LOGIQUE QUANTIQUE

ET

NON - SÉPARABILITÉ

B. d'Espagnat

Laboratoire de Physique Théorique et Particules Elémentaires

Orsay, France*

Contribution au Symposium "On the development of the physi$cist's conception of Nature", Trieste, Septembre 1972.

(LPTPE)

LPTHE 72/44

*Laboratoire associé au Centre National de la Recherche Scientifique

Adresse : Bâtiment 211, Université Paris-Sud, 91405 Orsay.

Summary

(Presentation at general session)

Since this symposium is on the development of the physicists' conception of Nature , I wish to state very simply what impressed me most in the recent development on that subject. It is that experiments have been recently carried out that would have forced Einstein to change his conception of Nature; on a point he always considered essential.

In a discussion about his 1935 controversy with Bohr, Einstein wrote something like this. "There is one suggestion we must absolutely hold fast to. It is that if we have two systems 1 and 2 that have once interacted and are no more interacting, the real factual situation of system 1 must not depend on what is done with system 2 which is spatially separated from the former". For future reference let us call this the principle of separability. As is well known, a result of the Einstein, Podolsky and Rosen paper was to show quite decisively that as soon as this principle is given a completely specified meaning (this requires some care in the definitions of words) then it is not obeyed in quantum mechanics, as usually formulated. And for that reason they suggested that hidden variables should be introduced. Now recently Bell has shown that no hidden variable theory that reproduces correctly the observable predictions of quantum mechanics can obey the principle of separability. And, this year, Clauser and Friedman have shown (experimentally, that is : quite independently of quantum mechanics) that indeed all the hidden variable theories that obey the principle in question are contradicted by the data.

Hence we know for sure, contrary to Einstein's conception, that - in some respects at least - the world is non-separable. In other words the status of the concept of non-separability has changed. Previously, it was but a feature of <u>one</u> interpretation of experiments, namely the conventional Hilbert-space quantum mechanics, without hidden variables. Now we know it holds also in another quite different interpretation, the one with hidden variables, which as we all know is <u>consistent</u> even if it is not quite beautiful. And, incidentally, in the main text of this essay I claim that non-separability holds also in more abstract formulations such as the one based on the lattices of propositions (in the style of Piron and Jauch). For all these reasons I think we may safely say that non-separability is now one of the most certain general concepts in physics. More so than indeterminism or weak objectivity. And this in fact is my real point. In other words what I want to stress here is not the novelty of this concept but rather its high relative degree of certainty.

Non-separability is also culturally very important, and significant for the subject of this symposium, because it shows that the general approach of Democritian atomism is a false view of Nature even when applied to events. If we call "atoms" microobjects having definite properties, or micro events, then it is <u>we</u> who, so to speak, paint the distinct atoms on the canvass of non separable reality, whatever this latter word means.

Hence we are in a circle. To state it loosely but vividly : "the atoms make us, but we make the atoms". If I may refer to the cartoon that Prof. Eigen showed at the beginning of his lecture, this is just the problem of the hen and the egg. But the tragedy, in a way, is this : as it is popularized, and even as it is teached, science vigorously propagates the

view that it goes only one way. That it is the egg that causes the hen, I mean the multiplicity of atoms that causes us and everything, in some absolute, irreversible way. To say it otherwise, elementary scientific teaching implicitely propagates the view A) that a kind of naive realism is true; B) that the ultimate reality is essentially constituted of an immense number of small elements each possessing a fixed number of definite properties, and C) that the local and causal interactions of these elements lead to combinations that account for the complexity of the actual world. On the fact that such a view of the world is but a crude model tailored to specified purposes of ours an absolute silence is nearly always kept.

This mutilation of the truth throws undue discredit on the concept of Unity and is therefore a really srious one, culturally I mean. Moreover, it is a falsehood recognized as such by, I guess, a vast majority of the participants in this symposium (I know I have not been saying anything new!). And falsehoods should not be spread. Still, that one implicitly is; and perhaps even more by scientists who are not physicists than by physicists. It seems to me that we must be aware of that situation for if nothing is done we may fear that Science will become associated, in the public's view, with a very poor and obsolete natural philosophy, with which it has really nothing in common.

When extended to the system-instrument complex, non-separability constitutes the essence of the - formidable! - problem of measurement. I think that the latter can probably not be solved merely by limiting the number of true observables. More precisely : there have been detailed attempts at analysing realistically the mechanism of measurement that have lead me, among others, to the conclusion just mentioned. Maybe, therefore

"Son action (celle de E. Mach) a été particulièrement bienfaisante quand il a montré clairement que les problèmes de physique les plus importants ne sont pas de nature mathématico-déductive; les plus importants sont ceux qui se rapportent aux principes de base".
A. Einstein, lettre à M. Besso, Janv. 1948
(Einstein, Besso, correspondance, Hermann Paris, 1972)

1. Introduction

Les tentatives d'interprétation de la mécanique quantique élémentaire en termes d'affirmations portant sur les systèmes physiques eux-mêmes se heurtent à un certain nombre de difficultés qui, depuis longtemps, ont été exposées et discutées par bien des auteurs. L'objet de la présente note est d'attirer l'attention sur le fait que certaines - au moins - de ces difficultés se rencontrent aussi dans une théorie beaucoup plus générale et dont la mécanique quantique usuelle - formulée au moyen de l'espace de Hilbert - ne constitue qu'un cas particulier.

La théorie ici étudiée est une généralisation du calcul des propositions appelé parfois - improprement selon certains - logique quantique. A partir des travaux de Birkhoff et de Von Neumann [1] le calcul en question a été développé principalement, comme on sait, par Jauch et Piron [2,3,4,5,6] (cf. aussi Mackey [7] et Weissäcker [8]). Il s'agit bien - effectivement - d'une <u>généralisation</u> des principes de ce calcul car, ci-dessous, il ne sera même pas nécessaire de postuler que l'ensemble considéré de propositions a toutes les propriétés mathématiques d'un treillis. Essentiellement, il suffira de noter qu'il s'agit d'un ensemble partiellement ordonné sur lequel est défini un complément orthogonal; mais bien entendu tout ce que nous avancerons sera compatible avec l'hypothèse, d'ailleurs bien naturelle, selon

laquelle il s'agit effectivement d'un treillis.

En outre, l'argumentation développée ci-dessous montre, pensons-nous, la nécessité d'un complément aux travaux déjà effectués dans ce domaine. En effet elle se propose d'introduire les éléments permettant d'aborder un sujet non encore suffisamment étudié dans les travaux dont il s'agit, à savoir le problème de la séparation des systèmes. Un ensemble de recherches, théoriques et expérimentales - les unes anciennes [10], les autres très récentes [11,12,13,14] - ont montré que la description, en particulier, des corrélations existant entre des systèmes qui sont isolés à l'instant considéré mais qui ont antérieurement interagi soulève des questions fondamentales et dont l'importance du point de vue de la compréhension des théories a sans doute été, jusqu'à présent, grandement sous estimée jusque dans les axiomatiques mathématiquement les plus avancées. C'est cette lacune que nous voulons ici essayer de combler un peu en ce qui concerne les théories fondées sur l'étude du calcul des propositions. Comme on le verra, ceci oblige à restreindre considérablement l'éventail des formulations possibles concernant les axiomes et les concepts fondamentaux de ces théories, en particulier en ce qui concerne la notion de systèmes physiques séparés.

Il aurait été inutile et fastidieux pour le lecteur que soit repris ici dans le détail l'exposé systématique du langage du calcul des propositions. Les rares mots techniques dont le sens n'est pas explicitement défini ci-dessous font partie du langage conventionnel de la théorie mentionnée. On en trouvera la définition dans les travaux des auteurs cités et particulièrement dans l'ouvrage de Jauch, Foundation of Quantum Mechanics [4].

