

La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique

MICHEL PATY*

Résumé — Les développements récents relatifs aux corrélations quantiques à distance et à la notion de non-séparabilité locale ont donné une nouvelle actualité à un débat épistémologique sur le sens et l'interprétation de la mécanique quantique, qui en vérité n'avait jamais été conclu. On montre, dans cet article, comment la véritable portée de ce débat (symbolisé par les noms de Bohr et d'Einstein) concerne le rapport de la théorie à son objet. L'inséparabilité quantique est acceptée désormais comme un *fait* physique; on indique de quelle façon, et on éclaire la démarche qui a fait passer d'une problématique sur le déterminisme à une problématique sur la localité. On s'interroge ensuite sur ce qu'est la non-localité en physique quantique, et son irréductibilité à toute causalité locale. On reprend enfin le problème de la complétude de la théorie quantique, montrant que ce n'est pas la non-localité qui la met éventuellement en cause, mais le problème de la mesure.

Summary — The recent developments about distant quantum correlations related to the concept of local non-separability have called back to the forefront the epistemological debate on the significance and interpretation of quantum mechanics; this debate, actually, had never been concluded. We show, in this article, how the deep concerns of the debate (which is symbolized by the names of Bohr and Einstein) are the relationship between the physical theory and its object. Quantum non-separability is accepted henceforth as a physical *fact*; we show in which sense, and we establish how it has proceeded from a concern about determinism to a concern on locality. We question next the meaning of non-locality in quantum physics and emphasize its irreductibility to any local causality. Finally, we return to the problem of the completeness of quantum theory, and show that it is not non-locality that eventually puts doubts on it, but the question of measurement.

1. RENOUVEAU DU DEBAT QUANTIQUE?

1.1. L'inséparabilité quantique suscite de nos jours un débat qui n'est pas sans rappeler celui des "heures chaudes" de la constitution de la mécanique quantique, inauguré à l'occasion de la Conférence Solvay de 1927. Pourtant la situation a beaucoup évolué depuis cette époque, bien des problèmes se sont décantés, et certaines formulations de la théorie quantique, alors hasardeuses ou nouvelles, ont acquis depuis le poli de l'usage et la patine du temps. Des difficultés philosophiques qui paraissaient insurmontables se sont peu à peu évanouies, soit qu'elles aient été effectivement surmontées, ou contournées, soit qu'elles aient été simplement oubliées. En bref, la mécanique quantique s'est détachée peu ou prou des circonstances de sa

*C.N.R.S., Equipe REHSEIS (Recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques), Paris.

Adresse postale: 156 Avenue Parmentier, F 75010 Paris.

naissance: non seulement elle a acquis pleinement droit de cité comme théorie physique, mais sans elle la physique contemporaine n'aurait pas eu les développements qu'on lui connaît dans les directions les plus variées: elle est le pilier sûr lequel, pour l'essentiel, cette physique repose. Ainsi les physiciens, qui depuis des décennies s'attachent à ces développements avec des succès considérables, ont-ils longtemps donné l'impression de laisser entendre, par ce travail même, que l'heure n'était plus au débat, mais au mouvement en avant — à l'action. Pour celle-ci, le doute est mal venu; et pourquoi — et, surtout, de quoi — douter, lorsque le formalisme et l'expérimentation fonctionnent aussi admirablement, aboutissant à des prédictions vérifiées par des observations, les deux d'une précision sans égale?

C'est un fait, que pour l'essentiel, les développements de la physique considèrent comme acquis et bien établi le formalisme de la théorie quantique que rien, depuis 1927, n'est venu ébranler. Ne serait-il pas, dès lors, raisonnable de penser que le débat épistémologique, naturel lorsqu'il s'agit d'étayer en raison des conceptions nouvelles, n'a plus lieu d'être une fois que ces conceptions ont montré leur bien-fondé par leur efficacité même? Quant à analyser ce bien-fondé, ce serait l'affaire des épistémologues et des philosophes, mais sans portée pratique, et leurs débats seraient désormais marginaux en regard de la physique. Science et philosophie seraient ainsi à nouveau séparées d'une manière rassurante et n'interféreraient plus. A la première l'action et l'efficacité, à la seconde les gloses postérieures et les systèmes de pensée dont la science positive peut — et doit — faire l'économie, du moins dans la période de son fonctionnement "normal" — s'il en est — exclusive des grandes révolutions conceptuelles.

Mais peut-être les choses ne sont-elles pas aussi simples, et la permanence de certaines questions posées à la mécanique quantique et à son "interprétation" témoigne-t-elle d'un noyau non réduit de difficultés ou d'incertitudes. Ces questions retiennent à des degrés il est vrai divers l'attention des uns et des autres; leur énumération et leur formulation même ne font pas l'unanimité. A considérer pourtant la nature des problèmes du champ de rationalité concerné, et à voir les interrogations conceptuelles ou fondamentales que se posent à leur sujet un certain nombre de physiciens — par leurs publications ou leurs commentaires —, trois ordres de questions apparaissent se poser encore à la mécanique quantique: j'entends des questions sur ses fondements et ses interprétations, car, bien entendu, de nombreuses interrogations sont suscitées, d'un point de vue strictement physique, par les élaborations ultérieures, notamment dans la direction de la théorie quantique des champs de jauge unifiés. Mais cette direction prend pour acquis le formalisme de la théorie

quantique, et se pose, pour l'heure, des problèmes d'ordre surtout technique (théoriques).

La première de ces questions fondamentales ou conceptuelles est celle de l'*inséparabilité*, ou *non-séparabilité locale*, des systèmes quantiques. La seconde est celle de la *théorie quantique de la mesure*. La troisième me paraît être celle du rapport entre la mécanique quantique et la relativité. C'est de la première seulement que nous parlerons ici, mais la seconde ne lui est pas étrangère comme on le verra, au point que — me semble-t-il — les éventuelles difficultés à comprendre l'inséparabilité se ramènent à l'absence persistante de clarté sur le problème de la mesure en mécanique quantique. La troisième question, sur les rapports entre la mécanique quantique et la relativité restreinte,¹ est parfois considérée comme résolue dans la mesure où il existe une mécanique quantique relativiste, devenue la théorie quantique des champs, qui repose sur la mécanique quantique d'une part et sur la relativité restreinte d'autre part, et qui, par là-même, les concilie en les rassemblant. Pourtant les fondements conceptuels et les principes de ces deux théories sont très différents, voire sans commune mesure, à tel point que d'autres physiciens, et non des moindres (Dirac par exemple), persistent à s'interroger sur l'hétérogénéité de ces deux théories fondamentales, et à voir en elle la raison de certaines difficultés formelles rencontrées, comme l'apparition de quantités infinies dans le calcul de grandeurs mesurables. Ces difficultés ont, il est vrai, été résolues du point de vue pratique par la mise au point d'une méthode de calcul, la "renormalisation", qui élimine les termes infinis. Si l'efficacité de cette procédure est incontestable, par la précision sans égale des prédictions qu'elle rend possibles, sa signification physique n'est toutefois pas claire: n'est-elle qu'une "recette" mathématique? son caractère artificiel ne serait-il pas dû, justement, au fait que les fondements du formalisme théorique ne sont pas clarifiés? et ne devrait-on pas attendre d'une théorie posée sur des bases différentes à la fois de la mécanique quantique et de la relativité, mais les contenant toutes deux comme des approximations dans des contextes conceptuels différents, qu'elle permette le calcul des grandeurs physiques sans de tels artifices? On n'en dira pas davantage ici sur cette question, mais on voit bien qu'elle n'est peut-être pas, non plus, étrangère à celle sur l'inséparabilité, comme l'usage du terme de non-localité peut déjà le laisser entendre: la relativité restreinte concerne en effet des événements définis localement dans l'espace-temps. Il ne semble pas, cependant, que l'inséparabilité, et par là la mécanique quantique, soit en conflit avec la relativité: ce serait plutôt l'indifférence que le conflit, les deux théories

¹Je laisse ici de côté la question du rapport de la mécanique quantique à la Relativité Générale: elle appartient aux recherches actuelles des physiciens sous la forme de la quantification du champ de gravitation, et dépasse largement les seules considérations épistémologiques, bien que celles-ci ne soient évidemment pas en dehors des problèmes de physique.

traitant d'objets totalement dissemblables, et la question serait alors de savoir si une telle dualité dans l'approche de l'objet physique est satisfaisante. Plusieurs auteurs ont montré que, malgré d'apparents paradoxes, cette dualité n'affecte pas la cohérence interne de l'une et de l'autre de ces théories, notamment dans le cas de l'inséparabilité: ce qui est, sinon la solution, du moins un point important dans le débat.

Nous ne proposons pas autre chose ici que de tenter de clarifier conceptuellement quelques éléments du problème, de situer exactement, dans la mesure du possible, où se posent les véritables questions, d'un point de vue épistémologique, mais non de les effacer. Nous ne voulons pas proposer de nouveau modèle — parmi tant d'autres dans l'abondante littérature sur le sujet — d'interprétation ou de réfutation de l'inséparabilité quantique, mais simplement, prenant acte de celle-ci comme d'un fait — et tout d'abord en indiquant comment et en quoi il s'agit d'un fait, théorique et expérimental —, contribuer à son élucidation rationnelle.

1.2. La question de l'inséparabilité ou de la non-localité des systèmes quantiques a fait couler beaucoup d'encre depuis sa mise au jour en 1935 comme un effet du débat entre Einstein et Bohr — un débat de nature à la fois physique et épistémologique, commencé dès l'instauration de la mécanique quantique comme théorie physique se prétendant accomplie mais suscitant des problèmes d'interprétation. Comme aucun fait nouveau du point de vue physique ne s'était imposé, jusqu'aux travaux de Bell en 1964, ce débat semblait devenu marginal, et plus historique qu'actuel.² Pourtant, la décantation progressive des idées nouvelles de la physique quantique par rapport aux conceptions classiques n'avait en rien atténué la différence des conceptions qui s'opposaient. Conceptions sur l'interprétation qu'il convenait de donner de la mécanique quantique, elles se rapportaient en fin de compte à des considérations philosophiques sur la connaissance du monde physique et sur la nature de ce dernier. Le débat couvait toujours mais à feu très réduit et, insoucieuse de philosophie, la théorie quantique poursuivait son chemin et s'enseignait dans les manuels.

