

EDITORIAL

*"Je ne suis pas d'accord avec
ce que vous dites, mais je me
battraï jusqu'au bout pour que
vous puissiez le dire."*

VOLTAIRE

SUR LES PARADOXES DE LA PHYSIQUE
ET SUR CEUX DE LA DISCUSSION SCIENTIFIQUE

par M. Georges LOCHAK

*Les paradoxes d'Einstein se trouvent, depuis un demi-siè-
cle, au centre du grand débat sur l'interprétation de la mécanique
quantique, notamment sur la question de savoir si oui ou non on
peut la considérer comme une théorie complète c'est-à-dire, selon
la définition d'Einstein lui-même, comme une théorie dans laquel-
le se trouve représenté tout élément de la réalité.*

*Le plus célèbre de ces paradoxes, le paradoxe EPR, a été
récemment analysé ici-même par M. O. Costa de Beauregard ⁽¹⁾
et nous avons décidé de consacrer à la discussion de ce problè-
me tout le présent numéro des "Annales". Je voudrais saisir
cette occasion pour faire quelques remarques à ce sujet.*

1. - Quelle est l'importance du paradoxe EPR pour la microphysi-
que future ?

Cette seule question est déjà par elle-même un sujet de

dispute (au sens premier du terme, s'entend !) car la réponse variera beaucoup, n'en doutons pas, suivant les individus. Tout d'abord, il y aura, je le crains, nombre d'usagers de la mécanique quantique qui ne verront là que ratiocinations sans intérêt (puisque les calculs marchent ...). Je tiens à dire que si, par malheur, un tel état d'esprit l'emportait, c'en serait fait de la physique car on substituerait à la recherche de lois générales cohérentes, celle de procédés de calculs propres à représenter les faits. Et le mépris des problèmes théoriques ferait bientôt de la physique un magma de recettes, qui même en tant que telles, finiraient par devenir inopérantes car on serait incapable de les renouveler en profondeur.

Mais les autres physiciens, ceux qui attachent de l'importance à ces problèmes conceptuels se rangeront d'abord, grosso modo, en deux camps : celui des partisans et celui des adversaires de la forme actuelle de la mécanique quantique (que ceux qui ne veulent ni d'un camp ni de l'autre me pardonnent !).

Les partisans de l'actuelle mécanique quantique ont en général tendance à faire du paradoxe EPR un problème central et à y attirer les autres au cours de la discussion. Bien loin de rejeter le paradoxe d'Einstein, ils l'assument et, gommant la connotation critique que son auteur y avait mise, ils le présentent (selon le mot de M. Costa de Beauregard) comme le paradigme de la mécanique quantique et somment, en quelque sorte, les tenants des autres théories, notamment celles à variables cachées, d'en rendre compte à leur tour.

Cela étant, ce camp-là, celui des partisans de la théorie actuelle, n'est pas uni puisqu'on s'y affronte, par exemple, sur la question de savoir si l'"action à distance" qui apparaît dans le paradoxe EPR est, ou non, en accord avec la relativité.

Mais le camp adverse n'est pas davantage uni. Les uns tentent, effectivement, de rendre compte de cette "non localité" en termes de variables cachées. Les autres espèrent, au contraire, battre sur ce terrain la mécanique quantique et la mettre en défaut par une expérience cruciale. Mais d'autres encore, et c'est mon cas, pensent tout autrement : ils cherchent, avec des objectifs divers, à créer une autre microphysique, c'est-à-dire une vision différente de celle de la mécanique quantique, qui permettrait d'expliquer certains de ses aspects à partir de

points de vue qui leur paraissent plus réalistes et plus cohérents et surtout, ils visent à décrire des phénomènes pour l'instant ignorés de la microphysique. Telle était la position d'Einstein lui-même qui voulait inclure les lois quantiques dans une théorie générale du champ. Telle est la position de Louis de Broglie qui veut décrire le dualisme onde-corpuscule dans sa théorie de la double solution et de l'onde à bosse (dont la théorie des solitons est une résurgence récente). Telle est aussi celle des tenants de l'"électrodynamique stochastique" ; et c'est enfin la position du groupe auquel j'appartiens, qui cherche à fonder la microphysique sur une description des processus transitoires irréversibles dont les états quantiques doivent être, nous semble-t-il, l'aboutissement.

On comprend que pour tous ceux-là, les paradoxes de la mécanique quantique ne peuvent occuper qu'une position de second plan derrière leur souci principal qui est de bâtir une nouvelle théorie. On observera, du reste, qu'aussi bien Einstein, que Louis de Broglie et Schrödinger, n'ont consacré qu'une part assez faible de leur temps à la discussion des paradoxes et que ceux-ci n'ont jamais représenté pour eux qu'une façon imagée de formuler leurs critiques contre l'interprétation usuelle de la mécanique quantique. En définitive, c'est avant tout un thème sur lequel se cristallise le débat scientifique et il n'est pas étonnant que ce point névralgique de la théorie usuelle en mécanique quantique, qui nous a été indiqué par quelques uns des plus grands esprits de notre temps, soit devenu celui où s'affrontent, en champ clos, toutes les écoles de physique et tous les courants de pensées.