La méthode adoptée consiste à préciser (section 2) certaines autres définitions, qui font également partie du langage conventionnel de la théorie en question mais dont, selon nous, le sens opérationnel n'était pas jus-

qu'ici complètement dégagé, particulièrement en vue des questions que soulève l'union et la séparation des systèmes physiques. Elle consiste également à préciser, au sein de ces définitions, certaines hypothèses implicites permettant de traiter le présent et le passé au moyen d'un même système conceptuel. Par une généralisation d'arguments connus, dûs à Einstein, Podolsky et Rosen [10] d'une part et à Bell[11] et Wigner[15] d'autre part, elle consiste ensuite (section 3) à montrer que si l'on n'est pas d'une très grande prudence en ce qui concerne les domaines d'application des notions de <u>système physique</u> et de <u>séparation</u> de ces systèmes, l'ensemble des énoncés ainsi construit est incompatible avec les faits. En vérité cette prudence nécessaire équivaut au besoin d'une vraie modification du point de vue initialement adopté. L'étude des possibilités qui existent à cet égard fait l'objet de la section 4. Malgré leurs mutuelles différences ces possibilités comportent toutes la non-séparabilité. La section 5 met en valeur cette conclusion.

Du point de vue proprement scientifique les cinq premières sections de cet article constituent un tout auquel la sixième n'ajoute rien. Du point de vue de la compréhension de la Nature - thème du présent symposium - nous sommes au contraire convaincus de l'extrême gravité des problèmes que nous avons tenté d'évoquer dans cette section qui sert d'appendice à l'article.

2. Définitions générales

2.1. Systèmes physiques

En théorie quantique, la notion de système physique est une notion relative : en ce sens qu'il y a des situations expérimentales que la physique classique analyserait en termes de plusieurs systèmes (ayant chacun des propriétés bien déterminées) alors que la physique quantique interdit ou rend sujette à de nombreuses qualifications toute analyse de cette espèce. Le principal résultat de la présente étude sera finalement de confirmer ceci d'une manière très générale, c'est-à-dire de montrer que la très grande relativité de la notion de système physique n'est pas une particularité de la mécanique quantique dite élémentaire - définie dans un espace de Hilbert à coefficients pris dans $\mathbb{C}$ - mais reste vraie quel que soit, en définitive, le formalisme que l'on adopte, pourvu qu'il reproduise correctement les faits.

Même en physique quantique usuelle on ne peut cependant se passer de la notion de système. Et de fait, si l'on n'envisage qu'un ensemble donné d'expériences on peut souvent - pour analyser ou prédire celles-ci - utiliser la notion de systèmes physiques et même de systèmes physiques localisés. Afin d'établir les limites générales de la notion de système nous raisonnerons donc par la fausseté du contraire. C'est-à-dire que nous ferons d'abord abstraction de toute limitation à ce concept, ce qui nous permettra de mieux repérer les difficultés qu'implique une telle attitude. Nous conviendrons donc provisoirement - quitte à réviser notre position si nécessaire - d'entendre par système physique (ou plus brièvement "système") tout ce que la physique classique appellerait ainsi, y compris les "microsystèmes" (atomes, particules) dans toute leur généralité... ainsi qu'implicitement le font les formulations axiomatiques[5] qui usent sans limitations de l'idée de système individuel.

Deux systèmes peuvent différer l'un de l'autre soit par leur structure générale, soit par leurs configurations particulières (y compris positions, vitesses etc...). Deux systèmes qui ne diffèrent que par leurs configurations particulières seront dits être du même type.

Enfin, tout comme en mécanique classique, on considérera comme isolés l'un de l'autre, à un instant donné, deux systèmes qui, à cet instant, n'interagissent par aucune force. En particulier, deux systèmes dont la distance mutuelle est arbitrairement grande seront toujours tenus pour isolés l'un de l'autre.

2.2. Observables (et mesure)

Elles sont définies, sur un type donné de systèmes, par la description de l'instrument qui sert à les mesurer. Une même observable peut naturellement correspondre à plusieurs procédés instrumentaux (auxquels il faut joindre éventuellement des règles de calcul appropriées). Nous admettrons que toute observable est susceptible d'une mesure de première espèce (on dit parfois aussi "idéale" dans ce sens); en bref une mesure de première espèce est telle que si une deuxième mesure de la même quantité est faite sur le même système immédiatement après la première, les deux résultats coïncident. Par "mesure" nous entendrons dorénavant toujours une mesure de première espèce.

2.3. Observables compatibles

On peut définir la notion de compatibilité entre deux observables A et B appartenant à un type T de systèmes de façon opérationnelle. Imaginons que sur chacun des éléments d'un ensemble statistique E de systèmes de type T on fasse successivement une mesure de A, puis une mesure de B,

puis de nouveau une mesure de A, dans un laps de temps "infiniment" court. Si, quelle que soit la préparation initiale des systèmes, le résultat de la troisième mesure coïncide pour chaque élément avec celui de la première, on dit que B est compatible avec A. Il se trouve que la compatibilité est une relation réflexive.

Remarque. Dans le cas de la mécanique quantique usuelle les observables A et B sont représentées par des opérateurs Hermitiques. Si l'on prend la décomposition de l'unité d'un opérateur et si P_j (Q_k) dénote l'élément général de la décomposition de A(B) on montre aisément que la définition précédente impose $\langle u | P_j Q_k P_j Q_k P_j | u \rangle = \langle u | P_j Q_k P_j | u \rangle$ quel que soit $| u \rangle \in \mathcal{H}$ où $\mathcal{H}$ est l espace de Hilbert relatif à T. Il est bien facile de montrer que cette relation, à son tour, entraîne

$$[P_j , Q_k] = 0 \quad \text{donc} \quad [A,B] = 0$$

2.4. Savoir certain

Mesures directes et indirectes

Nous admettrons la validité de l'induction non exhaustive. En conséquence nous considérons que si une personne a recommencé un très grand nombre de fois une certaine mesure, si les systèmes sur lesquels elle l'a chaque fois faite étaient tous préparés de même et si les résultats qu'elle a obtenus ont tous été identiques, alors elle sait d'avance (avec certitude, mais nous sous-entendons ce mot) que si elle recommence encore la même mesure sur un système préparé comme les précédents, elle obtiendra de nouveau le résultat en question.

Les mesures ici considérées pourront être directes, c.a.d. porter sur les systèmes eux-mêmes, ou indirectes, c.a.d. porter sur d'autres sys-

tèmes, dont on sait par ailleurs qu'en vertu de leurs interactions antérieures avec les systèmes qui nous intéressent, ils ont avec ceux-ci des corrélations strictes mettant en jeu l'obervable considérée.

Conséquence.

Considérons tous les éléments de l'ensemble E introduit en 2.3 et pour lesquels la première mesure a donné le résultat $A = a_i$ et la seconde le résultat $B = b_j$. On sait alors d'avance que sur l'un quelconque de ces systèmes la troisième mesure envisagée en 2.3 donnera de nouveau la valeur $A = a_i$. On peut donc affirmer que sur ces systèmes la proposition $A = a_i$ est vraie. De même en ce qui concerne la proposition $B = b_j$ (réflexivité). Voir (2.6).

2.5. Propositions

Ce sont des observables telles que leur mesure ne peut fournir que l'une ou l'autre de deux valeurs, que nous appellerons conventionnellement oui et non. Une affirmation n'est ainsi une proposition que si l'on peut concevoir un instrument capable de la mesurer. Aux propositions la mécanique quantique élémentaire conduit à associer des projecteurs.

A toute proposition a on peut faire correspondre une autre proposition a' définie par les mêmes procédés expérimentaux et telle que le résultat de la mesure de a' sera dit être oui chaque fois que celui de la mesure de a est non et inversement. a' se nomme le complément orthogonal de a.

Remarque. Il est concevable que le fait, pour une affirmation quelconque, d'être une proposition dépende des facultés générales de la collectivité d'obervateurs considérés. C'est le cas par exemple dans une théorie à varia-

bles cachées dès qu'on imagine des "démons" qui auraient accès aux valeurs de ces variables. On admettra que la collectivité humaine jouit de ce point de vue de facultés bien déterminées, qui serviront de référence.