Il est intéressant de noter que, lorsque l'inséparabilité a ressurgi comme un problème, en 1964, à la faveur des inégalités de Bell, puis dans les années suivantes, à propos des expériences de corrélation à distance, cela a été, malgré la décantation, dans des termes assez semblables à ceux du débat entre Bohr et Einstein, sinon dans la formulation exacte, du moins dans la signification des enjeux fondamentaux. Le débat n'avait en fait jamais été conclu: et les formulations de Bohr, qui prétendaient le conclure au nom du bien-fondé de la mécanique quantique, étaient trop imprégnées de sa philosophie particulière pour être universellement acceptables. Le débat sur

²Sur celui-ci, voir en part. Jammer (1974), Bohr (1934, 1949, 1958, 1963), Einstein (1946, 1949, 1969, 1972).

l'inséparabilité de 1935, qui se présente comme le point culminant des discussions qui suivirent la désormais célèbre Conférence Solvay de 1927,³ était de nature à la fois physique et philosophique. De nature physique, parce que l'on y invoquait des expériences de physique (réelles ou simplement pensées) et ce que la théorie exprime à leur sujet. De nature philosophique, parce que ces problèmes étaient exposés en termes de *réalité physique*, ou d'*observation* de cette réalité (fût-ce pour éliminer cette réalité par l'invocation de l'observateur), et de rapport objet-sujet, de sa limite inassignable. Il n'est que de relire les textes de 1935, ces classiques, désormais, de l'histoire de la mécanique quantique, celui d'Einstein, Podolsky et Rosen, et celui de Bohr, pour s'en assurer.⁴ Du point de vue physique, le problème était de savoir si la mécanique quantique était bien cette théorie nouvelle, non-classique, que les uns et les autres avaient recherchée, et dont Einstein avait annoncé le premier la nécessité,⁵ indiquant certains des caractères qu'elle devrait avoir — et notamment celui d'être de formalisation abstraite et quasi axiomatique — passée la phase semi-empirique qui fut longue et marquée de façon décisive par les travaux des mêmes Einstein et Bohr. Mais la réponse à ce problème était en réalité indissociable de la question — proprement philosophique — de la nature et du but d'une théorie physique: s'agit-il d'un système explicatif d'une réalité objective (telle était la conception d'Einstein, lequel mettait l'accent sur le réalisme et l'objectivité, et ne craignait pas de parler d'"éléments de la réalité physique"), ou ne doit-elle que rendre compte de l'observation ou de la mesure, se cantonner à la description de phénomènes dont la réalisation est indissociable de l'intervention d'un observateur (telle était la conception de Bohr, opérationnaliste et substituant à l'objectivité, désormais hors d'atteinte, une intersubjectivité, c'est-à-dire l'accord d'observateurs différents sur des phénomènes préparés dans des conditions identiques)? Entre les deux — entre la physique et la philosophie — se situe, au niveau épistémologique, l'analyse critique des concepts, nécessaire à la formulation même de ces questions: interprétation des relations de Heisenberg, caractère des notions d'espace et de temps, limitation de la notion de trajectoire, signification physique de la fonction d'onde, nature physique des probabilités, portée et caractère des systèmes d'axiomes ou propositions fondamentales de la théorie quantique. Les énoncés par lesquels les uns ou les autres expriment ces analyses ou répondent aux questions plus générales sur la signification et sur la portée de la théorie quantique sont marqués par les positions respectives, de nature philosophique, quant au programme que l'on assigne à la théorie physique et, d'une manière générale, à la connaissance rationnelle.

³*Electrons et photons* 1928; Mehra (1975); Bohr (1961). Une vivante description de la Conférence Solvay de 1927 est donnée dans Chevalley (1984).

⁴Einstein, Podolsky et Rosen (1935), Bohr (1935).

⁵Voir par exemple Pais (1979), Stachel (1986a), Paty (1981, 1983, 1984a, 1986).

1.3. Il était certes naturel que la mécanique quantique émerge dans un contexte où physique et philosophie sont aussi étroitement imbriquées: passé le processus de construction, une théorie aussi nouvelle et en rupture avec les conceptions antérieures s'instaurait malgré tout dans un ancien paysage, classique en ce sens même où il y régnait un certain équilibre entre d'une part l'univers des idées générales et d'autre part la manière de concevoir les théories physiques. C'était le classicisme d'un certain "sens commun" que brutalement la mécanique quantique venait perturber. Comment devait-on (ou, si l'on juge que le problème se trouve aujourd'hui encore posé, comment doit-on) modifier le rapport de la théorie au paysage pour parvenir à un nouvel équilibre, de telle façon que l'on puisse dire que l'on accepte et comprend désormais cette nouvelle théorie?

La solution la plus radicale est évidemment de changer le paysage, en adoptant une nouvelle conception, adaptée à la théorie quantique, de la relation objet-sujet, de la connaissance, de la nature: mais n'est-ce pas proposer une philosophie générale *ad hoc* pour une théorie physique particulière, si puissante soit-elle, et conférer à celle-ci une importance très absolue, quand nous savons, par les enseignements de l'histoire des idées, que les changements de visions du monde ne sont pas provoqués par un seul événement localisé, mais par la convergence d'ébranlements divers d'une tout autre ampleur? Une autre possibilité serait d'établir des ponts entre la théorie considérée et le "paysage" conceptuel et culturel plus général, en "interprétant" la théorie: mais elle présente ce danger de risquer de surajouter à la théorie des éléments extérieurs de signification, c'est-à-dire de l'affirmer incomplète par nature, et donc de minimiser *a priori* sa portée. Un tel risque peut toutefois être évité si l'on se restreint dans l'acception du terme "interprétation", en accordant à la théorie qu'elle porte par elle-même la signification de ses propositions.⁶ Si la théorie est correcte, c'est-à-dire suffisamment fondée, dénuée de contradictions, donc cohérente, et efficace à reproduire et prédire les phénomènes observables, c'est alors à une évaluation de ses propositions et à une analyse critique de ses concepts que nous sommes conviés. Ce programme est plus modeste que les bouleversements philosophiques périodiquement proposés, mais il n'exclut pas que nos considérations sur la physique ne puissent participer, dans un mouvement plus ample et plus profond, à un tel bouleversement, au cas où celui-ci viendrait à s'imposer; il paraît davantage susceptible de respecter les exigences de la physique et de la philosophie, sans les asservir l'une à l'autre et sans ignorer leurs liens.

1.4. Le débat quantique soulevé à propos de l'inséparabilité a ceci de particulièrement remarquable que non seulement il semble possible de

⁶Sur la définition du "programme épistémologique" correspondant à cette position du problème, voir Paty (1982b).

l'envisager dans ces termes, mais que son évolution même paraît nous le prescrire. L'évolution historique du problème de la non-séparation locale des systèmes quantiques, depuis l'argument EPR et la réplique de Bohr, en passant par la reformulation qu'en a donné David Bohm en 1951,⁷ jusqu'à l'énoncé du théorème et des inégalités de Bell en 1964⁸ et à la réalisation des expériences de corrélation à distance⁹ montre, comme je l'ai esquissé ailleurs,¹⁰ le développement d'une problématique à deux foyers, l'un physique, l'autre philosophique, indistincts au début mais désormais nettement séparés. Je la résume en quelques mots, réservant la suite de l'exposé non pas tant à la perspective historique qu'à l'examen de la notion de non-séparabilité locale ou non-localité.

En proposant l'idée de corrélation (classique) à distance dans la considération de systèmes quantiques ayant interagi dans le passé (une molécule se scindant en deux atomes), Einstein, Podolsky et Rosen fournissaient une première clé pour dégager la définition des systèmes quantiques d'une philosophie de l'observation qui rendait compte de l'existence de grandeurs physiques incompatibles (ou, de manière équivalente, des inégalités de Heisenberg) par la perturbation engendrée par l'acte de mesure. Telle est la première étape d'une clarification quant à la nature, physique ou philosophique, d'un problème relatif à un état de fait: en mobilisant cette idée de corrélation, Einstein et ses collaborateurs proposaient un moyen non opérationnaliste de considérer une quantité physique et sa détermination possible (la corrélation classique en question résulte de la conservation de l'impulsion totale).¹¹ Il faut toutefois remarquer que cette idée de corrélation était difficile à extraire de son conditionnement (dans le même sens où l'on parle de conditionnement d'un produit, c'est-à-dire son emballage) classique, celui-ci comportant la double exigence de réalisme et de localité, considérée comme norme universelle de la description des systèmes (à ce titre, elle est indissociablement de nature à la fois physique et philosophique): c'est au regard de cette norme que la mécanique quantique leur paraissait incomplète, puisqu'elle ne décrit pas avec certitude (mais seulement en termes de probabilité)¹² les "éléments de réalité" que l'on

⁷Bohm (1951).

⁸Bell (1964). L'article de Bell sur le caractère limité des preuves antérieures d'incompatibilité entre la mécanique quantique et les théories rétablissant un déterminisme classique (théories dites "à variables cachées"), bien que publié en 1966 (Bell, 1966), fut écrit antérieurement: sur ce point d'histoire, voir Jammer (1974).

⁹Pour des revues de ces expériences, voir Paty (1974, 1977), Clauser Shimony (1978), Aspect (1981a); pour les résultats plus récents des expériences d'Aspect, voir Aspect (1981b, 1982a,b, 1983a,b).

¹⁰Paty (1982a).

¹¹Pour un exposé simple de la corrélation EPR et des expériences de corrélation quantique à distance, voir Paty (1981b). Pour une analyse critique de la conception qui rapporte les inégalités de Heisenberg à la perturbation due à un deuxième système quantique, voir Brown et Redhead (1981).

¹²C'est moi qui rajoute l'incidente entre parenthèses, car c'est ici, bien entendu que se situe la grande différence entre la physique classique et la physique quantique, indépendamment de toute philosophie générale sur la connaissance et sur la réalité.

peut recenser, c'est-à-dire ce qui est décrit par les grandeurs physiques. La réponse de Bohr est elle-même une imbrication de deux idées entremêlées: l'inséparabilité des sous-systèmes qui en ont constitué un seul à l'instant initial, et l'approche operationaliste. A question physico-philosophique, réponse de même nature. On ne dépassait d'ailleurs pas le cadre d'une expérience de pensée, laquelle ne veut — et ne peut — que tester la cohérence des propositions et en expliciter les implications. Le pas suivant fut effectué par Bell, proposant un critère *physique*, celui de localité (il s'agit de l'indépendance effective des sous-systèmes une fois qu'ils se sont éloignés l'un de l'autre à une certaine distance). L'explicitation de ce critère permet de prolonger l'expérience de pensée en la rendant prédictive et offre ainsi la possibilité de départager deux approches théoriques: celle de la mécanique quantique, qui parle d'inséparabilité des sous-systèmes, et celle de la séparation locale qui permettrait de restaurer une causalité classique où des événements localisés différemment dans l'espace-temps sont, en l'absence d'interaction causale au sens de la relativité,¹³ indépendants. Dès lors que l'expérience est appelée à trancher, le problème est de nature essentiellement physique, et l'inséparabilité est susceptible de se présenter comme un fait, indépendamment de toute théorie de la connaissance (du moins au même titre que les autres faits). On peut, certes, réfuter un fait, si l'on considère qu'un fait expérimental est un complexe d'autres faits et de théories nécessaires à leur expression, tout en soulignant par ailleurs que les théories même que ce fait est supposé tester ne sont pas séparables en propositions isolées.¹⁴ Mais ceci appartient déjà au cadre général de l'interprétation et de la discussion sur la théorie, sur sa structure et son objet: c'est bien à ce niveau que se situe désormais le débat épistémologique et philosophique au sujet de l'inséparabilité.

2. L'INSEPARABILITE DANS LE FORMALISME ET DANS L'EXPERIENCE

2.1. Ce qui constitue l'inséparabilité comme un *fait*, une propriété physique des systèmes quantiques, c'est son inscription dans le formalisme corroborée par l'expérience. Sans vouloir retracer l'évolution de cette question du point de vue historique, notons que cette évolution, en même temps qu'elle voyait se préciser l'aspect physique du problème de l'inséparabilité jusqu'à son accès à des tests effectifs, amenait à expliciter de manière de plus en plus nette l'idée de "corrélations à distance" mise en avant dans l'argumentation EPR, en établissant la nature de sa différence dans le cas classique et dans le cas quantique. C'est sur cette différence qu'avaient bien mis le doigt les auteurs de l'argument, bien qu'ils aient en

¹³Par "interaction causale au sens de la relativité" (restreinte), on entend une interaction physique propagée à une vitesse au plus égale à celle de la lumière.

¹⁴Ces thèses duhémienne (Duhem, 1906) me semblent suffisamment fondées pour être acceptées ici, bien que ma position soit, au contraire de Duhem, celle du réalisme *physique*.

vérité tenté d'en effacer la radicalité, en voulant y voir la simple manifestation d'une incomplétude.