Chacun arrive dans ces discussions avec une énorme charge d'arrière-pensées et de présupposés scientifiques et philosophiques qui donnent parfois à la confrontation l'apparence d'une tour de Babel, tant les positions des uns et des autres sont arrêtées et s'expriment dans des langages différents. C'est pourquoi, lors d'un récent colloque sur ces questions, organisé par François Bonsack à Genève sous les auspices de l'Association Gonseth, on a pu entendre le petit dialogue suivant entre deux participants à la sortie d'une séance :

L'UN (ironique) : nous aurions peut-être dû créer des sous-commissions.

L'AUTRE (railleur) : oui, mais alors des sous-commissions d'un seul membre chacune !

Mais alors, est-ce à dire que le dialogue est inutile ? Pour ma part, je ne le pense pas car en réalité il n'est pas étonnant que, le plus souvent, chacun reste sur ses positions : il ne s'agit pas là de quelque problème élémentaire ou simplement technique, mais d'une orientation de toute la microphysique si bien que le changement d'opinion de quelqu'un signifie, dans ce domaine, un revirement très profond et douloureux de sa pensée. Par contre, cette joute où chacun est obligé sans cesse de raffiner ses arguments, de reconsidérer ses positions théoriques et de répondre aux attaques, sert finalement tout le monde et ce n'est pas parce qu'on n'est pas convaincu par les arguments d'un partenaire dans la discussion qu'ils restent lettre morte : ils sont, en fait, écoutés avec profit. C'est pourquoi je pense que cette discussion, au sujet du paradoxe EPR ou d'autres, est très intéressante pour l'approfondissement d'un certain nombre de problèmes théoriques, même si mes préférences personnelles vont aux tentatives d'élaboration d'une nouvelle théorie.

2. - Le paradoxe EPR est-il vérifié par l'expérience ?

Contrairement à M. Costa de Beauregard je pense que la réponse à cette question doit être négative et je voudrais dire brièvement pourquoi, en reprenant un argument très simple (que M. Fargue généralise dans l'article qui suit le mien ⁽²⁾) et que j'ai déjà utilisé dans le Colloque Epistolaire Gonthier ⁽³⁾.

En effet, alors que le paradoxe EPR est énoncé sur un cas individuel, les expériences qui s'en inspirent sont toutes de nature statistique et pour illustrer l'importance de cette distinction, nous reprendrons brièvement le principe de ces expériences en les décrivant avec les notations mêmes du célèbre article EPR ⁽⁴⁾.

Considérons deux particules I et II qui, après avoir interagies, se séparent dans l'espace et se trouvent dans un état $\psi(x_1, x_2)$, où x_1 et x_2 désignent respectivement les grandeurs qui décrivent I et II.

Supposons (comme on le fait d'ordinaire) que nous connaissions deux grandeurs non commutables A et B pour la particule I et deux grandeurs non commutables P et Q pour la particule II,

respectivement corrélées aux deux premières, de telle sorte qu'on ait les deux développements (*) :

$$(1) \quad \psi(x_1, x_2) = \sum_n c_n u_n(x_1) \phi_n(x_2)$$

$$(1') \quad \psi(x_1, x_2) = \sum_m d_m v_m(x_1) \chi_m(x_2)$$

où $u_n(x_1)$ et $v_m(x_1)$ sont les états propres de A et B associés à des valeurs propres (non dégénérées) a_n et b_n , tandis que $\phi_n(x_2)$ et $\chi_m(x_2)$ sont les états propres de P et Q avec des valeurs propres p_n et q_n (non dégénérées également).

Supposons alors que deux observateurs O_1 et O_2 fassent des mesures sur I et II, sans communiquer entre eux, mais que chacun d'eux connaisse les développements (1) et (1'). Comme on sait, le drame commence quand on dit que si O_1 et O_2 ont décidé de mesurer les grandeurs corrélées A et P, par exemple, et que si O_1 trouve I dans l'état $u_n(x_1)$, attribuant donc à A la valeur a_n , il peut être certain que O_2 trouvera II dans l'état corrélé $\phi_n(x_2)$ et attribuera à P la valeur p_n . En effet, O_1 pourra se servir pour cela du développement (1) : ayant pris connaissance de l'état $u_n(x_1)$ de la particule I, il opérera une réduction du paquet de probabilité qui réduira ce développement de $\psi(x_1, x_2)$ à son n-ième terme $u_n(x_1)\phi_n(x_2)$, ce qui signifie la certitude que la particule II est dans l'état $\phi_n(x_2)$ ^(*).