2.6. Vérité d'une proposition

a) Quand, sur la base de mesures du type de celles considérées en 2.4., qu'elles soient directes ou indirectes, une ou plusieurs personnes savent qu'une mesure de la proposition a sur le système S donnerait le résultat oui si on décidait de la faire, la proposition a est vraie sur S.

b) Cependant nous savons bien par l'exemple de la physique classique que le cas considéré en a) n'est pas nécessairement le seul cas dans lequel - selon le langage usuellement admis - une proposition puisse être vraie.

D'une part en effet nous connaissons des cas où il est possible de se prononcer sur la vérité d'une proposition concernant le passé, et d'autre part il y a en physique classique bien des propositions qui peuvent être objectivement vraies - dans le sens d'adéquation à la chose telle qu'elle est - bien que personne n'en sache rien

Aussi il est tentant de compléter l'énoncé a au moyen des deux définitions suivantes :

Définition A

On peut affirmer, à l'instant t_1, qu'une proposition a portant sur un système S sera (était) vraie à un instant $t > t_1$ ($< t_1$) si et seulement si la condition suivante est réalisée :

On sait que si une mesure de a est (avait été) faite sur S

immédiatement après t le résultat oui sera (aurait été) obtenu.

Définition B

On dit qu'une proposition a portant sur un système S peut être, ou avoir été, vraie à un instant t (distinct de ou confondu avec l'instant t_1 où l'on se place) quand et seulement quand il est possible d'imaginer une ou plusieurs personnes ayant à l'instant t_1 les informations nécessaires pour connaître le résultat que donnerait - ou qu'aurait donné - une mesure de a faite immédiatement après t si cette mesure était - ou avait été - faite (le si implique que les informations en question ne proviennent pas de cette mesure).

Au lieu de "peut être vraie" nous dirions aussi bien "est vraie ou fausse" ou "est irrésolue de façon banale".

2.7. Implication

Ayant défini la vérité d'une proposition, il est facile de définir le verbe "entraîner" appliqué aux propositions. On dit que a entraîne b quand b est vrai toutes les fois que a est vrai.

2.8. Propositions persistantes

Des situations se rencontrent dans lesquelles il existe des propositions telles que si l'une d'elles est vraie pour un système isolé S à un instant t, elle reste vraie aux instants ultérieurs t', pourvu seulement que dans l'intervalle de temps (t,t') S reste constamment isolé. On appellera de telles propositions propositions persistantes dans la situation donnée. Il est aisé de voir que le complément orthogonal d'une proposition persistante est une proposition persistante.

En mécanique quantique, toute proposition dont l'opérateur (pro-

jecteur) commute avec l'Hamiltonien libre du système est persistante.

Postulat 1

Soit a une proposition persistante sur un système S. Si a est vraie sur S à un instant t_1 et si S demeure isolé dans un intervalle de temps (t_o , t_2) englobant t_1 , alors on peut (à l'instant t_1) affirmer que si une mesure de a avait été faite à un instant t compris entre t_o et t_1 le résultat de la mesure aurait été oui.

La signification de ce postulat sera discutée dans la section 4.

Conséquence

D'après la définition A la proposition a considérée ci-dessus était déjà vraie à l'instant t.

2.9. Commentaires.

Problèmes de la notion d'état individuel; causalité.

Les définitions A et B et le postulat 1 paraissent particulièrement naturels dans le cadre d'une hypothèse réaliste étendue à tout ce que l'on peut, selon l'acception 2.1 appeler "système" (et qui - provisoirement - comporte, rappelons-le, les microsystèmes isolés en quelques circonstances qu'ils se trouvent). D'un autre côté, ces définitions et postulat n'impliquent pas la nécessité d'une hypothèse réaliste sur les sytèmes : on peut donc les adopter sans pour autant faire aucun postulat qui déborderait le cadre d'une méthode strictement opérationnelle.

Par ailleurs, si dans la classe des "systèmes" on range n'importe quel microsystème (comme le veut l'acception 2.1. du mot), alors pour $t < t_1$ les définitions A et B peuvent entrer en conflit avec l'idée selon laquelle un microsystème constituerait de quelque manière un "tout

indivisible" avec - en particulier - l'instrument de mesure qui servira à l'observer. Nous reviendrons plus loin sur ce point important. Ici malgré cette réserve, nous voulons - à titre d'essai tout au moins - nous en tenir aux définitions A et B.

A cela nous sommes d'ailleurs contraints si nous exigeons de pouvoir appliquer au passé et au présent les mêmes schémas conceptuels, tout en conservant le principe selon lequel le futur ne peut agir sur le passé et en préservant la notion usuelle (voir 2.1.) de systèmes. En effet considérons à nouveau la définition opérationnelle classique de la vérité d'une proposition (cf. 2,6 a) :

Définition a

On dit qu'une proposition a est vraie dans le cas où une mesure de a donnerait le résultat oui avec certitude.

Et complétons cet énoncé par le suivant qui peut être considéré comme une simple formulation du principe de causalité :

Postulat 2 (Causalité)

On ne modifie l'ensemble des propositions vraies à l'instant t sur un système S isolé ni en agissant sur les dispositifs - expérimentaux ou autres - avec lesquels S interagira en des temps $t' > t$, ni a fortiori en agissant en des temps $t' \geqslant t$, sur un autre système, dont S est isolé en t.

La définition a) ci-dessus fournit immédiatement la définition A dans le cas $t \geqslant t_1$. Dans le cas $t < t_1$ (le seul délicat) dire - comme le fait la définition A - que si une mesure de a avait été faite sur S immédiatement après t le résultat oui aurait été obtenu, c'est implicitement admettre que dès l'instant t, S existait en tant que système. Mais ceci est légitime puisque conforme à notre acception 2.1. du

mot. C'est ensuite signifier que si une mesure de a qui n'a pas été effectuée en fait (sinon l'instrument correspondant aurait en général nécessairement altéré l'évolution supposée du système) avait été faite sur S immédiatement après t , le résultat oui aurait été obtenu avec certitude. Mais si l'interaction de S avec un tel instrument, en un temps t' légèrement postérieur à t, pouvait influencer l'état de S au temps t il serait en fait illégitime d'imaginer une telle mesure et de vouloir en déduire une affirmation possédant un sens et relative à S à l'instant t. Le postulat 2 nous garantit contre cette objection de sorte que nous pouvons appliquer la définition a) au temps t, ce qui justifie la définition A.

La définition B se justifie, dans le cadre des mêmes exigences de pensée, d'une façon très similaire. Si une proposition ou son complément orthogonal a été vraie au temps t au sens de la définition a) on peut toujours, évidemment, imaginer une personne ayant au temps t_1 les informations nécessaires pour savoir ce qui en est. Réciproquement, si on peut imaginer, au temps t_1 , une personne ayant les informations nécessaires pour savoir ce qu'aurait donné une mesure au temps t de la proposition a si celle-ci avait été faite, on peut identifier cette personne avec le on de la définition A si elle sait que le résultat est oui (raisonner sur a' dans le cas opposé). Donc une telle personne pourrait affirmer, au temps t_1, que soit a soit a' était vrai au temps t. Nous pouvons donc dire, au temps t_1 , que a était peut-être vrai au temps t.

Enfin, énonçons le :

Postulat 3

Si a est une proposition dont on peut affirmer, au temps t_1, qu'elle est vraie (qu'elle était vraie au temps $t < t_1$) sur un système physique

S, alors on peut, au temps t_1 , affirmer que a est vraie (était vraie au temps t) également sur tout système physique S + T dont S constitue une partie.

Ce postulat semble évident dans tout modèle réaliste car il signifie que si l'objet S a la propriété a il ne cesse pas de l'avoir si je le considère en conjonction avec l'objet T, et que ceci vaut également pour le passé. Sa validité dans un schème opérationnel sera discutée dans la section 4.