La corrélation classique à distance est aisée à comprendre: deux parties d'un système qui se séparent gardent quelque chose de leur commune appartenance; en physique mathématisée, cela s'exprime en termes de loi de conservation d'une quantité physique exactement définie: deux sous-systèmes se sont répartis l'énergie initiale (une quantité scalaire), ou l'impulsion (une quantité vectorielle, conservée selon les trois axes de coordonnées), ou le moment angulaire (de même, mais en mécanique quantique cette grandeur ne prend que des valeurs discrètes). Si la situation dans ce cas est simple, c'est que les grandeurs physiques considérées sont toujours affectées exactement d'une valeur donnée, que nous procure leur observation (leur mesure).

Dans le cas quantique la situation est différente, et cette différence provient, dans la théorie, de ce que les quantités qui représentent les grandeurs physiques ne sont pas des nombres ou des fonctions ordinaires (c'est-à-dire encore des nombres) mais des opérateurs (différentiels, matriciels, etc. . .) appliqués aux vecteurs d'état représentatifs des systèmes. Pour passer à la détermination des quantités qui leur sont affectées, susceptibles d'apparaître comme résultats de mesures, on doit faire un détour par la signification physique de ces vecteurs d'état et par les caractéristiques de ces opérateurs. La signification physique des vecteurs d'état s'exprime en termes de probabilités;¹⁵ la caractéristique des opérateurs est d'être soumis à des relations de commutation, par exemple $A \cdot B - B \cdot A = i\hbar \neq 0$, c'est-à-dire que leur ordre respectif n'est pas indifférent au résultat obtenu. [B appliqué à la fonction d'onde, $(B \psi)$, puis A appliqué à $(B \psi)$, c'est-à-dire $(A B) \psi$ ne fournit pas le même résultat que l'application dans le sens permuté, $(B A) \psi$.] Des opérateurs qui ne commutent pas ne peuvent être associés à des quantités simultanément et exactement déterminées, mais à des distributions spectrales dont chaque composante est affectée d'une certaine fréquence. Si l'un des opérateurs correspond à une quantité qui se trouve être exactement définie (par une seule valeur, de façon certaine), l'autre correspond à une quantité totalement indéterminée. Tel est, par exemple, le cas des trois composantes du spin (ou moment angulaire intrinsèque) d'une particule, qui ne commutent pas entre elles.¹⁶

Considérons une particule de spin nul se scindant en deux particules (par exemple des électrons) de spin $1/2\hbar$;¹⁷ la conservation du spin entraîne que

¹⁵Par exemple la probabilité de présence d'un électron de fonction d'onde $e(x)$ dans le volume V est donnée par $P_V = \int_V e^*(x) \cdot e(x) dx$. La valeur moyenne attendue d'un opérateur A est donnée par $\int \psi^* A \psi dx$.

¹⁶ $[J_x, J_y] = i\hbar J_z$ et relations analogues pour les autres couples deux à deux.

¹⁷Le spin s'exprime par un nombre entier ou demi-entier en unités de \hbar ($\hbar =$ constante de Planck, $\hbar = h/2\pi$).

pour chacune des composantes du spin des deux électrons l'on a J_x (du premier électron) = $-J_x$ (du deuxième électron), et de même pour les autres composantes sur les axes Oy et Oz . Il y a bien conservation, mais la corrélation prend une forme différente du cas classique puisque l'on ne peut pas déterminer ensemble des composantes différentes d'un même spin. Sans poursuivre dans l'exposé de l'argumentation de type EPR,¹⁸ contentons-nous de noter la raison, ou l'origine, de la spécificité des corrélations quantiques à ce niveau: elle réside dans la définition probabiliste de la fonction d'onde, dans la non-commutation d'opérateurs représentant des grandeurs physiques, dans le choix opéré par l'acte de mesure de l'une des composantes du spin (si nous considérons ce cas) à l'exclusion des autres, cette transition brutale supposée par le formalisme et dénommée "réduction du paquet d'onde". Ce sont, en somme, les propositions fondamentales (les axiomes) de la mécanique quantique qui font toute la différence. Or c'est bien elles que visaient les auteurs de l'argument EPR en confrontant les conséquences de ces propositions aux exigences du "réalisme local" qui équivalent à revendiquer des corrélations de type classique: pour ces auteurs, l'imprédictibilité de la théorie quantique pour des grandeurs pourtant corrélées (donc pouvant être prédites) signalait le caractère incomplet de cette théorie. Telle était la fonction de l'expérience de pensée qu'ils décrivaient: interroger la portée des propositions fondamentales de la théorie quantique; mais cette interrogation était menée de l'extérieur, puisque le critère (celui du réalisme local) était étranger à ces propositions, et ne pouvait donc être probant aux yeux de qui prétendait s'en tenir à celles-ci. Du moins est-ce ainsi que nous pouvons traduire en des termes plus actuels — sinon plus clairs — le côté pertinent de la réponse de Bohr, qui a rendu celle-ci acceptable aux physiciens, lesquels privilégient volontiers l'économie dans les raisonnements, indépendamment des considérations philosophiques (et, du point de vue de la physique, on ne saurait les en blâmer).

La réponse de Bohr faisait état de l'inséparabilité des sous-systèmes issus d'un système quantique initialement défini, et cette inséparabilité exprime le caractère quantique de la corrélation invoquée. Au regard de celle-ci, la corrélation classique est assez légère: en effet, malgré la relation entre les grandeurs qui les caractérisent, résultant d'une loi de conservation, les deux sous-systèmes d'un système classique sont totalement séparables: une modification de l'un d'entre eux n'a aucun effet sur l'autre dès lors qu'ils se sont éloignés (séparation locale), comme l'image de deux boules de billard, un instant réunies puis chacune poursuivant indépendamment sa trajectoire, nous en assure. Si l'on sait bien décrire en de tels termes simples la corrélation classique et sa limitation, qui est la séparabilité locale, il n'en

¹⁸Elle est expliquée par exemple dans Jammer (1974, 1980), Brown (1981).

va pas de même de la corrélation quantique, en raison de la difficulté à décrire simplement, par des mots ordinaires, la définition de grandeurs physiques en termes de spectres et de fréquence: on ne peut éviter que cette description soit tributaire d'un système de pensée qui la traduise en termes plus proches de l'intuition. La corrélation quantique, en ces termes intuitifs, est souvent considérée comme le contre-pied exact de la situation classique: elle exprimerait la modification (instantanée) de l'un des sous-systèmes comme effet d'une modification subie par l'autre malgré l'éloignement. Mais ceci est une traduction.

2.2. A strictement parler, la corrélation quantique n'est pas autre chose que ce que nous en dit le formalisme de la théorie quantique: elle est décrite par la mécanique quantique et découle directement de ses propositions fondamentales. Elle est, précisément, l'*inséparabilité* du vecteur d'état (ou fonction d'onde) représentatif de l'ensemble du système par rapport aux vecteurs d'état représentant les sous-systèmes. Un minimum de formalisme le fera voir clairement. Soit un système initial de spin nul, se transformant en deux électrons dans l'état final, dont les vecteurs d'état sont respectivement u et v . Le spin total (quantité conservée) étant nul, les électrons ont leurs spins opposés, et les couples d'états correspondants sont représentés par (u_+, v_-) ou par (u_-, v_+) , suivant que les spins respectifs sont orientés, suivant une direction choisie (l'axe Oz), dans un sens ou dans l'autre (selon une notation évidente). La mécanique quantique nous permet d'énoncer que le système global, dont le spin total est nul (comme le sont donc également ses trois composantes sur les axes de référence) en raison des conditions initiales, se trouve dans l'état dit "singlet" ($J = 0, J_z = 0$), décrit par le vecteur d'état $\psi_0 = 1/\sqrt{2}(u_+v_- - u_-v_+)$. Elle nous assure également que les sous-systèmes pris séparément (qui seraient toujours reliés par l'appariement de leurs spins opposés, et qui se présenteraient donc comme des couples u_+v_- et u_-v_+), ne peuvent être des "états propres", c'est-à-dire correspondre à des quantités définies.¹⁹ Pour obtenir des états propres u_+v_- et u_-v_+ , il faudrait oublier la condition initiale qui nous imposait un état singlet ($J = 0$) et, tout en assurant la conservation du spin ($J_z = 0$, dans la direction choisie), faire intervenir une composante de l'état "triplet" ($J = 1, J_z = 0$), dont le vecteur d'état s'écrit $\psi_1 = 1/\sqrt{2}(u_+u_- + u_-u_+)$, de telle sorte que: $u_+u_- = 1/\sqrt{2}(\psi_0 + \psi_1)$, et $u_-u_+ = -1/\sqrt{2}(\psi_0 - \psi_1)$.²⁰ Pour tout état u ou v admettant une valeur définie de son

¹⁹Les "états propres" sont ceux, solutions de l'équation d'onde appelée encore "équation aux valeurs propres", qui correspondent à des grandeurs physiques définies. Si u et v sont des particules séparées, leurs vecteurs d'état reproduisant la même configuration de spin sur la direction du mouvement constituent, pris ensemble, les mélanges suivants: soit u_+v_- , soit u_-v_+ , chacun avec la probabilité 1/2. Pour toute cette description, voir Bohm (1951), pp. 611-623.

²⁰Ce qui fait la différence, au point de vue du calcul, entre des états u_+v_- ou u_-v_+ selon qu'ils sont non séparés dans l'expression de ψ_0 ou au contraire séparés (et exprimés en fonction de ψ_0 et ψ_1), c'est qu'ils correspondent à des prédictions différentes des composantes de spin sur les autres axes, J_x et J_y (la condition initiale impose que le spin total selon l'axe Oz soit nul).

spin j_z (u_{\pm} et v_{\mp} , et donc $u_{\pm}v_{\mp}$ et $u_{\mp}v_{\pm}$, étant alors des états propres, considérés séparément), le moment angulaire total doit être indéfini (ψ_0 et ψ_1 n'étant plus alors des états propres); et, vice-versa, si le spin total est défini (ψ_0 et ψ_1 sont des états propres), aucun des électrons représentés par u et v ne peut avoir une valeur définie de spin.

Telle est, selon le formalisme de la mécanique quantique, la manifestation élémentaire de l'inséparabilité du système en ses deux sous-systèmes constituants. A moins de modifier les conditions initiales (ce qui est impossible de manière causale), on ne peut séparer les fonctions d'onde des sous-systèmes pour en faire des états propres indépendants — si du moins l'on s'en tient à la stricte détermination des systèmes par la mécanique quantique. Lorsque l'un des électrons est soumis à une mesure déterminant l'état de spin dans lequel il se trouve, cela correspond à un changement des conditions initiales (donc, à un changement du problème), puisque c'est le spin de l'électron mesuré qui est désormais exactement défini. Remarquons que l'inséparabilité était contenue dans les propositions du formalisme théorique dès l'origine de celui-ci et que la discussion entre Einstein, Podolsky, Rosen et Bohr a eu pour effet de l'explicitier alors qu'elle était restée inaperçue. Elle apparaît comme une propriété des systèmes quantiques dans la mesure où ces systèmes sont décrits par la mécanique quantique.²¹ A ce stade de l'argumentation, cette propriété était optionnelle: requise par la théorie, était-elle cependant une propriété effective des systèmes physiques? Il demeurerait possible d'envisager une modification de la théorie qui l'éliminerait. Cela, et la question plus générale du déterminisme causal, mis en défaut par la mécanique quantique, laissa ouvert le débat. Il ne s'était agi, à tout prendre, jusqu'ici, que d'expériences de pensée. Quel critère permettrait de tester la théorie quantique non plus dans la cohérence de ses propositions, ou dans l'énoncé de ses conséquences non-classiques, mais par rapport à une classe de phénomènes relatifs à cette propriété?

