d'une façon ou d'une autre. L'énergie nécessaire à cet affichage provient d'une source extérieure à la chose à mesurer. Mais elle ne peut, en dernière instance, qu'être l'amplification d'un "signal" pris à la chose à mesurer. Si ce n'était pas le cas, l'instrument de mesure ne pourrait pas faire la différence entre *quelque chose* à mesurer et *rien* à mesurer. Donc toute mesure* se fait "au dépens" de la chose à mesurer, d'où perturbation.

Ne pensez-vous pas que cet argument tout à fait général suffit pour dire que la mesure* est la conséquence

*Pour l'exception voir a). Pour tester le point de savoir si *toutes* les mesures perturbent ce qu'on mesure, on pourrait imaginer de faire des mesures sur un système dont les états propres sont très, très rapprochés, à la limite de ce qui peut être séparé expérimentalement, et voir si parfois une deuxième mesure donne comme résultat la valeur propre contiguë.

d'une interaction, donc perturbation ?

d) Vous dites "que dans cette seconde approche (par définitions partielles utilisées par BOHR) l'affirmation en question (que la mesure perturberait nécessairement l'état du système mesuré) est trompeuse et inadéquate, au moins dans sa formulation. A l'évidence, en effet, une mesure ne saurait perturber un état microscopique qui, dans cette approche n'existe pas...". (Les parenthèses sont de moi).

Ne pensez-vous pas que cette dernière affirmation n'est pas en accord avec notre méthodologie post-classique ? Que si nous ne pouvons pas affirmer que cet état existe... nous ne pouvons non plus affirmer qu'il n'existe pas ?

Question 28.

A propos de la fonction d'onde du système de deux particules P_1 et P_2 qui ont interagi, vous dites page 101 : "... En conséquence de cette ambiguïté ni P_1 ni P_2 ne possède (sic) de fonction d'onde bien définie. Seul en possède une le système P_1, P_2. C'est là ce qu'on appelle *la non-séparabilité de la fonction d'onde*. Cette structure est responsable des corrélations statistiques observées dans de tels cas sur les résultats de mesures portant sur P_1 et P_2."

L'affirmation "cette structure est responsable des corrélations" me heurte violemment. Dans ce problème si complexe que vous traitez, l'idée qui se forme petit à petit dans l'esprit du lecteur dépend du sens qu'ont pour lui les mots qu'il lit. Et cette phrase évoque pour moi l'idée que la structure algébrique est la cause pour laquelle la nature se comporte comme elle se comporte. Je trouve qu'il y a là inversion. Inversion dont une conséquence possible est que dans l'esprit des non-initiés, nos formules puissent apparaître comme étant des choses-en-soi, d'où découleraient les résultats de nos expériences. Il s'ensuit le choc avec ce que je crois savoir : les faits physiques observés nous ont conduits à une expression algébrique dont la structure est la conséquence de l'interaction et du type de particules. Elle suggère l'existence de corrélations.

Si vous me permettez de remettre les boeufs devant

la charrue, je dirais dans le langage du physicien ordinaire que je suis, et à propos de votre texte qui commence par les mêmes mots (vers le bas de la page 100) :

Lorsque deux particules P_1, P_2 ont interagi, en général la fonction d'onde que nous pouvons construire à partir de nos connaissances des faits, ne peut pas se mettre sous la forme d'une fonction d'onde relative à P_1 et d'une fonction d'onde relative à P_2. La fonction d'onde qui en résulte contient *plusieurs* fonctions des coordonnées de P_1 (qui pourraient donc chacune jouer le rôle de fonction d'onde de P_1), de même que *plusieurs* fonctions des coordonnées de P_2 (qui pourraient donc chacune jouer le rôle de fonction d'onde de P_2). Cette ambiguïté -résultant a) de ce que nous savons sur le type de particule et sur l'interaction, et b) de notre méthodologie physique qui nous interdit d'y mêler nos croyances sur le comment ces particules et l'interaction devraient se comporter- ne nous permet d'écrire de fonction d'onde ni pour P_1, ni pour P_2. La fonction que nous avons pu construire est une fonction d'onde pour l'ensemble P_1 et P_2. Et cette fonction d'onde a une certaine structure suggérant l'existence de corrélations. Corrélations qui ont été confirmées par la suite.

Il n'y a qu'une nuance qui sépare cette version de la vôtre. Ne pensez-vous que cette nuance est essentielle puisqu'elle éclaire le problème d'une façon tout à fait différente ?

Conclusion.

Voilà quelques-unes des multiples questions que se pose un physicien ordinaire à la lecture du livre ici commenté. En symbiose avec le laboratoire, ce physicien préfère ne pas s'aventurer dans les problèmes passionnants, et, ô combien vertigineux, de concepts tels que "réalité-en-soi" ou "réalité physique". En s'inspirant d'une phrase du Général de Gaulle, il pense qu'il n'y a aucune raison physique qui nous oblige à changer notre habitude de laisser la métaphysique au vestiaire en entrant dans le domaine de la physique.

Remerciement.

Je tiens à remercier les collègues avec lesquels

j'ai échangé des idées sur les problèmes physiques ici évoqués. En particulier, Olivier COSTA de BEAUREGARD.

BIBLIOGRAPHIE

1) J.S. BELL, Physics, 1, 195 (1964).

2) D. CANALS-FRAU, Ann. Fond. L. de Broglie, 7, 217 (1982), page 227.

3) D. CANALS-FRAU, Ann. Fond. L. de Broglie, 10 141 (1985). Voir aussi : G. LOCHAK, Found. Phys., 6, 173 (1976) ; Revue de Métaphysique et de Morale, 88, n° 1, 85 (1983), et diverses livraisons des Lettres Epistémologiques.

4) J.S. BELL, J. de Phys. Colloques C-2, 42, 41 (1981).

5) N.D. MERMIN, Am. J. Phys., 49, 940 (1981).

6) Une bibliographie détaillée se trouve dans la Thèse d'A. ASPECT (soutenue le 1er Février 1983 à l'Institut d'Optique, Centre d'Orsay, Université de Paris-Sud).