3 Enoncés particuliers et discussion

Pour étudier l'adéquation à la physique des concepts, définitions et postulats ci-dessus considérés il est nécessaire de prendre en considération certains faits. Systématisons ceux-ci au moyen de deux énoncés.

Enoncé 1.

Soient U et V deux systèmes. Soient u_1, u_2, u_3... des propositions définies sur U. Même chose concernant v_1, v_2, v_3... et V . Pour certains ensembles de u_i et v_i on peut préparer des systèmes U + V , U et V étant isolés, tels que si l'on y mesure à la fois u_i et v_i on obtient nécessairement deux fois oui ou deux fois non, et cela quelque soit i.

Enoncé 2.

Parmi les ensembles possibles des u_i (et des v_i) considérés dans l'énoncé 1, il en est qui sont tels que chacun des u_i (et chacun des v_i) est une proposition persistante (voir 2.8.)

3.1. Conséquences

Les u_i et v_i satisfaisant à l'énoncé 2, considérons un système $U + V$ qui est du type considéré dans l'énoncé 1. et qui reste de ce type durant un intervalle de temps (t_o , t_1). Supposons que V reste isolé durant tout l'intervalle de temps (t_o, t') avec $t' > t_1$ mais que à l'instant t_1 on mesure u_1 sur U et l'on obtienne oui. On sait alors d'après l'énoncé 1 que si l'on mesurait simultanément v_1, on obtiendrait oui. D'après la définition A. v_1 est donc vraie sur V. Mais V existe en tant que système (voir 2.1.) et est isolé durant l'intervalle (t_o, t'). D'après le postulat 1, v_1 était donc déjà vraie sur V à un instant t" tel que $t_o < t" < t_1$.

Supposons maintenant qu'à l'instant t_1 la mesure de u_1 ait donné non. Cela signifie que la mesure d'une autre proposition, à savoir u'_1, a donné oui. u'_1 et v'_1, d'après l'énoncé 1, étant nécessairement reliés comme u_i et v_i le sont, le même raisonnement s'applique et permet de conclure que, en t", V était dans l'état v'_1.

Nos deux suppositions épuisent les résultats possibles concernant la mesure considérée. Donc si nous considérons un ensemble statistique E de systèmes $U + V$ du type étudié ici, préparés de même et subissant tous le même traitement, nous devons conclure, de ce qui précède et du postulat 3, que cet ensemble se divisait, à l'instant t", en deux sous-ensembles, l'un E_1 pour lequel v_1 était vrai, l'autre E'_1 pour lequel v'_1 était vrai. Dès lors l'énoncé 1 nous apprend en outre que, dans l'ensemble E_1, u_1 était vrai et que dans l'ensemble E'_1, u'_1 était vrai. Dans ces conditions il s'agit là en effet d'une simple application de la définition A.

D'après le postulat 2 de la section précédente la situation de fait ci-dessus décrite quant à la structure de l'ensemble statistique E au temps t" ne peut être modifiée si on modifie le programme des interactions que les systèmes doivent subir après t". En particulier elle n est pas modifiée si on supprime la mesure faite sur U en t_1. Ni si on la remplace par une mesure de u_2. Considérons cette dernière éventualité. Dans son cadre, nous pouvons répéter tous les raisonnements qui précèdent, simplement en changeant l'indice 1 en un indice 2. Il en résulte que, au temps t", l'ensemble statistique E se divisait également en deux sous-ensembles, l'un pour lequel u_2 et v_2 étaient vrais et l'autre pour lequel u'_2 et v'_2 étaient vrais.

Ainsi, une conséquence du système de concepts (cf. 2.1), définitions (définition A) et postulats (1,2 et 3) ici étudié est en particulier que pour tout système V il se trouve, au temps t", plusieurs propositions non nécessairement compatibles (la compatibilité des v_i n'a nulle part été supposée) et qui pourtant sont vraies simultanément, ces propositions étant, par exemple, pour certains systèmes v_1 et v_2, pour d'autres v_1 et v'_2 etc.

3.2. Discussion

Pour étudier les conséquences du résultat que l'on vient d'obtenir et pour montrer qu'il soulève des difficultés l'introduction de la notion de propositions atomiques n'est en fait nullement nécessaire, comme on le verra ci-dessous. En mécanique quantique usuelle cette notion est cependant très importante et joue un rôle dans la discussion d'expériences de pensée portant sur des systèmes du type étudié ici. Il convient donc d'ouvrir une parenthèse à son sujet.

Définition

Une proposition a portant sur un système S est atomique s'il n'existe pas de proposition b portant sur S seul, différente de la proposition absurde $\emptyset$ et qui entraîne a sans s'identifier avec a.

Pour le cas des systèmes U + V ci-dessus introduits, il peut se faire que, quel que soit i, u_i, u'_i, v_i, v'_i soient atomiques. C'est le cas par exemple en mécanique quantique usuelle dans un exemple auquel nous nous référerons souvent : celui dans lequel le système U + V est constitué de deux particules de spin $\frac{1}{2}$ qui (en vertu d'interactions antérieures) sont dans un état de spin total zéro (u_i correspond à la composante du spin de U selon une certaine direction $\underset{\sim}{e}_i$ et v_i à celle du spin de V selon la direction $-\underset{\sim}{e}_i$). Dans ces conditions il doit exister, d'après le résultat de la sous-section 3.1., à propos de tout système V une affirmation a au moins - à savoir l'une des quatre affirmations "v_1 et v_2", "v_1 et v'_2", "v'_1 et v_2" ou "v'_1 et v'_2" - qui 1°) n'est pas identique à $\emptyset$ puisqu'elle est vraie en certains cas et 2°) entraîne évidemment une proposition définie également sur V (ce sera par exemple v_1 ou v'_1 selon les cas) avec laquelle elle ne se confond pas.

Il semble donc qu'il y ait déjà là une contradiction avec l'atomicité des v_i et des v'_i que la mécanique quantique usuelle suppose dans l'exemple considéré. En fait, la chose demande une discussion plus poussée car on pourrait faire valoir que l'affirmation a n'est pas une proposition, au sens de la définition 2.5. (en effet bien que nous sachions, dans le cadre de notre système de concepts et de postulats, que des systèmes V existent pour lesquels a est vrai, nous ne pouvons pas les trier). Mais d'un autre côté, cette objection implique

l'existence d'affirmations non absurdes portant sur les systèmes physiques et qui cependant sont distinctes des propositions. Qui plus est, on ne sait introduire de telles affirmations que lorsqu'elles portent sur le passé. Comme nous avons revendiqué le droit de traiter présent et passé au moyen des mêmes schèmes conceptuels cette dernière remarque suffirait déjà à lever l'objection et donc à montrer que la contradiction signalée plus haut est réelle. Mais il apparaitra ci-dessous d'une manière peut-être plus convaincante encore que le problème effectivement existe et que sa solution ne passe pas par des élaborations conceptuelles du type de celle qu'on vient d'envisager.

On peut noter qu'en mécanique classique de telles difficultés n'apparaissent pas. Les propositions atomiques y sont des points de l'espace des phases et les compléments de propositions atomiques ne sont donc pas atomiques eux-mêmes. Si v_1 et v_2 étaient atomiques et distincts, l'ensemble des systèmes V ayant à la fois v_1 vrai et v_2 vrai serait certes vide mais ceci serait compensé par la non-vacuité des ensembles correspondant aux autres possibilités pour lesquels cette non-vacuité ne soulève aucun problème.

3.3. Discussion (suite)

Cette dernière remarque conduit tout naturellement à envisager la possibilité que les u_i, u'_i, v_i, v'_i de l'exemple étudié ci-dessus ne soient pas atomiques. Mais en s'inspirant de travaux récents [11,15] portant sur l'hypothèse réaliste (variables cachées) on montre bien aisément que ceci ne constitue pas une manière acceptable de rendre notre système de concepts, définitions et postulats compatible avec les faits. Pour cela il suffit bien évidemment, de raisonner sur un exemple et il

est commode de choisir de nouveau celui des particules U et V de spin ½ placées dans la situation décrite plus haut. Le raisonnement qui suit ne se fonde que sur les résultats obtenus en 3.1. à partir du schéma conceptuel envisagé et n'a besoin d'aucune hypothèse portant sur l'atomicité (ou non plus d'aucune hypothèse portant explicitement sur l'existence de variables cachées qui détermineraient l'évolution du système).