2.3. L'inséparabilité, telle qu'elle ressort de considérations comme les précédentes, historiquement situées, s'inscrivait à l'intérieur de la question du déterminisme en mécanique quantique, c'est-à-dire de celle de la définition exacte et simultanée des grandeurs physiques fondamentales qui caractérisent les systèmes. Du moins est-ce sous cette formulation que furent proposés des modèles théoriques visant à restaurer le déterminisme. Que la question du déterminisme puisse être exprimée sous une autre forme, celle d'une discussion d'abord épistémologique, comme certains physiciens l'avaient proposé dès la même époque²² — et comme il est toujours loisible de le penser — cette considération n'appartient pas

²¹J'ai souligné ailleurs qu'en l'exprimant — selon ses vues épistémologiques — en termes d'approche de ces systèmes et non de propriété, Bohr aboutissait en fait à en affaiblir la portée (Paty, 1982a, 1986).

²²Voir par exemple Langevin (1934).

directement au contexte que nous évoquons ici, mais elle se trouve réactivée au terme du parcours qui mène à l'inséparabilité comme un fait. Par *déterminisme*, récusé par la mécanique quantique comme les relations d'"indétermination" de Heisenberg le manifestent, les physiciens entendent généralement — c'est dans ce sens qu'il faut le lire, même dans les publications récentes — la possibilité de décrire les systèmes d'une façon qui ne soit pas seulement probabiliste. Mais le mot comporte davantage que cette considération par ses résonances philosophiques, et bien des confusions sont entretenues sous l'évocation de l'indéterminisme foncier de la mécanique quantique: contentons-nous de le signaler, sans développer ici une analyse critique de la catégorie du déterminisme en physique, par ailleurs excessivement importante.²³ C'est donc en termes de "restauration du déterminisme", entendu dans ce sens, que des descriptions alternatives des microsystemes ont été proposées, pour l'essentiel dans la direction de l'addition de variables, absentes dans la mécanique quantique stricte, qui concourraient avec les autres paramètres physiques, par exemple dynamiques, à la description effective des systèmes: la théorie de l'onde-pilote de de Broglie, proposée dès 1926–27,²⁴ constitue la première forme de telles "variables supplémentaires cachées", reprises par la suite en des modèles variés.²⁵ La question de savoir si ce déterminisme causal est ou non compatible avec la mécanique quantique (si oui, celle-ci serait une théorie statistique fournissant des moyennes sur des processus sous-jacents plus fins) s'est vue périodiquement reprise, depuis la "preuve d'incompatibilité" de von Neumann,²⁶ qui n'était en fait que relative à une classe restreinte de telles variables, jusqu'aux résultats de Bell,²⁷ selon lesquels c'est en fait la classe entière des variables supplémentaires cachées "locales" qui se trouve incompatible avec la mécanique quantique.

D'une certaine manière, la préoccupation de restaurer le déterminisme causal avait occulté le problème de la non-localité en soi: il est vrai que le modèle de de Broglie de 1926–27 et la preuve de von Neumann de 1932 furent élaborés avant l'argument EPR. Il semble toutefois qu'Einstein lui-même n'était pas tant préoccupé par le souci déterministe au sens précité que par les difficultés du réalisme local;²⁸ et en élaborant en 1952 son

²³Voir Paty (1986) et les références citées.

²⁴De Broglie (1926, 1927, 1928).

²⁵Bohm (1952), puis de nombreux auteurs: pour une revue, voir Belinfante (1973).

²⁶Von Neumann (1932).

²⁷Bell (1966, 1964).

²⁸La question de savoir si Einstein fut ou non un partisan des modèles à variables cachées est encore en débat (Jammer, 1974; Bell, 1976a). A mon sens, il en admettait la possibilité, mais ce n'était pas le type d'approche qu'il privilégiait. L'argument EPR est de portée plus générale et il n'y est pas fait mention de paramètres supplémentaires pour compenser l'"incomplétude". Mais, évidemment l'argument d'incomplétude avancé par EPR était d'une importance majeure pour les promoteurs de théories à variables cachées. C'est dans la direction d'un bouleversement beaucoup plus profond des fondements même de la théorie qu'Einstein voyait la solution de ce qu'il considérait être les difficultés de la mécanique quantique.

modèle de variables cachées qui eut pour effet de réactiver cette problématique, Bohm admettait que de telles variables pourraient être déterministes tout en étant non-locales.²⁹ Mais, d'une manière générale, les nombreux modèles proposés avaient pour but de rétablir le déterminisme tout en admettant la mécanique quantique comme une théorie fournissant les prédictions statistiques. C'est en étudiant dans quelle mesure les preuves d'incompatibilité pour ce type de théories était probantes que Bell s'aperçut que de telles théories non-locales pouvaient être mises en accord avec les prédictions moyennes de la mécanique quantique — au contraire de certaines preuves avancées — comme la théorie de Bohm précitée. Dans les raisonnements antérieurs de von Neumann, Jauch et Piron, et Gleason, ce n'était pas la mécanique quantique elle-même qui interdisait un déterminisme non-statistique (pour des états libres de dispersion probabiliste, *dispersion free states*, obtenus par la spécification de variables supplémentaires), mais des hypothèses faites par ces auteurs, plus restrictives que celles de la mécanique quantique. L'ayant montré,³⁰ Bell alla plus loin, et prouva, par son théorème de 1964, que l'on peut parler d'incompatibilité pour une certaine classe, très générale, de modèles à variables supplémentaires "chargées de restaurer la causalité et la localité" (Bell précisait ainsi l'intérêt effectif de telles variables, plutôt que d'employer le vocable "déterministe", bien plus vague). Cette classe était précisément celle des variables supplémentaires *locales*: il avait mis le doigt sur le critère, sensible à l'incompatibilité, qui permettait la démarcation d'avec la mécanique quantique. Ce critère de localité, Bell l'énonçait ainsi: "Le résultat d'une mesure sur un système n'est pas affecté par des opérations sur un système éloigné avec lequel il a été en interaction dans le passé".³¹ Ce faisant, il s'appuyait sur l'expérience de pensée d'EPR reformulée par Bohm³² et par Bohm et Aharonov,³³ ainsi que sur cette phrase d'Einstein revenant, dans ses "Notes autobiographiques", sur le problème EPR: "Mais il est une hypothèse à laquelle on doit à mon avis tenir fermement: la situation de fait réelle du système S_2 est indépendante de ce que l'on peut faire sur le système S_1 , qui est séparé spatialement du premier".³⁴ C'est en quelque sorte en méditant Einstein que Bell a énoncé le critère de localité. Retenons ici en mémoire, pour les discussions ultérieures, que la *mesure* des systèmes quantiques est inscrite dans ces formulations du problème de la localité. Einstein parle en effet de "ce que l'on peut faire sur le système S_1 ",

²⁹Bohm (1952). Bell (1964) souligne cette "grossly non-local structure" du modèle construit par Bohm.

³⁰Bell (1966) [écrit avant Bell (1964)]. Les preuves rappelées par Bell en 1964 sont celles de von Neumann (1932) et de Jauch et Piron (1963).

³¹Bell (1964). C'est la représentation explicite de la non-localité quantique de la théorie de Bohm (1952) qui a suscité la nouvelle recherche par Bell d'une incompatibilité possible avec la mécanique quantique dans la direction de la localité [voir Bell (1982)].

³²Bohm (1951).

³³Bohm et Aharonov (1957).

³⁴Einstein (1946), in Schilpp (1949), p. 85.

et Bell écrit expressément que c'est "le résultat d'une mesure sur un système" qui n'est pas affecté par des "opérations" sur l'autre.

2.4. Mais revenons au critère de localité tel que Bell l'utilise dans son raisonnement. Pour l'exprimer, il fallait considérer une expérience de pensée plus proche d'une situation réelle, où l'on peut effectivement mesurer les grandeurs physiques des sous-systèmes: d'où, l'importance, dans l'élaboration de ce critère, de la transcription de l'expérience EPR faite par Bohm dans son livre *Quantum Theory* en 1951,³⁵ où il considérait non plus la position et l'impulsion des particules, mais les différentes composantes du spin, que l'on peut déterminer expérimentalement par des aimants de Stern et Gerlach (mesures de polarisation). C'est ce cas qui a été repris par Bell dans son raisonnement, concernant toujours une expérience idéale.

Pour pouvoir comparer la prédiction donnée par la mécanique quantique et celle fournie par la causalité locale, il fallait exprimer adéquatement le critère de localité, c'est-à-dire l'indépendance effective des "résultats de mesure" du second système par rapport au dispositif expérimental du premier et inversement: c'est en de tels termes de "résultats de mesure" que l'on raisonne en mécanique quantique, laquelle prédit les valeurs moyennes attendues (*expectation values*) des grandeurs observables en faisant agir les opérateurs sur les vecteurs d'état.³⁶ La causalité locale était supposée rétablie par la spécification d'un ensemble de variables supplémentaires (représentées par exemple par un paramètre continu λ) qui disparaissent du résultat final à la faveur du calcul des moyennes (par exemple par l'intégration sur λ). La mécanique quantique prédit une corrélation stricte (le produit des valeurs attendues est donné par le cosinus des angles des deux polariseurs); pour lui comparer la corrélation de la causalité locale (dont nous savons qu'elle est moins forte, voir plus haut),³⁷ il faut envisager plusieurs directions possibles d'orientation des polariseurs, et l'on obtient une limite de corrélation ou inégalité de Bell.³⁸ L'incompatibilité des deux prédictions — qui constitue le théorème de Bell — peut être constatée en portant la première relation dans l'inégalité de Bell: il est aisé de voir dans des configurations simples (correspondant à certains angles des

³⁵Bohm (1951).

³⁶La localité peut être exprimée par la relation $(A_a \cdot B_b)(\lambda) = A_a(\lambda) \cdot B_b(\lambda)$, $A_a(\lambda)$ et $B_b(\lambda)$ représentant respectivement les résultats de mesures sur le premier et sur le second appareil orientés dans les directions de polarisation du spin a et b (a et b sont des vecteurs, mais on omet ici la flèche qui devrait figurer dans leur symbole). λ est la variable supplémentaire, telle que $\int_{\Lambda} \rho(\lambda) d\lambda = 1$, $\rho(\lambda)$ étant la distribution des variables λ dans l'ensemble Λ . Voir p. ex. Clauser et Shimony (1978).

³⁷La mécanique quantique assure que: $A_a \cdot B_b = -a \cdot b$ (produit scalaire). La causalité locale prédit: $P(A_a(\lambda), B_b(\lambda)) = \int_{\Lambda} d\lambda \rho(\lambda) A_a(\lambda) \cdot B_b(\lambda)$.

³⁸Dans le premier travail de Bell, cette inégalité s'écrit: $1 + P(b,c) \geq P(a,b) - P(a,c)$ (a, b, c sont des vecteurs).

polariseurs) que l'on aboutit à des contradictions (les deux membres de l'inégalité, calculés séparément, ne respectent pas la relation prescrite).