(*) En fait, cette hypothèse n'est pas sans soulever de difficultés car dans l'espace de Hilbert un tel développement paraît bien être unique ! (Francis Fer : communication privée).

(*) En réalité, ce raisonnement, qui est communément admis, n'est pas si évident qu'il le paraît et présente une difficulté en mécanique quantique (voir l'article de D. Fargue).

On a donc bien l'impression d'une "action instantanée à distance" de O_1 sur la particule II, puisque O_2 pourra opérer sa propre mesure à un instant qui suivra d'aussi près qu'il voudra l'instant de la mesure de O_1 . En outre, O_1 et O_2 pourront vérifier l'exactitude des prévisions faites à l'aide de la formule (1) en s'assurant qu'ils trouvent bien, tous deux, les mêmes fréquences d'apparition $|c_n|^2$ des états quantiques u_n et ϕ_n (resp. de I et II) lors d'un grand nombre de mesures de A et P ; c'est ce qu'on fait réellement dans les expériences effectuées jusqu'ici.

Mais imaginons maintenant les circonstances suivantes : O_1 et O_2 conviennent toujours de mesurer A et P, mais O_1 triche et, au lieu de mesurer A comme il l'a promis, il mesure B, tandis que O_2 continue loyalement de mesurer P comme convenu.

Alors, si O_2 découvre la supercherie grâce aux seuls résultats de ses propres mesures (n'oublions pas qu'il ne communique pas avec O_1), on pourra dire que O_1 lui a transmis (involontairement) une information par la voie des corrélations quantiques. Mais il n'en est rien, car tout ce que O_2 peut faire, c'est vérifier que II lui parvient (lors d'une mesure de P) dans les états $\phi_n(x_2)$, avec les fréquences statistiques $|c_n|^2$ qu'il a calculées, comme précédemment, à l'aide du développement (1) ; or on voit aussitôt qu'il en sera toujours ainsi, quoi que fasse O_1 .

En effet, admettons, comme on le fait couramment, qu'en raison des mesures effectuées par l'observateur O_1 sur la particule I, l'observateur O_2 "reçoive" la particule II dans les états propres $\chi_1(x_2)$, $\chi_2(x_2)$... etc. de la grandeur Q (puisque O_1 triche !), avec les fréquences $|d_1|^2$, $|d_2|^2$, ... données par la formule (1'). Nous aurons d'autre part une transformation unitaire S qui fait passer de la base $\{\phi_n\}$ à la base $\{\chi_n\}$. Il existe donc des développements :

$$(2) \quad \chi_m(x_2) = \sum_j s_{mj} \phi_j(x_2) \quad (\sum_j s_{mj} s_{jk}^* = \delta_{mk})$$

Et on voit donc que si O_2 cherche à mesurer P et "reçoit" la particule II dans des états χ_m , il enregistrera les états ϕ_n nécessaires à sa mesure avec les fréquences :

$$\sum_m |d_m|^2 |s_{m1}|^2, \quad \sum_m |d_m|^2 |s_{m2}|^2, \quad \dots \text{ etc } \dots$$

Or, en raison de l'orthogonalité des états propres et de l'égalité des développements (1) et (1'), on trouve précisément, à l'aide de (2), que :

$$(3) \quad |c_n|^2 = \sum_m |d_m|^2 |s_{mn}|^2.$$

Autrement dit, O_2 retrouve les mêmes fréquences qu'auparavant, il ne découvre pas la supercherie et il n'y a pas de message transmis.

Ce raisonnement me paraît intéressant parce qu'il montre, à mon avis, que les caractéristiques étranges que les calculs de la mécanique quantique nous suggèrent (si on les prend à la lettre) d'attribuer aux mesures corrélées d'un couple de particules individuelles ne se reflètent absolument pas dans les effets statistiques. Et cela bien que les prévisions statistiques de la mécanique quantique, qui sont fondées sur cette image individuelle soient correctes. En somme, il est difficile d'induire un comportement individuel à partir d'une mesure statistique et il est, en revanche, fort possible d'imaginer des modèles individuels faux qui donnent des statistiques correctes. Qu'on me permette encore un exemple.

Imaginons deux observateurs, séparés l'un de l'autre, qui lancent chacun simultanément un dé. Ils notent chacun leurs points et en font la somme à chaque tirage, puis ils refont l'expérience un grand nombre de fois et calculent la moyenne statistique des sommes ainsi obtenues. Combien trouveront-ils ? Il est facile de répondre : dans le cas présent, les tirages des deux dés sont certainement indépendants, d'autre part chaque face apparaît avec la probabilité 1/6, si bien que la moyenne de la somme

obtenue à chaque tirage sera :

$$\frac{1}{6}(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6) + \frac{1}{6}(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6) = 7.$$

Mais un observateur qui n'aurait accès qu'au résultat statistique pourrait faire l'hypothèse suivante :

"La somme de deux faces opposées d'un même dé, dira-t-il, est toujours égale à 7 (1 + 6, 2 + 5, 3 + 4). Je puis donc imaginer que si l'observateur O_1 tire une face quelconque de son dé, l'observateur O_2 tirera aussitôt, corrélativement, la face opposée et la somme sera 7".