Considérons les trois directions de l'espace repérées par les vecteurs unitaires e_{m1} , e_{m2} et e_{m3} . Des résultats obtenus en 3.1 découle que au temps t" (c'est-à-dire avant toute mesure) tout système V est tel que - en particulier - trois propositions. w_1. w_2 , et w_3 , sont vraies simultanément à son sujet, w_i étant identique soit à v_i (pour certains systèmes V) soit à v'_i (pour d'autres systèmes V). D'après la définition A, ceci entraîne qu'il n'est pas dénué de sens d'imaginer une personne, ou un "démon", qui, à un instant $t_1 > t"$, saurait simultanément a) que si on avait mesuré w_1 sur V au temps t", on aurait obtenu le résultat <u>oui</u>. b) que si au lieu de cette mesure on avait fait celle de w_2 on aurait également obtenu <u>oui</u> et c) qu'enfin il en aurait été de même relativement à w_3. Si l'on considère un ensemble E de N systèmes U + V il est donc légitime - dans le cadre du système de concepts etc.. envisagé - de parler du nombre n (σ_1 , σ_2 . σ_3) de systèmes U + V pour lesquels il est simultanément vrai qu'une mesure de la proposition v_1 aurait, si elle avait été faite, donné le résultat σ_1 <u>et</u> qu'une mesure de v_2 aurait de même donné σ_2 <u>et</u> qu'une mesure de v_3 aurait, enfin, donné σ_3 ($\sigma_i = \pm$; $\sigma_i = +$ (-) correspondant à la réponse oui pour v_i (v'_i)). Le fait que V est isolé de U a pour conséquence (voir postulat 2) que n (σ_1 , σ_2 , σ_3) ne dépend pas de l'orientation du dispositif de mesure destiné à"mesurer" U. En outre le raisonnement de la section 3.1

conduit également à considérer que tout système U + V pour lequel une mesure de v_i (v'_i) aurait donné oui est également un système pour lequel une mesure de u_i (u'_i) aurait donné oui (ce qui, avec les conventions utilisées, correspond, rappelons-le, à des valeurs opposées des composantes de spin correspondantes).

Or ce sont là, précisément, les conditions d'applicabilité d'une démonstration des inégalités de Bell [11] dont le principe est dû à Wigner[15]. Cette preuve étant aisée nous la donnons ici <u>in extenso</u>. Soit P (i,j) la valeur moyenne sur l'ensemble E de l'observable $A_i.B_j$, $A_k(B_k)$ étant le double (en unités $\hbar$) de la composante du spin de U (V) selon e_k. Considérons d'autre part la somme de deux n $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ différant seulement par les valeurs de l'une des variables σ_i et convenons de désigner cette somme par la notation consistant à remplacer ladite variable par un point :

$$n(-,+,.) = n(-,+,+) + n(-,+,-)$$

. . . . . .

Compte tenu de ce qui précède $n(-,+,.)$ est manifestement le nombre de systèmes U + V sur chacun desquels une mesure de B_2 donnerait +1 <u>et</u> une mesure de A_1 donnerait +1 également. Dès lors il est facile d'exprimer les P(i,j) en fonction des $n(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. C'est ainsi que par exemple

$$N\,P(1,2) = n(-,+,.) + n(+,-,.) - n(+,+,.) - n(-,-,.)$$

Un calcul explicite fournit alors

$$N\left[P(1,2) - P(1,3)\right] = 2\left[n(-,+,-) + n(+,-,+) - n(+,+,-) - n(-,-,+)\right]$$

$$N\left[1 + P(2,3)\right] = 2\left[n(+,-,+) + n(-,-,+) + n(+,+,-) + n(-,+,-)\right]$$

d'où l'inégalité de Bell :

$$\left| P(1,2) - P(1,3) \right| \leq 1 + P(2,3)$$

Mais les quantités P(i,j) sont accessibles à l'expérience. Or celle-ci a été faite[14]. Sous la réserve (provisoire) que soit admise la validité de certaines hypothèses hautement vraisemblables d'ordre technique (et dont la nécessité pourra sans doute être écartée dans des expériences ultérieures) le résultat est dénué d'ambiguïté Il consiste en ceci que l'inégalité de Bell est violée (comme le prévoyait d'ailleurs[11] la mécanique quantique usuelle). Ce résultat fournit la preuve par la fausseté du contraire annoncée au début du présent essai. Compte tenu de ce qui précède, il montre en effet que le système de concepts, définitions et postulats ci-dessus introduit et discuté est incompatible avec les faits. Et cela bien qu'il apparaisse comme très général et semble ne refléter guère que des idées très "évidentes".

4. Modifications concevables

Le résultat qui vient d être obtenu l'a été par un raisonnement qui en certaines de ses parties ressemble à celui - classique - d'Einstein, Podolsky et Rosen[10]. Il constitue cependant une généralisation de ce que ces auteurs ont obtenu - et également des résultats de Jauch[6] - car d'une part il s applique à des théories beaucoup plus générales que la mécanique quantique définie dans un espace de Hilbert et d'autre part il ne fait pas appel à une hypothèse réaliste (les "éléments de réalité" de la réf. [10]). Les énoncés sur lesquels il se fonde ne sont pas contraires à une telle hypothèse mais ils n'en tirent pas leur signification Et dans ce sens-là le raisonnement ci-dessus est

conforme aux règles de la réflexion opérationnelle; ou, tout au moins, d'une réflexion opérationnelle qui se soucierait d'unifier les schèmes conceptuels relatifs au présent et au passé sans réduire pour autant le passé au présent.

D'un autre côté, le résultat est négatif. Il montre donc qu'il faut renoncer à l'un au moins des concepts ou des postulats sur la base desquels nous l'avons obtenu.

En nous laissant guider par la mécanique quantique usuelle, examinons certaines possibilités qui se présentent à cet égard.

4.1. Renonciation au postulat 2 (causalité)

Elle permet d'échapper à la difficulté parce que, comme on l'a vu, elle prive de sens dans le cas général les définitions A et B de la vérité d'une proposition. Mais d'un autre côté le principe de causalité (non-influence de l'avenir sur le passé) est à ce point nécessaire à toute action concevable qu'y renoncer d'une manière très générale est impossible. Sa violation ne peut guère être envisagée que dans le cadre de la microphysique, c'est-à-dire plus précisément par un affaiblissement de la notion générale de système qui concerne seulement les microsystèmes. Ceci peut se faire en posant en principe qu'un microsystème constitue un tout indivisible avec les instruments qui le produisent et l'analysent, qu'il n'a donc pas, - sinon par convention - de propriétés qui lui soient propres et qu'en conséquence il n'est pas un système "à part entière". Nous appellerons non-séparabilité système-instrument le principe ainsi introduit. En mécanique quantique usuelle l'interprétation de Copenhague est fondée en partie sur des considérations qui sont très voisines de celles-là.

4.2. Renonciation au postulat 1

On ne peut renoncer au postulat 1 si l'on maintient l'exigence - déjà formulée ci-dessus - que le système de concepts et de déterminations que nous appliquons au présent puisse par la pensée être également appliqué au passé, du moins lorsque - toujours par la pensée - on imagine établies dans ce passé des conditions identiques à celles qui nous permettent d'appliquer ce système conceptuel dans le présent.