Ce n'est pas ici le lieu de reproduire les développements ultérieurs du problème aux plans théorique et expérimental. Indiquons seulement que d'autres inégalités du type de la première dérivée par Bell ont été obtenues, qui permettent d'appliquer ces considérations à des cas non idéaux puis d'envisager la réalisation d'expériences effectives³⁹ (en particulier, la corrélation de la mécanique quantique exprimée dans le premier travail de Bell est trop idéale pour être testée avec des détecteurs qui n'ont jamais une efficacité absolue). D'autre part, certains auteurs ont pu montrer que, parmi les multiples cas de problèmes envisageables pour manifester l'incompatibilité, le cas de figure considéré par Bell est le plus "efficace", en ce sens que l'incompatibilité entre les prédictions respectives de la mécanique quantique et de la localité est maximale.⁴⁰ Par ailleurs, Bell et d'autres ont montré que le raisonnement pouvait être étendu au cas de la localité "sans déterminisme"⁴¹ et que l'incompatibilité avec la mécanique quantique était donc plus générale que le cas des simples variables supplémentaires chargées de restaurer le déterminisme et portait sur la propriété même de localité.⁴²

2.5. Il serait intéressant de considérer de quelle manière ces généralisations et les contraintes de la réalisation d'une expérience effective ont influé sur l'approche du problème. En particulier le réexamen des expériences où se manifestent des corrélations quantiques à distance effectuées avant la dérivation du théorème de Bell a montré que ces expériences n'étaient pas en mesure de permettre de conclure dans les termes de ce théorème: compatibles avec la mécanique quantique, elles n'excluaient pas la localité.⁴³ C'est seulement en tenant compte de toutes les implications du théorème, y compris dans la manière dont les quantités calculées théoriquement doivent être transformées pour s'accorder à la possibilité d'expériences effectives — et non plus seulement "de pensée" — dans les conditions de systèmes quantiques observables (atomes et particules) et des appareillages utilisables, qu'il allait être possible de conclure. Les expériences effectuées depuis 1970 ont clairement montré que le choix est en

³⁹Le travail de Clauser *et al* (1969) représente un pas décisif dans cette direction. Pour une description de ces problèmes, voir Clauser et Shimony (1978).

⁴⁰Garuccio (1979), Froissart (1981).

⁴¹En utilisant par exemple des variables supplémentaires locales mais stochastiques et non plus "déterministes" ou en considérant des problèmes macroscopiques. Voir Stapp (1971, 1977, 1980), Bell (1971), Eberhard (1977) et Peres (1978).

⁴²Bell (1971). D'Espagnat a exprimé le caractère général de la localité en énonçant des inégalités analogues à celles de Bell pour des couples de grandeurs macroscopiques prises dans la vie de tous les jours [D'Espagnat (1979, 1980)].

⁴³Paty (1974, 1977) et Clauser et Shimony (1978).

faveur de la mécanique quantique et que les inégalités de Bell relatives à la localité des sous-systèmes considérés sont violées.⁴⁴ Ces expériences ont été réalisées dans des conditions diverses et pour plusieurs types de systèmes atomiques ou de particules. Les dernières en date⁴⁵ se sont même placées dans des conditions de variation très rapide et quasi-aléatoire des directions des polariseurs, telles que le caractère opérationnel de la séparation des mesures était effectif, par l'absence de toute possibilité de correspondance causale entre la définition, à chaque mesure, des orientations des deux polariseurs.⁴⁶ Cette condition physique renforce considérablement la non-localité (ou non-séparation locale) des systèmes quantiques comme un *fait* fondamental qui n'est pas explicable par des circonstances secondaires ou fortuites. Ce fait est, comme la discussion précédente le montre clairement, de nature à la fois théorique et expérimentale, comme tout *fait* physique, comme toute propriété générale invoquée en physique. On pourrait, bien entendu, argumenter sur le degré de certitude qu'il convient d'accorder à la conclusion des observations, en recherchant si l'on s'est totalement prémuni contre tout vice des protocoles expérimentaux, ou encore si un modèle particulier, très spécifique, ne pourrait simuler un comportement de type quantique tout en préservant la localité. Bien que l'"évidence expérimentale" en faveur de la violation des inégalités de Bell semble "massive" (pour employer un langage fréquemment en vigueur en physique), on ne peut pas exclure une telle éventualité, même si elle semble, au regard des précautions prises et de l'indépendance des résultats variés qui ont été obtenus, très improbable: toutefois il faudrait vraiment invoquer des raisons très artificielles, très "choisies *ad hoc*", ce qui diminuerait en tout état de cause leur crédibilité.⁴⁷ Mais aucune expérience n'est "cruciale", puisqu'elle repose sur une imbrication très complexe de faits et de théories. Il est toujours légitime de rechercher des failles

⁴⁴Pour des revues, voir Paty (1974, 1977), Clauser et Shimony (1978) et Aspect (1981a).

⁴⁵Aspect (1981b, 1982a,b, 1983a). Pour le système étudié (la transition atomique d'un atome de calcium excité vers son état fondamental avec émission de deux photons), on définit une certaine fonction $P(a,b)$, reliée aux probabilités conjointes qu'ont les photons d'être détectés (donc polarisés dans la direction considérée), ainsi que la quantité S : $S \equiv P(a,b) - P(a,b') + P(a',b) + P(a',b')$, où a, a', b et b' sont des orientations différentes des polariseurs. L'inégalité de Bell généralisée est alors: $-2 < S < +2$. Le résultat expérimental obtenu est: $S = 2.70 \pm 0.015$, la prédiction de la théorie quantique étant $2\sqrt{2} = 2.70$. L'inégalité de Bell est très nettement violée (par 40 écarts-type), et la mécanique quantique confirmée [voir Aspect (1983b)].

⁴⁶Les orientations des polariseurs sont commutées dans un intervalle de temps plus petit que le temps qui serait nécessaire à un signal lumineux pour parcourir la distance entre les deux polariseurs (les deux orientations des polariseurs sont séparées par un intervalle d'espace-temps "du genre espace", sans possibilité d'interaction causale ou d'information physique entre eux). Réalisée pour la première fois dans l'expérience d'Aspect et de ses collaborateurs (Aspect et al., 1982b), cette condition de séparation "du genre espace" avait été suggérée en premier lieu par Bohm et Aharonov (1957).

⁴⁷Évoquant la possibilité d'un biais systématique dans les expériences qu'ils décrivent, Clauser et Shimony remarquaient très justement qu'un tel biais aurait plutôt pour effet d'estomper une corrélation forte que de renforcer une corrélation faible en la faisant paraître forte: cet effet favoriserait des résultats en accord avec les inégalités de Bell, et ne semble donc pas jouer dans les résultats rapportés (Clauser et Shimony, 1978, p. 1919).

possibles pour contester un fait supposé, fût-il bien admis; mais on conçoit qu'en regard du degré d'"évidence" présentement acquis par la non-séparabilité locale cette éventualité apparaisse comme une échappatoire sans grand avenir.

2.6. Si la non-séparabilité locale est un fait, au même titre que les autres faits importants de la physique, la question qui se pose désormais est de prendre sa mesure du point de vue conceptuel et théorique. D'une certaine façon, la situation n'est pas nouvelle, puisqu'elle n'implique aucun changement de la théorie quantique: celle-ci traite de fonctions d'onde non-séparables décrivant des systèmes non localisés ou étendus, et il est intéressant d'examiner de quelle manière, en particulier avec quelle capacité prédictive sur des effets qui seraient observés expérimentalement et n'auraient pas d'explication classique. Si tel est le cas — et des exemples récents nous en convaincront — cela signifie que, malgré son apparence non intuitive, la non-localité n'est en rien une propriété mystérieuse, puisqu'elle est fondée dans la théorie et dans les faits, de manière non seulement descriptive mais prédictive. Mais la *non-séparabilité locale* au sens du théorème de Bell nous en dit plus long que la simple non-localité pratique de la théorie et des phénomènes (par "pratique", nous entendons la possibilité effective et l'habitude prise d'oeuvrer avec ce concept): ce "pas plus loin", c'est l'irréductibilité de la non-localité dans la description du monde physique et l'impossibilité de la voir résorbée dans une approche se prétendant plus fine ou plus profonde que la mécanique quantique en son état actuel. Cet ensemble de considérations nous invitera à reprendre le débat proprement épistémologique sur la mécanique quantique à propos de ce concept.

3. LA NON-LOCALITE DES SYSTEMES QUANTIQUES

3.1. La non-localité est une caractéristique générale des systèmes quantiques. Elle apparaît également dans des systèmes classiques, mais d'une manière différente. Les ondes de la physique classique (par exemple celles de l'ébranlement mécanique d'un milieu, ou les ondes électromagnétiques) sont non-locales, puisque définies simultanément en des points éventuellement très éloignés de l'espace (mais ces points différents du front d'onde sont reliés entre eux par une relation de causalité qui les rapporte à leur source commune,⁴⁸ alors qu'une telle relation est absente pour les systèmes quantiques). Les phénomènes d'interférence en résultent directe-

⁴⁸Cette relation de causalité est la propagation de l'onde à partir de la source, effectuée à vitesse finie ($v = c$, vitesse de la lumière, dans le cas d'une onde électromagnétique; une vitesse $v \leq c$ dans le cas d'une onde d'ébranlement d'un milieu. On ne considère pas ici le cas des hypothétiques tachyons, particules qui seraient cantonnées à des vitesses comprises entre c et l'infini — ce qu'autorise la relativité restreinte. Outre le fait que de telles particules n'ont pas été observées, les tachyons posent des problèmes particuliers).

ment: c'est parce que l'onde n'est pas localisée qu'elle est présente simultanément aux différents points d'une grille de diffraction et qu'elle y détermine des ondes diffractées susceptibles d'interférer. Dans la mesure où les particules quantiques possèdent à la fois les caractères corpusculaire et ondulatoire, elles posent un problème vis-à-vis de la localité: des corpuscules sont localisés dans l'espace, alors que des ondes ne le sont pas. La traduction en termes classiques de cet état de choses s'efforce de concilier ces deux propriétés, incompatibles si on les considère ensemble, en les considérant tour à tour, séparément. Pour localiser la particule quantique on la représente sous forme d'un paquet d'onde, dont chaque élément est une onde plane, d'impulsion exactement définie, mais totalement non locale.⁴⁹ Il en résulte que ni la localisation spatiale, ni l'impulsion ou quantité de mouvement, ne sont des quantités intrinsèquement attachées à une particule quantique: c'est bien cette différence avec les particules au sens classique qui fait ajouter à leur désignation de *particule* le terme *quantique*. A vrai dire, les physiciens quantiques savent bien que les *particules quantiques* ne sont des particules que quand on oublie qu'elles sont aussi des ondes, et vice-versa. Témoin les expériences bien connues des "doubles fentes d'Young", qui manifestent, si l'une des fentes est fermée, que la particule quantique possède une trajectoire corpusculaire, ou, si les deux fentes sont ouvertes, qu'elle est délocalisée à la façon d'une onde et donne lieu à des interférences. L'observation statistique d'un grand nombre de particules quantiques en état d'interférence retrouve une distribution moyenne d'impacts de corpuscules. Si l'on essaie de se débarrasser du langage opérationnaliste qui rapporte les systèmes physiques d'abord aux conditions de leur observation — un système étant considéré comme différemment défini si l'on veut observer sa position, ou au contraire son impulsion — on peut traduire cet état de fait en exprimant que les systèmes quantiques sont d'une autre nature que des ondes ou des corpuscules, mais que ces notions en constituent des approximations dans des conditions bien définies, dont la convergence statistique des résultats garantit la légitimité.

Le formalisme de la mécanique quantique a été précisément construit pour s'adapter à ces circonstances, en développant des notions dont certaines sont tirées de la physique des ondes — puis généralisées et abstraites —: le *vecteur d'état*, quantité mathématique qui représente l'état physique d'un système, est une généralisation, à un espace vectoriel abstrait (l'espace des états du système), de la fonction d'onde. Le principe de superposition, selon lequel toute superposition linéaire des vecteurs d'état du système est également un vecteur d'état, c'est-à-dire correspond à un

⁴⁹ $\psi(x) = \int A(k)e^{-ik \cdot x} dk$ (x et k sont des vecteurs représentant respectivement la position et l'impulsion).