Dans le cas présent, nous savons que cette hypothèse est fautive parce que nous savons observer un couple de lancers individuels et par là, trouver des contre-exemples. Mais si l'on n'a accès qu'aux résultats statistiques, il est impossible d'avérer, comme de réfuter le modèle individuel. Donc l'exactitude des prévisions statistiques d'une théorie ne nous contraint nullement de retenir pour description des phénomènes individuels auxquels nous n'avons pas encore accès le modèle qui est suggéré par les raisonnements probabilistes. C'est pourquoi Einstein pouvait écrire dans le livre jubilaire offert en 1952 à Louis de Broglie (4) :

"Il m'apparaît que la théorie quantique statistique constitue aussi peu un point de départ utilisable pour l'élaboration d'une théorie plus complète que, peut-être, la théorie du mouvement brownien fondée sur la mécanique classique et la loi de pression osmotique n'aurait pu constituer un point de départ utilisable pour la construction de la théorie cinétique moléculaire, si la théorie du mouvement brownien avait précédé celle-ci".

3. - Parlons-nous tous du même paradoxe ?

Evidemment non ! Ce serait trop simple ... Certes, tout le monde décrit la même expérience, ou au moins le même principe de montage, mais aussitôt l'on se sépare non seulement sur les conclusions, mais encore sur les points qui paraissent aux uns ou aux autres mériter l'attention, voire sur l'existence même du paradoxe d'où cette impression que chacun répond à côté des questions des autres.

Je ne me hasarderai pas, dans ces remarques introductives, à faire le tour des différents points de vue (de peur de me faire attaquer par tout le monde à la fois !), mais je voudrais au moins essayer brièvement de situer la position d'Einstein lui-même.

Tous les efforts d'Einstein sur les fondements de la mécanique quantique visaient à prouver son incomplétude. Il a, certes, discuté le problème de la non-séparabilité et il tenait celle-ci pour inadmissible ("mon instinct scientifique se hérissait à cette idée", disait-il à son ami Max Born (5)), mais il n'en faisait que l'un des termes d'une alternative : ou l'on admet la non-séparabilité, ou l'on reconnaît que la mécanique quantique n'est pas complète. Bien entendu, il penchait en faveur de l'incomplétude de la théorie, et la non-séparabilité ne lui servait que d'une sorte de "repoussoir" pour justifier sa conclusion.

Il est intéressant de rappeler cependant que c'est la non-séparabilité qui a attiré, en premier, son attention, ainsi qu'on le voit à son intervention au Congrès Solvay de 1927 (6), dans laquelle il a présenté le fameux paradoxe du film hémisphérique. Mais déjà, il posait le dilemme fondamental : la mécanique quantique est-elle une théorie purement statistique, ou peut-elle prétendre à la description d'une particule individuelle ? Autrement dit, c'est le problème de la complétude qu'il posait déjà.

Il faut noter également que c'est ce problème-là, celui de la complétude, qui fait l'objet du fameux article EPR de 1935 (4) et absolument pas la séparabilité dont l'hypothèse est seulement mentionnée pour que la mesure envisagée soit possible.

Enfin, il est curieux de remarquer qu'Einstein ne fait pratiquement jamais appel à la relativité dans ses raisonnements. Tout au plus l'a-t-il mentionnée une fois, au Congrès Solvay de 1927, en disant que "pour autant qu'[il] comprenne", la non-séparabilité lui paraît contraire au principe de relativité.

Mais ne vaut-il pas mieux, maintenant, lui laisser la parole ? C'est ce que nous allons faire en reproduisant l'un de ses derniers écrits sur le paradoxe EPR.

REFERENCES

- (¹) O. Costa de Beauregard, Ann. de la Fondation L. de Broglie, 2, 231, 1977.
- (²) D. Fargue, Ann. de la Fondation L. de Broglie, 3, 87, 1978.
- (³) G. Lochak, "Variables cachées et indéterminisme quantique", Lettres épistémologiques, Association F. Gonseth, mai 1976.
- (⁴) A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev., 47, 777, 1935.
- (⁵) A. Einstein et M. Born, Correspondance 1916-1955, Ed. du Seuil, Paris, 1972 (p. 181).
- (⁶) Electrons et Photons (Rapports et discussions du 5-ième Congrès de Physique Solvay, Gauthier-Villars, Paris, 1928).