4.3. Renonciation au postulat 3

Dans la pensée classique, qui est fondée sur une ontologie, le postulat 3 est l'évidence même. Dans le système de définitions et de concepts que nous considérons ici, sa validité en ce qui concerne le présent résulte manifestement de la définition même de la vérité d'une proposition. On ne peut donc y renoncer. En revanche, en ce qui concerne le passé, les choses se présentent autrement. En effet, considérons par exemple une situation dans laquelle une certaine proposition a est persistante. Pour pouvoir, à l'instant t_1, affirmer que a était vrai à l'instant $t < t_1$ sur un système physique V il suffit, d'après la définition A et le postulat 1, de savoir qu'à l'instant t_1 a est vrai sur V et que V est resté isolé dans l'intervalle (t,t_1). La connaissance du fait que, en t_1, a est vrai sur V peut alors résulter, comme dans l'exemple étudié ci-dessus, d'une corrélation préétablie entre V et un autre système physique U et d'une mesure faite sur U immédiatement avant t_1. Mais dans ces conditions U + V, lui, n'est pas isolé durant tout l'intervalle (t,t_1). On ne peut donc appliquer à ce système physique le postulat 1 et il est impossible par conséquent d'utiliser la définition A, donc d'affirmer que a était vrai au temps t sur U + V. Ceci

montre que le postulat 3 n'est pas une tautologie lorsqu'il s'agit du passé. Si on renonce à exiger sa validité générale le raisonnement de la section 3 n'est plus possible et la difficulté rencontrée disparait.

Cependant, renoncer à la validité du postulat 3 en ce qui concerne le passé alors que nous ne pouvons pas y renoncer en ce qui concerne le présent, c'est encore une fois introduire entre notre manière de concevoir le passé et notre représentation du présent une différence irréductible. Si nous refusons une telle différence, ce n'est donc pas non plus dans une violation du postulat 3 que nous devons chercher une solution.

4.4. Négation du sens intuitif de la notion de système.

L'affaiblissement envisagé en 4.1 du principe de causalité nous a conduits à considérer comme très naturelle la renonciation à la notion générale de système introduite en 2.1. Mais il faut remarquer que, dès lors que cette renonciation est acceptée, il n'est pas démontré qu'il soit indispensable de procéder comme en 4.1. et de mettre en jeu la notion d instrument. Il suffit en effet pour invalider le résultat de la section 3 que avant la mesure faite sur U, les U et V mentionnés dans les énoncés 1) et 2) de la section 3 ne soient pas des "systèmes" dans le nouveau sens, plus restreint, que l'on donnera à ce mot : de telle sorte qu'on ne puisse plus même parler de propositions telles que u_i ou v_i en tant que définies sur U et V respectivement dès qu'on se réfère à un instant antérieur à celui, t_1, de la mesure faite sur U.

Il n'en reste pas moins que, dès l'instant t_1 où une mesure

est faite sur U, il y a une proposition qui est vraie (qui donnerait le résultat oui) sur le V correspondant, quelqu éloigné que celui-ci se trouve alors de U. Il faut donc dire que cette mesure affecte immédiatement à distance la réalité d'un système, si du moins nous convenons d'appeler réalité d'un système l'ensemble des propositions dont on pourrait imaginer la vérification sur ce système. De nouveau il y a non-séparabilité.

Ainsi, nous constatons que sous les présentes hypothèses, la non-séparabilité n'est pas une particularité d'un formalisme ou d'une interprétation, tels que, par exemple, la mécanique quantique dans un espace de Hilbert ou l'interprétation de Copenhague. A moins que nous n'envisagions des changements plus significatifs encore dans notre manière de penser, nous devons reconnaître au contraire que la non-séparabilité s'impose dans tous les modèles concevables satisfaisant à l'expérience. On peut l'énoncer de façon précise en disant que "il est des circonstances où il n'est pas possible d'attribuer par la pensée à des systèmes microscopiques autant de propriétés qu'il est légitime de leur en attribuer en d'autres circonstances" Dans notre exemple, ces circonstances sont en fait de celles dans lesquelles les systèmes dont il s'agit ont antérieurement interagi avec d'autres systèmes. Et s'il faut en croire la mécanique quantique usuelle, le critère serait de validité générale. Si on convient de réserver le nom de "systèmes" aux systèmes physiques se trouvant dans des situations dans lesquelles il est légitime de leur attribuer le nombre maximum de propriétés, on retrouve le fait que les entités U et V dont il est question plus haut ne sont, avant t_1, pas des "systèmes".

Remarque :

On peut également formuler la non-séparabilité comme étant la négation d'une supposition à laquelle Einstein était très attaché et qu'il a énoncée ainsi[16] "la situation de fait du système [V] est indépendante de ce qu'on fait subir au système [U], lequel est séparé dans l'espace du premier".

5 Résumé et Conclusion

Malgré la grande unité de la théorie il faut reconnaître que les faits fondamentaux de la physique quantique sont pour la plupart susceptibles de diverses interprétations. Ainsi, par exemple, le problème du déterminisme n'est-il pas vraiment résolu par la physique contemporaine : sans doute l'immense majorité des physiciens croient-ils à l'indéterminisme. Ils ont d'excellentes raisons de penser ainsi. Il n'en est pas moins vrai qu'il existe [17,18] des théories déterministes (et non locales) qui reproduisent exactement les prédictions observables du formalisme. L'indéterminisme n'est donc pas prouvé. De la même manière, la théorie quantique habituelle - dès qu'elle est formulée avec le minimum de précautions indispensable - fait appel à la notion de mesure (ou d'instrument) dans les énoncés mêmes de ses axiomes. Il semble donc que ces derniers ne soient objectifs qu'au sens faible, c'est-à-dire qu'ils ne puissent prétendre, au mieux, qu'à être valable pour tout observateur (et non indépendamment de tout observateur). Dans une théorie sans variables cachées, ce résultat paraît bien établi pour tout N fini [9], N étant le nombre de degrés de liberté. Et d autre part les tentatives de restauration de l'objectivité forte (ou objectivité de la physique classique) qui font appel à l'idéalisation "N infini" pour décrire les instruments ne

semblent pas avoir réussi à rendre compte d'une façon réaliste (temps fini et volume fini) du processus de réduction du vecteur d'état. Cependant quelque convaincantes que soient ces remarques on ne peut pas dire, ici non plus, que soit prouvée l'incompatibilité de toute aspiration à l'objectivité forte avec nos représentations des faits. En effet, encore une fois, les théories à variables cachées ci-dessus mentionnées fournissent apparemment un contre-exemple car on voit mal en quoi elles ne seraient pas objectives au sens fort.

Par contraste, nous espérons avoir convaincu le lecteur du fait que la non-séparabilité avait pour elle bien plus qu'une simple présomption - si grande soit-elle - de vérité. En effet, sous une forme ou sous une autre elle paraît s'imposer quel que soit le choix de la théorie, dès seulement que sont acceptées certaines exigences de pensée d'une très grande généralité. De telles exigences (et notamment l'identité des concepts servant à décrire présent et passé) accompagnent pratiquement, en particulier, toute description "réaliste". Si donc, dans l'espoir de justifier mieux notre usage du principe d'induction ou pour n'importe quel motif, nous convenons d'accepter la notion d'une réalité irréductible à l'homme, alors nous sommes obligés de le reconnaître : cette réalité ne peut, généralement parlant, être séparable. Dès lors, quelqu' utile qu'elle soit, la description atomistique des événements ou des micro-objets, n'est évidemment qu'un modèle

En ce qui concerne le problème de la construction d'une axiomatique des propositions de la physique, la conclusion précédente devrait sans doute être insérée dans la liste des exigences préalables. Reconnaissons cependant qu'un calcul général incorporant explicitement cette condition reste pour une part à construire Reconnaissons aussi que,

compte tenu de l'analyse qui précède, ce calcul devrait probablement, pour que sa cohérence interne soit assurée, prendre plutôt la forme d'un calcul des questions [7]

Enfin, l'argument précédent peut d'une certaine manière être inversé. On sait qu'une objection parfois formulée à l'encontre des épistémologies exclusivement fondées sur l'opérationnel se base sur les difficultés qu'elles ont à donner aux propositions concernant le passé un sens qui se réfère vraiment à celui-ci et non pas seulement au présent. Notre analyse dans cet essai précise, croyons-nous, cette objection et en confirme le bien fondé en ce qui concerne toute épistémologie prétendant faire usage de propositions portant sur des événements ou des systèmes élémentaires. Elle montre en d'autres termes que, en ce qui concerne le problème de la séparabilité, de telles épistémologies sont soumises aux mêmes limites que celles qui se réfèrent à une ontologie.