⁵⁰ $I(x) = |\psi(x)|^2$ exprime ce fait. (I = intensité de la figure d'interférence, ou nombre de particules en un point x).

état possible du système, est directement calqué sur le principe correspondant de la théorie électromagnétique, qui assure que les ondes peuvent s'ajouter ou se retrancher.⁵¹ Du point de vue théorique, c'est précisément le principe de superposition qui apparaît comme la contrepartie, dans le formalisme, de la non-localité des systèmes quantiques. C'est lui, d'une manière générale, qui est responsable de l'existence de "grandeurs physiques incompatibles", que la théorie représente par des opérateurs qui ne commutent pas,⁵² et d'où résultent des relations comme celles dite d'"incertitude". L'inégalité de Heisenberg $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ exprime justement la limite à la localisation possible d'une particule (ou d'un système) quantique dont l'étalement de l'impulsion est donné (Δp): cette localisation ne sera jamais plus précise que $\hbar/\Delta p$.

3.2. Les phénomènes de non-localité dans les systèmes microscopiques sont bien connus et désormais universellement acceptés sans choquer quiconque: ce qui ne veut pas dire toutefois qu'ils aient été immédiatement aperçus dans les débuts de la physique quantique. Il a, par exemple, fallu attendre 26 ans, pour se rendre compte d'une propriété quantique fondamentale, l'indiscernabilité des particules identiques,⁵³ qui est directement liée à la non-localité, et qui se trouve implicitement contenu dans la définition même du quantum d'action tel que Planck le postula en 1900. La théorie répartit les particules quantiques indiscernables dans l'une ou l'autre des classes suivantes: celle des fermions, qui obéissent au principe d'exclusion (deux fermions identiques ne peuvent occuper le même état dans un système donné), et dont la fonction d'onde globale est antisymétrique par rapport à l'échange de fermions deux à deux; et celle des bosons, dont la fonction d'onde est au contraire symétrique par rapport à un tel échange. Les particules identiques ne sont pas identifiables et distinguables l'une de l'autre, ce qui veut dire aussi qu'elles ne sont pas exactement localisables (car, autrement, on aurait un moyen, par leur localisation, de les identifier, de les distinguer). Si l'on devait penser de telles particules en termes de localisation précise, on ne comprendrait pas physiquement comment deux électrons identiques peuvent mutuellement se dissuader d'occuper le même état dans un atome: il y faudrait faire intervenir des forces d'échange instantanées et aléatoires entre les deux électrons qui seraient parfaitement artificielles. La solution ne réside nulle part ailleurs que dans le caractère (mathématique) de symétrie (ici une antisymétrie), par rapport à l'échange des deux électrons identiques, de la fonction d'onde du

⁵¹A cette différence près qu'en mécanique quantique les coefficients qui interviennent dans la superposition linéaire ($\psi = a_1\psi_1 + a_2\psi_2 + \dots + a_n\psi_n + \dots$) peuvent être des nombres complexes.

⁵² $[A, B] \equiv A \cdot B - B \cdot A \neq 0$. La position et l'impulsion sont représentées par de telles grandeurs (x est un nombre, mais p est un opérateur de différenciation: $p_x = \hbar \partial/\partial x$): $[x, p] = \hbar$. D'où $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ ($\hbar = h/2\pi$).

⁵³Kastler (1981), Paty (1985).

système.⁵⁴ En d'autres termes, c'est la théorie, sous sa forme abstraite et mathématisée, qui détermine l'interprétation physique, et l'on sent bien tout ce qu'aurait d'artificiel et d'arbitraire une traduction de cette propriété en termes imagés. L'outil mental dont nous disposons pour nous représenter les électrons et leur comportement, ce n'est pas notre faculté d'imaginer en termes intuitifs ou en représentations sensibles, mais l'appareil théorique dont on a pu éprouver la capacité, au plan formel comme au plan expérimental. Ceci est généralement bien accepté quand on se cantonne aux phénomènes relatifs aux systèmes de dimensions microscopiques. Savoir pourquoi des problèmes, au contraire, semblent surgir dès que les distances en jeu sont grandes est une autre question, sur laquelle nous reviendrons plus loin. Il ne paraît pas, en tout cas, à ce stade de l'application du principe de superposition à l'indiscernabilité, que le réalisme physique soit incriminé: l'on peut concéder au physicien réaliste qu'il existe des systèmes physiques, et il accepte qu'ils soient caractérisés par de telles propriétés.

3.3. Les physiciens considèrent comme établis d'autres phénomènes qui ont également à voir avec la non-localité dans les domaines atomiques, nucléaires ou subnucléaires, et qui se rattachent au fait que les systèmes concernés sont décrits par des superpositions d'état, ce qui modifie la conception que l'on peut avoir, en physique quantique, de l'individualité ou de l'"identité" des systèmes ou des particules.⁵⁵ On mesure par là combien la théorie quantique, dans son cadre désormais classique — si l'on ose dire — comme dans ses développements les plus récents, a parfaitement intégré le type de raisonnement en question et le traitement des mélanges d'états qui est, aux calculs sur les vecteurs d'état et les champs quantifiés, mieux qu'une "seconde nature", leur essence même. Une telle constatation n'est pas indifférente si l'on considère en regard les réticences à accepter ce fait dès lors qu'il concerne des systèmes qui paraissent plus proches de notre intuition — par un simple effet d'illusion. Le caractère systématique de ce type de traitement, sa cohérence au travers de toute la procédure théorique dans le champ très vaste de la physique quantique actuelle, nous montre bien qu'il s'agit là de quelque chose de tout à fait fondamental.

Mais ces exemples concernent presque tous des systèmes "microscopiques", systèmes non-locaux certes, mais limités aux dimensions de

⁵⁴Une telle symétrie est obtenue en prenant, pour la fonction d'onde de deux fermions (p. ex. deux électrons): $\psi = 1/\sqrt{2} [\psi(1) - \psi(2)]$. Par échange des électrons 1 et 2, ψ est transformé en $-\psi$.

⁵⁵J'évoque ici, sans pouvoir insister, le cas de la molécule de benzène [cf. Feynman, Leighton et Sands (1965). Voir Paty (1981b, pp. 212-213)], ou celui des "mélanges" de quarks, ou des mélanges des quanta des champs d'interaction (angle de Weinberg-Salam de l'interaction électrofaible), ou des mélanges des fonctions d'onde des systèmes de mésons K neutres [voir p. ex. Cronin (1983)], ou de celles des variétés de neutrinos (oscillations éventuelles de neutrinos), etc. . . . qui conduisent à des effets observés dans les premiers cas, exactement prédictifs dans le dernier.

particules ou d'atomes. Nul ne doute du bien-fondé des descriptions théoriques de tels systèmes, mais on conçoit bien que leur appréhension est indirecte. Le caractère de l'extension spatiale, ou les effets de celle-ci, ne se laissent pas immédiatement voir. A cela s'ajoute par ailleurs le fait que les phénomènes quantiques de nature simple, c'est-à-dire qui résultent directement du formalisme élémentaire (tel le principe de superposition), sont souvent compliqués, dans les phénomènes réels, par des effets de nature dynamique (par exemple l'absorption ou la diffusion des particules), qui réclament des hypothèses ou des modèles supplémentaires. C'est pourquoi la plupart des tests de la mécanique quantique, bien que très nombreux et variés, sont généralement indirects: n'oublions pas que les phénomènes qui ont suscité l'élaboration de la mécanique quantique sont ceux, bien plus complexes que l'énoncé du formalisme, des propriétés atomiques et des interactions entre matière et rayonnement. Il est donc intéressant en soi de tester "directement", c'est-à-dire sur une échelle de dimensions si possible macroscopiques, et avec un minimum d'hypothèses (sur la nature des interactions ou sur la constitution des systèmes, autres que la définition de leur fonction d'onde par la mécanique quantique), les prédictions élémentaires du formalisme, des fameux axiomes de la mécanique quantique. De tels tests ont été faits à partir de systèmes aussi simples que des photons ou des neutrons, dont on a pu mettre en évidence, individuellement, les propriétés spécifiquement quantiques de non-localité.

3.4. Les expériences de diffraction habituelles concernent des faisceaux de particules groupées en nombre, pour lesquelles le comportement individuel s'évanouit dans la moyenne statistique. La réalisation de telles expériences avec une seule particule pose une difficulté de principe, puisque compter la particule du faisceau — pour savoir qu'elle est unique et que c'est donc avec elle-même qu'elle va interférer, comme le prescrit la mécanique quantique — c'est perturber son état en la ramenant au seul aspect de corpuscule, et donc lui enlever toute possibilité de faire des interférences.

Dès 1958, des expériences ont été réalisées avec des photons optiques pour lesquels l'intensité était si faible que l'on était assuré d'avoir un seul photon au moment de la traversée de l'appareillage — lequel consistait en un interféromètre du type de Michelson, avec des photons monochromatiques. L'observation d'interférences a permis de conclure que c'est avec lui-même que le photon a interféré. La conclusion de l'expérience de Pfligor et Mandel, réalisée en 1967, mais d'interprétation plus délicate en raison de l'utilisation de deux faisceaux laser indépendants, est également l'existence d'une auto-interférence de photons. En termes classiques, il serait incompréhensible que dans ces expériences d'interférences le

photon, pourtant unique, aût pu se partager en deux faisceaux qui interfèrent, ce que la mécanique quantique au contraire prévoit, en raison de la non-localité du quantum lumineux.⁵⁶

Le caractère non-local observé dans le cas du photon n'est pas réductible à la théorie de l'électromagnétisme classique. L'on sait d'ailleurs par d'autres considérations qu'il n'est pas possible d'aménager, pour le photon, une théorie classique ou néo-classique de l'électrodynamique, et que c'est l'électrodynamique quantique qui est requise:⁵⁷ autrement dit, la non-localité du photon n'est pas celle des ondes classiques, mais celle que décrit le formalisme quantique.

Plus récemment des expériences analogues ont pu être réalisées à l'aide de neutrons libres de très basse énergie, ou neutrons froids, dont on a observé l'auto-interférence par diffraction sur des "cristaux parfaits", c'est-à-dire dont les plans de réseaux sont parfaitement parallèles: la faible absorption des neutrons froids, en comparaison d'autres faisceaux, rayons X ou électrons, permet de faire des expériences d'optique avec des faisceaux cohérents sur des dimensions spatiales cent fois supérieures (de l'ordre de l'angström au lieu du centième d'angström dans le cas des électrons). Même si le faisceau de neutrons est intense, les neutrons traversent séparément l'un après l'autre l'interféromètre (leur temps de parcours à travers celui-ci est très inférieur à l'intervalle de temps séparant deux neutrons successifs du faisceau). Des cristaux parfaits de grande taille permettent d'assurer la cohérence des faisceaux diffractés, par ailleurs très bien séparés grâce à l'extrême résolution du faisceau de neutrons, et que l'on peut soumettre à des déphasages d'origines diverses, nucléaire, magnétique ou gravitationnelle. Les résultats obtenus sont en parfait accord avec la mécanique quantique et confirment, par la mise en évidence de l'auto-interférence par diffraction des neutrons, la non-localité de ces particules quantiques sur des extensions spatiales bien supérieures aux dimensions microscopiques.⁵⁸

L'obtention, dans des "bouteilles à neutrons" ultrafroids où ils sont maintenus confinés pendant quelques centaines de secondes, d'états stationnaires quasi-liés de neutrons, comme le prévoit la mécanique

⁵⁶Jánossy et Naray (1958), Pfligor et Mandel (1967). Cette dernière expérience est l'objet d'interprétations diverses dont la discussion dépasserait le cadre de la présente étude. L'auto-interférence d'un seul photon a été prévue par Dirac (1930; ed. 1981, p. 9).

⁵⁷Voir notamment Clauser (1974), Dagenais et Mandel (1978).

⁵⁸Rauch (1983). Les neutrons dans ces expériences sont très monochromatiques ($\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$) et les longueurs de cohérence sont relativement longues (environ 1000 Å pour des neutrons de $\lambda = 1$ Å, soit $E = 10^{-3}$ eV ($\lambda =$ longueur d'onde; 1 Å: 1 angström = 10^{-8} cm; eV = electron-volt).

quantique, est une autre évidence en faveur de l'application de cette théorie pour des systèmes de relativement grandes dimensions.⁵⁹

Ce que nous enseignent les exemples qui précèdent, c'est que la non-localité est bien un fait physique, sans mystère du point de vue théorique. Il ne s'agit pas d'un effet de moyenne statistique, par exemple sur des faisceaux de particules, puisqu'elle apparaît aussi bien dans le cas de particules individuelles.⁶⁰ Elle ne contredit — du moins dans les exemples évoqués — aucune loi connue de la physique. La non-localité des systèmes quantiques manifeste le caractère radicalement non particulière au sens classique de ces systèmes. Notons cependant que cette non-localité ou extension spatiale des systèmes quantiques n'est pas *a priori* incompatible avec une causalité locale du genre de celle des ondes; ce n'est pas encore la *non-séparabilité locale*: nous y reviendrons plus bas.

4. LA THEORIE QUANTIQUE DECRIT-ELLE COMPLETEMENT SON OBJET?

4.1. Il ressort des considérations de la section précédente que la non-localité n'est plus une notion surprenante, qu'elle s'est insensiblement imposée par la pratique du formalisme et la réalisation d'un certain nombre d'expériences jusqu'à être devenue familière au physicien. Si les expériences évoquées (je parle ici de celles de type diffractif), une fois qu'elles étaient devenues possibles et réalisées, n'avaient pas été en accord avec les implications de la théorie, c'est cela en vérité qui aurait été étonnant et aurait contredit ce que l'on savait par ailleurs. La non-localité est donc un caractère des systèmes quantiques qui apparaît même sur des distances macroscopiques; observée expérimentalement, on sait à quels traits de la formalisation théorique en rapporter l'explication — et d'ailleurs la prédiction théorique, pour les phénomènes liés à la non-localité, a précédé l'observation, comme c'est souvent le cas dans la physique mathématisée actuelle. En fait, cette non-localité en soi n'étonne pas vraiment les physiciens dans la mesure où elle avait acquis droit de cité déjà avec la physique classique des ondes et des déformations continues, avant même l'étude des systèmes quantiques spatialement étendus — qui en diffèrent notablement — puis avec la physique quantique et l'étude de ces derniers systèmes. Pour certains, qui représentent peut-être la grande majorité des physiciens travaillant sur des terrains plus riches en données d'expériences,

⁵⁹Les "bouteilles à neutrons" sont des cavités optiques macroscopiques aux parois parfaitement réfléchissantes; les neutrons ultrafroids issus de réacteurs à fusion et thermalisés par un modérateur ont une énergie de l'ordre de 10^{-7} eV, une longueur d'onde de 400 Å environ, et une vitesse inférieure à 10 m/sec. Leur énergie étant inférieure au potentiel de diffusion du matériau des parois, ils subissent sur celles-ci une réflexion totale. Les états quasi-liés ont été mis en évidence par diffractométrie à gravité des neutrons. Voir Steyerl (1983).

⁶⁰Particules individuelles entendues au sens d'unités dans un dénombrement. Mais l'*individualité* des particules n'est pas du type intuitif ou classique, elle est gouvernée par le formalisme théorique.

sur des systèmes microscopiques complexes, de la physique de la matière condensée à celle des particules élémentaires, ce serait même un concept banal à tel point qu'ils considèreraient les problèmes soulevés par le théorème de Bell sur la non-séparabilité locale et ses tests expérimentaux comme une sorte de vérification d'une propriété évidente au départ, sans portée vraiment fondamentale: un exercice, en quelque sorte, sur des éléments parfaitement acquis. Pour d'autres, à l'inverse, pour lesquels le formalisme de la mécanique quantique et sa fécondité dans l'élaboration de modèles théoriques est une chose, mais sa signification ou son interprétation en est une autre, bien différente, il s'agirait d'une véritable révolution bouleversant notre façon de penser, obligeant à des révisions radicales, déchirantes, où nous enjoignant au contraire de réfuter les faits ou les raisonnements allégués au nom d'exigences supérieures de la raison. Il serait trop long de passer en revue le spectre des positions entre ces deux extrêmes, bien révélateur cependant des interactions, dans nos représentations, entre les propositions scientifiques et les conceptions générales (à quoi l'on devrait ajouter, comme également révélateur, à un autre niveau, l'impact de ces débats dans le public, et les transformations, déformations et transpositions dans l'imaginaire auxquelles il donne lieu⁶¹). Ici encore, l'exacte évaluation de ces questions est de nature physique et philosophique: mais l'on ne saurait sans dommage mêler indistinctement ces deux aspects, et une approche critique, épistémologique, des conceptions en jeu, de l'évaluation des propositions acquises, apparaît souhaitable pour clarifier au mieux ce qui peut l'être.

Il nous faut donc, en premier lieu, nous interroger sur la signification exacte de la non-localité, celle des praticiens de la physique qui la manient "quotidiennement" sans difficulté majeure, mais également celle qui apparaît irréductiblement dans le théorème sur la non-séparabilité locale et ses tests expérimentaux. Mais à quoi rapporter cette *signification* elle-même d'une propriété physique? A la théorie dont elle relève — la mécanique quantique —, à la théorie physique dans son ensemble, à la langue naturelle, ou à quelque autre schème commun? C'est sur l'horizon de cette question classique de théorie de la connaissance que tout essai d'élucidation se situe. Sans prétendre la résoudre d'abord en imposant un point de vue trop contraignant, mais sans pour autant l'ignorer, tentons d'éclairer pas à pas, bien que sommairement, ce qu'il est désormais possible de dire, épistémologiquement, sur la non-séparabilité locale.⁶²

4.2. Il n'est évidemment pas suffisant d'invoquer la "nature ondulatoire"

⁶¹ Les références sont trop nombreuses pour que je les cite ici.

⁶² Plusieurs des publications de ces dernières années sur la non-séparabilité se proposent, d'une manière plus ou moins formalisée, de telles clarifications épistémologiques tentant de mesurer la portée des propositions, l'économie des formulations, les présupposés des définitions. Cf. en part. Heywood et Redhead (1983) et d'Espagnat (1981), ainsi que les articles de Bell, de Stapp et d'autres.

des particules quantiques pour justifier la non-localité. Certes, le caractère non-local ou étendu des particules quantiques présente avec la physique des ondes des analogies qui ont, précisément, entraîné des emprunts de la théorie quantique à la théorie des ondes et des champs classiques; mais l'analogie est très limitée, et, par leurs formalismes, ces théories diffèrent radicalement l'une de l'autre. La théorie classique est exprimée par des équations différentielles continues et cette représentation est insuffisante pour la théorie quantique, qui fait appel à un formalisme d'opérateurs et de vecteurs d'état (dans l'espace de Hilbert), que domine la discontinuité (celle-ci se marque dans le caractère fini de la constante de Planck h , et dans la non-commutativité des opérateurs). En particulier la non-localité des ondes classiques respecte la causalité relativiste, en ce sens que tous les points du front d'onde sont reliés de manière causale à l'origine de l'onde (ils sont dans une même "région temps" du cône de lumière). Dans le cas de la non-localité quantique, rien au contraire dans le formalisme n'oblige à ce que des points différents d'espace-temps d'un même "système quantique étendu" se trouvent situés dans cette région où des influences causales au sens de la relativité seraient possibles. Nous avons même vu que les derniers résultats expérimentaux, relatifs à la non-séparabilité par la mise en évidence des corrélations fortes, concernent des systèmes étendus dont les points sont séparés par des intervalles "du genre espace", où des influences sont strictement impossibles (si l'on croit à la relativité): cette propriété précise, testée expérimentalement, était prédite par la théorie quantique.

Bien qu'elle soit différente de la non-localité (ou extension spatiale) classique des systèmes continus et à causalité spatio-temporelle, et même (nous allons y revenir) irréductible à celle-ci, la non-localité quantique est parfaitement maîtrisée par la théorie physique en son état actuel: les exemples de systèmes quantiques non-locaux et de leur traitement théorique évoqués plus haut (photon, neutron), le montrent clairement. Traitant adéquatement de tels systèmes, la mécanique quantique est donc cohérente avec son objet: entendons par là que, quand on la considère pour elle-même, sans autre référence externe, son objet tel qu'elle le décrit et tel qu'il la teste n'oblige aucunement à la compléter ou à la dépasser. Les physiciens avaient donc, en fait, accepté dans la pratique, avant de savoir qu'elle était irréductible, que la non-localité puisse être fondamentale, puisque la théorie physique sait complètement décrire et prédire de tels phénomènes non-locaux.

Mais l'acceptation relativement aisée et même "naturelle" (au sens de la familiarisation avec une théorie physique et avec les phénomènes qui lui correspondent) de la non-localité ainsi entendue ne diminue en rien l'importance du théorème de Bell et de ses tests expérimentaux, importance que l'on ne saurait surestimer. En effet, que la non-localité, manifestée dans

/n les phénomènes d'interférence, soit bien circonscrite du point de vue théorique n'empêche *a priori* nullement de penser qu'il puisse être possible de la réduire à des phénomènes plus fondamentaux qui seraient locaux, par quelque mécanisme engendrant une non-localité apparente: un tel mécanisme pourrait être rapporté à des variables dynamiques à déterminer (variables supplémentaires), ou, plus généralement, à une théorie encore à venir dont la mécanique quantique serait une approximation. Les systèmes non-locaux de la théorie quantique ne seraient, dans une telle perspective, non-locaux que d'une manière approchée. On pourrait imaginer que la théorie quantique soit correcte mais incomplète, cette incomplétude se manifestant justement, comme Einstein le suggérait, par une non-localité. Compléter la mécanique quantique, ce serait, d'une manière ou d'une autre, la réconcilier avec une localité fondamentale.

C'est ainsi que nous répondrions au physicien qui émettrait des doutes sur l'intérêt du théorème de Bell au nom de la maîtrise par la théorie quantique de la non-localité. Or c'est en des termes tout à fait semblables qu'avait été posé le problème du déterminisme pour réduire le caractère probabiliste de la théorie quantique et, de fait, comme nous l'avons vu, c'est plutôt relativement au problème du déterminisme que la question de la complétude a été considérée d'abord. Les variables cachées ou supplémentaires locales, par exemple, permettraient de compléter ce qui manque à la théorie quantique pour qu'elle soit locale et, en même temps, déterministe. Nous savons maintenant, avec le théorème de Bell et les expériences de corrélation à distance, que cette possibilité est exclue: les variables supplémentaires locales sont incompatibles avec la mécanique quantique.