6. Appendice

Bien entendu on n'abordera pas ici au fond la question générale des fondements conceptuels de la physique quantique. C'est là un problème qui exige des développements substantiels et dont, pour notre part, nous avons tenté ailleurs l'examen [9,20]; mais étant donné le titre de ce symposium il n'est certainement pas hors de propos d'élargir quelque peu le débat précédent afin d'étudier la question que voici. Quelles sont les conséquences possibles de notre connaissance - maintenant à peu près certaine - de la non-séparabilité à l'échelle microscopique de quoi que ce soit que l'on puisse nommer réalité extérieure à nous sur les conceptions de la Nature que l'homme de science doit s'ef-

forcer de propager ?

Le problème malheureusement est difficile et ne se réduit pas à une simple question sémantique portant sur la définition - ambiguë comme on sait - du mot "Nature". Objectivement nous avons tous ici sans doute bien conscience de nous trouver maintenant devant une situation rendue délicate par des faits précis, et dont les éléments sont, dans les grandes lignes, les suivants. D'un côté nous constatons que les progrès de l'astrophysique et de la biologie permettent d'expliquer de plus en plus de faits (et à la limite, se demande-t-on, pourquoi pas tous ?) au moyen des lois de la physique, ce qui est en somme la réalisation tardive mais concrète de la vieille espérance des scientistes de la fin du XIXème siècle. En outre, il apparaît que l'un des outils fondamentaux de ce mode d'explication est certes la physique quantique, mais appliquée de façon indirecte pour la détermination de certaines constantes utilisées ensuite dans des calculs classiques[19]. Ceci permet de conserver la convention pluraliste ou pour mieux dire, multitudiniste, convention selon laquelle la réalité ultime - entendons : ce qui est - serait finalement constituée, pour l'essentiel, par un nombre immense d'évènements élémentaires et/ou d'objets microscopiques doués de propriétés simples et dont les interactions locales et causales, aidées par le jeu du hasard, conduisent à des combinaisons donnant naissance à la complexité des apparences *. Cette manière de voir est commode. Aussi une description de cette espèce, éventuellement plus élaborée que celle ci-dessus décrite, est-elle pratiquement toujours

---

* Il est bon de dire "multitudiniste" plutôt qu' "atomiste" car il s'est trouvé des philosophes (p.ex. B. Russell à une certaine époque) pour édifier des théories multitudinistes dont les éléments étaient non des corps physiques mais des sensations.

utilisée. Mais, dès lors, il devient extrêmement tentant de l'ériger en absolu, autrement dit de faire choix de ce que nous appellerons la "philosophie multitudiniste de la Nature", métaphysique totalitaire qui consiste à réduire l'ensemble de ce qui est,en nous et hors de nous, aux mécanismes élémentaires qu'on vient de dire. Et en fait le pas qui consiste à passer d'une représentation multitudiniste, considérée comme un modèle, à la philosophie multitudiniste de la Nature est implicitement mais très allégrement franchi (bien que parfois à des réserves mineures près) par un très grand nombre d'hommes de science, soit qu'ils agissent ainsi en toute naïveté, soit que les impresionne l'argument de fécondité. Mais d'un autre côté nous savons bien depuis l'avènement de la mécanique quantique que ce genre de réalisme non critique se heurte rapidement à d'immenses difficultés.Nous savons en particulier que la séparabilité au sens de la revendication d' Einstein (cf. section 4) n'y est généralement pas supposable pour des systèmes ayant interagi. Certes, jusqu'à maintenant une échappatoire existait (variables cachées) qui conférait un reste de justification rationnelle à des philosophies de cette espèce. Toutefois, avec la violation des inégalités de Bell, même cette possibilité s évanouit Les partisans d'une telle conception devront donc modifier leur attitude. Ils devront, en fait. reconnaître que malgré ses succès immenses (en plysique classique, en biologie moléculaire, etc...) le modèle multitudiniste est tout à fait inapte à être érigé en philosophie naturelle.

Cette évolution nous rappelle avec force (la chose était connue mais un peu oubliée) l'existence d'un état de fait : dans une conception réaliste véritablement cohérente - où le Réel s'identifie à ce qui est, indépendamment de nos facultés et de leurs limites - la fécondité d un modèle n'est pas un garant suffisant de l adéquation au Réel de l'idée qui en est la base. E le

ne peut même permettre de le présumer valable à ce titre en tant, simplement, qu'approximation*. Et de ce point de vue, le contenu des sections précédentes ne fait que confirmer une nouvelle fois cette restriction fondamentale, par l'exemple et par une méthode qui vise principalement à dégager le raisonnement de tout formalisme mathématique particulier.

Certes ce serait une grave erreur que de tirer argument de ceci pour vouloir réduire à une boucle fermée, à un aller-retour sans conséquences (au moins du point de vue de la connaissance authentique) ce qui, en réalité, est un mouvement en spirale. La recherche scientifique a fait découvrir aux hommes la vraie rigueur de la pensée. Par la voie de cette rigueur elle leur a appris à dépasser l'infantilisme et l'à-peu-près dans la construction des concepts et dans l'usage général des opérations de l'esprit. La contribution de la science fondamentale au processus de maturation de l'intelligence est ainsi un acquis qu'il n'est pas question de nier. Et en particulier, quelque brumeuse qu'elle soit encore, notre nouvelle connaissance de la non-séparabilité du Réel - de quoi que l'on puisse, à l'échelle microscopique, se représenter sous ce nom - dépasse de beaucoup en subtilité ce que pouvait être l'intuition de celle-ci par un penseur du XVIIème siècle par exemple. Mais d'un autre côté, et, précisément, compte tenu des nouvelles connaissances de cette espèce, ce serait manifestement une non moins grave erreur et une grande naïveté que d'ignorer les avatars des progrès en question. Parti d'une culture qui avait reçu en héritage la vision d'une profonde unité du Réel (le "Grand Rationalisme" selon l'expression de Merleau-Ponty)

---

* Cet état de fait peut paraître triste. Mais la tristesse n'est pas une objection scientifique! "Il n'y a pas de preuve par l'horrible", ainsi que l'a noté Ferdinand Alquié dans un contexte différent.

le mouvement scientifique s'est vu peu à peu conduit par les faits à accorder créance, ou en tout cas à populariser, la conception multitudiniste. Au point que, encore une fois, implicitement ou explicitement, beaucoup d'hommes de science et d'enseignants scientifiques la font, dans leur esprit, passer - souvent, simplement par manque d'information - du rang de modèle fécond à celui de véritable compréhension universelle présumée de quoi que ce soit qui puisse mériter le nom d'être. Or voici que malgré l'extraordinaire fécondité du modèle en question la conception correspondante du réel s'avère fausse et contredite par l'expérience(pourvu seulement que soient vraies certaines hypothèses techniques
hautement vraisemblables et dont le besoin même pourra bientôt être écarté).Il n'est pas douteux que ceci ne marque une évolution, un "tournant" décisif - bien que s'étendant sur une durée appréciable - dans ce que, à quelque point de vue "<u>réaliste</u>" que l'on se place, on peut appeler "compréhension" ou "connaissance" du "monde réel". Un tournant qui nous ramène nécessairement -dès que nous refusons toute réduction tacite à l'homme - à une conception dans laquelle le caractère "un" de l'être ne peut pas être négligé. Si l'idée d'une Nature en soi possède un sens - ce qui est bien loin d'être admis par tous' - cette Nature est profondément une totalité dans la complexité de laquelle <u>notre</u> vision découpe des parts, d'une manière qui reflète surtout les possibilités de <u>notre</u> action. Comme le Dieu de Pascal - dont elle n'a pas nécessairement tous les autres traits' - et plus même, à tout prendre, que le Dieu de Spinoza, cette "Nature naturante" - pour parler comme les scholastiques - se trouve par là très admirablement <u>cachée</u>,loin derrière les nuages de notre pensée appliquée.

Que la majorité des hommes de science semblent continuer au contrai-

re à adhérer, je ne dis pas à des points de vue néopositivistes ou "purement linguistiques" [9] (qui ont en leur faveur tels ou tels arguments de fond) mais à une philosophie naïvement réaliste du type multitudiniste, est déconcertant mais n'est sans doute pas inquiétant en ce qui concerne la recherche. En science comme en art (qu'on pense à Fra Angelico!) il est des naïvetés qui sont fécondes et qui, par là même, s'élèvent en quelque sorte au dessus du genre des naïvetés pures et simples. Comme l'a noté Wigner [19] celles de la famille de la conception ici discutée sont sans doute dans ce cas et elles le resteront vraisemblablement le temps d'une génération ou même plus. En revanche cette conservation d'une vision malgré tout trop simpliste me paraît très dangereuse sur le plan culturel. A notre époque, de grands efforts sont faits, partiellement couronnés de succès, pour répandre, par l'enseignement, les connaissances et un certain point de vue scientifique dans de très vastes couches de la population. Le but visé, certes, est avant tout technologique. Mais on peut difficilement attendre de la majorité des enseignés qu'ils sachent faire spontanément, surtout si leur attention n'est pas attirée sur ce point, les distinctions que nous savons être nécessaires entre néopositivisme et réalisme ou - au sein de ce dernier - entre le modèle et le vrai. Il y a ainsi lieu de craindre que, dans la pratique, l'enseignement de masse des sciences exactes ne compromette sérieusement ces dernières avec la philosophie multitudiniste la plus naïve et tout ce qui va avec elle.

Or cette philosophie a deux défauts graves. L'un d'eux est qu'elle est si peu attrayante, si contraire à la vision que l'homme se forme, par sensibilité ou par méditation, de quantité d'aspects de l'être, que, de plus en plus, elle est spontanément mise en question et tenue pour artificielle. Bien plus qu'au "goût de la facilité" c'est à mon sens à un phé-

nomène de cette espèce, à la demande donc d'une culture qui soit enrichissante et authentique qu'il faut attribuer la désaffection croissante des jeunes gens pour les études en sciences exactes, qui leur paraissent ne rien fournir de tel. Et il serait certes bien fâcheux que la science continue à être entraînée dans un discrédit qui vise en fait une philosophie.

L'autre défaut - rédhibitoire celui-ci ! - de la pensée multitudiniste naïve prise vraiment comme philosophie, c'est-à-dire comme représentation d'un Réel supposé antérieur à l'homme, est tout simplement qu'elle est fausse - irrémédiablement nous l'avons vu - car quel que soit le formalisme elle est contredite par l'expérience à des réserves près qui - n'en doutons pas - seront prochaînement levées. Or il n'y a pas d'arguments même pas ceux fondés sur la fécondité, qui puissent justifier une action aussi grave que la dissémination consciente d'une erreur, fût-elle qualifiée de "simple erreur philosophique", dès lors que sa nature d'erreur a été vraiment reconnue Qui peut dire quelles éclosions culturelles risquent d'être réprimées, dans tous les ordres, de ce fait ?

Cette dissémination qui s'annonce, hélas, elle est tellement inscrite dans la nature des choses - connaissances trop fragmentaires des enseignants, dédain du spécialiste pour l'idée générale, etc... - que, en pratique, c'est sans doute la désaffection croissante pour l'étude des sciences exactes qui - de manière bien trop négative - en limitera le plus sûrement la nocivité. Cependant des mesures positives pourraient être prises. La toute première serait évidemment la reconnaissance par la majorité des hommes de science du danger qui existe de voir la science propager implicitement, par omission en quelque sorte, des thèses

psuodo-philosophiques reconnues désormais comme naïves et fausses, et entièrement contraires à son esprit réel. La seconde serait sans doute un effort à entreprendre auprès des écrivains et commentateurs scientifiques, pour qu'ils sensibilisent l'opinion à l'existence du problème en le présentant comme ce qu'il est, c'est-à-dire relatif au climat de la vie dans ce qu'il a de plus profond : non au milieu technique mais aux images intérieures que chacun peut se faire de l'être et de ses rapports avec lui. C'est ensuite seulement que pourrait être envisagée l'insertion, à une étape convenable de l'enseignement scientifique, d'études d'épistémologie moderne portant sur les questions, réellement fondamentales aujourd'hui, de la compréhension et de la signification des sciences exactes. Un tel programme, naturellement, n'est qu'une ébauche. Mais les besoins auxquels il tente de satisfaire sont bien réels. Souhaitons donc qu'ils soient reconnus sans retard trop considérable.

Encore une fois, en tout ceci, il ne s'agit nullement d'une contestation de l'importance extraordinaire des perspectives ouvertes par la Science, même sur le plan de la pure connaissance. Bien au contraire nous voulons rappeler que, compte tenu par exemple de la violation des inégalités de Bell, ces perspectives vont plus loin que, jusqu'ici, ne le pensaient bien des chercheurs. Manifestement il y aurait, sur le plan théorique une vraie falsification du témoignage de l'expérience et sur le plan pratique un grave danger culturel à laisser se développer dans le public, sous couvert de la Science, des représentations fondamentales qui se trouvent ainsi dépassées, quelle que puisse être leur temporaire fécondité.

7. Remerciements

Un essai tel que celui-ci n'engage évidemment que la responsabilité de l'auteur lui-même. Ceci étant bien précisé, je crois pouvoir céder au plaisir de remercier ici MM. J.S. Bell, J.M. Jauch, C. Piron et A. Shimony pour avoir lu une version préliminaire du présent texte et pour m'avoir fait bénéficier de leurs remarques et suggestions.

REFERENCES

1) G. Birkhoff et J. Von Neumann, Ann. Math. 37 , 823 (1936).

2) J.M. Jauch et C. Piron, Helv. Phys. Acta 36, 827 (1963)

3) C. Piron, Helv. Phys. Acta, 37, 439 (1964).

4) J.M. Jauch, Foundations of Quantum Mechanics, Addison-Wesley Reading, (Mass.) U.S.A.

5) J.M. Jauch et C. Piron, Helv. Phys. Acta, 42, 842 (1969).

6) J.M. Jauch, in Proc. of the IL session of the Enrico Fermi Summer School on Foundations of Quantum Mechanics, Ac. Press, New York, USA

7) G Mackey . Foundations of Quantum Mechanics, Benjamin, New York, U.S.A.

8) C F. Von Weissacker. Naturwiss. 42. 521 (1955).

9) B. d'Espagnat : Conceptual Foundations of Quantum Mechanics, Benjamin, Addison-Wesley, Reading (Mass.) U.S.A.

10) A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935).

11) J.S. Bell, Physics, 1 , 195 (1964).

12) J.F. Clauser, M A. Horne, A.Shimony et R A. Holt, Phys. Rev. Letters, 23, 880 (1969).

13) L.R. Kasday in Foundations of Quantum Mechanics (Ac. Press, New York) USA

14) S.J. Freedman et J.F. Clauser, Phys. Rev. Letters, 28, 938 (1972).

15) E. Wigner, Am. Journ. of Physics, 38, 1005 (1970).

16) A. Einstein, Philosopher Scientist (P.A. Shilp, Ed., Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois).

17) D. Bohm, Phys. Rev. 85, 166 et 180 (1952).

18) J.S. Bell, Proceedings of the 1971 Penn. State Conference (to be published).

19) E. Wigner . Symmetries and Reflections Indiana U Press Bloomington and London.

20) B. d'Espagnat, Conceptions de la Physique contemporaine, Hermann, Paris.