Mais, bien que le théorème de Bell ait été pensé généralement en termes de déterminisme davantage que de non-localité,⁶³ il ne s'agit pas tant d'une assertion sur le déterminisme (que certains auteurs peuvent d'ailleurs penser restaurer à l'aide de variables supplémentaires non-locales) que d'une assertion sur la localité, puisque le théorème d'incompatibilité de Bell s'est avéré porter sur la localité dans toute sa généralité, incompatible désormais avec la mécanique quantique. Autrement dit, la non-localité des systèmes quantiques est très probablement, au vu de ces développements, irréductible à toute éventuelle localité sous-jacente ou plus profonde.⁶⁴

⁶³Comme le remarque, par exemple, Stapp (1980).

⁶⁴De plus, il apparaît bien que la non-séparabilité locale soit indépendante du contexte philosophique, puisqu'elle s'impose aussi bien à ceux qui admettent le réalisme qu'à ceux dont la position est pragmatique ou opérationnaliste. Stapp (1977, 1980), par exemple, montre que la non-localité est également reçue par le système conceptuel de Bohr. Tarozzi (1980-81, paru en 1983) affirme au contraire que les inégalités de Bell reposent sur l'hypothèse réaliste aussi bien que sur celle de la localité. Ces deux "hypothèses" ne me paraissent pas susceptibles d'être mises sur le même plan, et que l'on admette ou non le postulat réaliste (une position philosophique est-elle expérimentalement vérifiable?), la localité est bel et bien ce qui est en jeu dans le théorème d'incompatibilité de Bell.

Remarquons que ce résultat entraîne une restriction extrêmement forte pour toute tentative d'élaboration théorique ultérieure: toute théorie plus puissante qui prétendra dépasser la mécanique quantique (par exemple une théorie unitaire qui engloberait avec elle comme une autre approximation la relativité restreinte) devra être non-locale, c'est-à-dire porter sur des grandeurs physiques non-locales. Il s'agit là d'une contrainte fondamentale que l'on ne pouvait apercevoir avec cette netteté avant le théorème de Bell et ses tests expérimentaux, lesquels représentent donc, dans cet ordre, un pas en avant considérable.⁶⁵

Pour résumer en une formule lapidaire la nature de la localité (qui est tellement reliée à une demande de l'intuition sensible sur une possibilité *a priori* de représentation spatiale des phénomènes physiques), nous pourrions dire qu'elle ne correspond pas à une catégorie *a priori* de notre entendement ni à un élément fondamental et permanent de la structure du monde, mais à une propriété émergente des systèmes macroscopiques.

Rien, avant le théorème de Bell, ne permettait de tester le caractère fondamental et irréductible de la non-localité. C'est, rétrospectivement, dans le travail d'Einstein, Podolsky et Rosen de 1935 qu'il faut voir l'origine de cette importante avancée conceptuelle de la théorie quantique et de toute théorie qui prétendrait l'englober. En 1957 déjà, Bohm et Aharonov soulignaient qu'aucune des expériences de physique réalisés jusqu'alors en physique atomique ou nucléaire, où intervenaient les équations de Schrödinger et de Dirac, n'était capable de tester le problème abordé par EPR, qui impliquait de grandes distances: ces grandes distances où se manifeste évidemment le plus visiblement la non-localité dont Bell formula avec une perspicacité décisive le critère et la généralité. Par là-même, la mécanique quantique se voyait testable dans des conditions qui avaient échappé pendant longtemps à son champ expérimental, et le théorème de Bell a donc permis d'étendre son domaine de validité.

L'apparente banalité, aux yeux des physiciens quantiques, de la non-localité, ne doit donc pas nous faire perdre de vue ceci: c'est seulement le fait de la *non-séparabilité locale* consécutif à l'énoncé du théorème d'incompatibilité de Bell et aux expériences de corrélation à distance qui nous a permis, sinon de savoir manier ce concept, ce que l'on savait fort bien faire sans cela, du moins d'en comprendre toute l'extension et la nature fondamentale. Mais, d'un autre côté, que nous ayons déjà à notre disposition la théorie capable de traiter la non-localité des systèmes physiques, la non-séparabilité locale à laquelle nous ne pouvons échapper,

⁶⁵Plusieurs auteurs voient dans la non-séparabilité locale l'indice d'un véritable holisme ontologique (Bohm, 1980b, Heywood et Redhead 1983). Bohm parle de "totalité physique insécable".

et qu'elle le fasse complètement, cela d'une certaine manière simplifie nos interrogations conceptuelles: la non-localité est pour cette théorie sans mystère, sinon sans problèmes. Mais ces problèmes sont ceux du rapport de nature, de cohérence et de complétude entre cette théorie, la mécanique quantique, et les objets qu'elle prétend décrire. Et c'est encore au questionnement critique, épistémologique, que nous sommes conviés à son sujet bien plutôt qu'à de grandes dissertations de philosophie générale ou de métaphysique.

4.3. La non-séparabilité locale, en tant que propriété prédite par la mécanique quantique, c'est-à-dire contenue implicitement dans son formalisme, est un exemple particulièrement vif, par la richesse de ses implications théoriques et conceptuelles, de la puissance de l'abstraction mathématique de la théorie physique dans son rapport aux phénomènes. L'utilisation du formalisme mathématique très abstrait dans la théorie physique a des conséquences dont on ne sait pas évaluer immédiatement, bien souvent, toute la portée et la signification. Dans le cas de la non-séparabilité locale, il s'agit d'une propriété qui résulte de l'ensemble des axiomes et, en particulier, du principe de superposition, comme nous l'avons vu; celui-ci, formellement, correspond à l'interposition entre les composantes du vecteur d'état d'un connecteur quantique (le connecteur + qui les *superpose*), et dont la signification opératoire est autre que "et" ou "ou", et résulte des autres axiomes. (Pour autant, il n'est pas suffisant d'invoquer de nouvelles logiques du tiers non-exclu pour en obtenir une traduction simple⁶⁶). Ces conséquences du formalisme, relativement indistinctes au départ, se présentent comme une part d'énigme qui peu à peu se résout, en premier lieu par l'explicitation physique du problème et l'extraction de la propriété physique correspondante: tel a bien été le cas pour la non-séparabilité locale. Cette résolution s'effectue ensuite par le questionnement épistémologique sur les concepts et sur la logique des propositions. Propriété physico-mathématique tapie dans le formalisme abstrait, la non-localité s'est imposée en fin de compte comme une propriété proprement physique — mais qui n'est pas compréhensible en-dehors de son expression mathématique dans la théorie. Si elle a pu être manifestée, c'est parce que l'on a en fin de compte accepté que "c'est seulement la théorie physique qui décide ce qui peut être observé".⁶⁷ Il faut en outre admettre que si cette théorie physique est tant soit peu fondée, c'est elle qui nous éclaire sur l'interprétation de ce qui est observé et désigné par elle. La non-séparabilité locale n'est plus une chose si difficile à concevoir si nous acceptons qu'elle correspond à un caractère de la réalité physique (ou des

⁶⁶Sur les logiques quantiques et leur caractère insatisfaisant, voir p. ex. Stachel (1983b).

⁶⁷Heisenberg rapporte, dans *La Partie et le tout* (tr. fr. p. 52 et suiv.), cette remarque d'Einstein faite en 1926, à laquelle il déclare souscrire.

phénomènes physiques, si l'on préfère cette terminologie plus dégagée du postulat réaliste), caractère désigné par une notion de la théorie physique mathématisée, médiatrice entre les choses et les mots qui les désignent. Sans cette médiation les métaphores seules, ou l'analyse logique du langage, ou encore un simple mélange (généralement arbitraire) de considérations physiques et philosophiques — comme l'idée de complémentarité ou telle proposition operationaliste pour définir des phénomènes — sont impuissants à rendre totalement compte d'une telle propriété et de ses énoncés.

La théorie quantique a été construite mathématiquement en s'appuyant sur des théories physiques antérieures — et notamment par une extension de la mécanique statistique —; ce faisant elle exprimait par un certain nombre de conditions mathématiques les limites de ces théories antérieures, et ce processus s'est trouvé parachevé par l'élaboration d'un système d'axiomes relatif à des grandeurs physiques, elles-mêmes construites et transformées. Tout ceci impliquait des réaménagements formels qui s'avéraient en même temps riches de contenu physique et d'interprétation délicate; par là s'était opéré un véritable retournement des fondements mêmes de la théorie, devenus méconnaissables pour une grande part. La non-séparabilité locale est l'un des avatars les plus récentes de ce mouvement profond et représente une rupture de plus avec nos conceptions de la physique classique, rupture dont on est tenté de dire qu'elle exprime l'essence même de la spécificité quantique, dans son irréductibilité aux conceptions physiques antérieures.

4.4. C'est la prégnance toujours grande de la physique classique sur nos modes de pensée qui nous porte à traduire spontanément les concepts quantiques dans un langage classique et, par exemple, à parler, à propos de sous-systèmes non séparables localement, de particules localisées qui interagiraient entre elles par l'intermédiaire de champs locaux. De telles images intuitives sont parfois utiles pour des calculs ou des représentations simples, mais elles limitent toute possibilité d'entrer plus profondément dans la compréhension des problèmes physiques.⁶⁸

Le problème qui se pose à nous, étant donné cette théorie en rupture avec les conceptions de la physique classique, est de savoir si elle décrit complètement l'objet qu'elle vise. La non-localité n'est plus en soi un argument d'incomplétude, et à cet égard la mécanique quantique ne pose pas de difficulté particulière. Mais on peut penser que le problème de la complétude n'est pas épuisé pour autant. Heisenberg, revendiquait, pour une théorie dont le contenu est donné par le système de ses concepts (il

⁶⁸Bohm et Hiley (1982).

l'appelait, dans ce sens, *intuitive*), "qu'elle soit en elle-même sans contradiction et qu'elle permette de prédire sans ambiguïté les résultats de toutes les expériences imaginables dans son domaine", et il ajoutait: "la mécanique des quanta sera dans ce sens une théorie intuitive et complète des processus micromécaniques".⁶⁹ Pour Einstein, la définition d'une théorie complète est différente, car il référerait l'objet de cette théorie à la réalité physique. Il serait peut-être souhaitable de combiner les exigences de ces deux définitions, la deuxième permettant de lever une ambiguïté de la première qui, bien que dépassant la simple exigence de cohérence par l'aptitude à prédire, qualifie toutefois celle-ci d'une manière vague. Qu'entend en effet par "toutes les expériences imaginables dans son domaine"? Cette proposition pourrait aussi bien s'accorder à la définition donnée par Bohr, selon laquelle le système ne peut être défini dans ses attributs indépendamment de l'observation, et pour qui l'ensemble de l'appareil et du système étudié constitue un tout inanalysable en ses éléments: Bohm et Aharonov remarquaient, à propos de Bohr, que son point de vue montre que les corrélations EPR sont consistantes avec la mécanique quantique, mais qu'"il ne laisse aucune place à la question de savoir quelle est l'origine (de ces corrélations)".⁷⁰ L'origine de ces corrélations certes réside dans la non-localité et non dans un mécanisme sous-jacent: mais la position de Bohr n'aurait pu cerner la non-localité comme propriété, arrêtant par sa réponse toute investigation dans ce sens.

Ces remarques sur des définitions relatives à la complétude d'une théorie nous amènent à distinguer deux notions: celle de complétude, précisément, et celle d'achèvement. La référence à l'objet physique ou aux expériences possibles sur lui implique la possibilité d'un débordement — non nécessairement contradictoire — de la théorie par son objet, si elle ne suffit pas à l'épuiser, et pose donc la question de l'achèvement de la théorie; l'idée d'une unité de la physique et de l'unification de ses théories pose également cette même question. Complétude et achèvement de la théorie sont liées; pour autant elles ne se confondent pas, même si au moment de la constitution de la théorie quantique elles étaient étroitement liées par un effet bien naturel.⁷¹ Dans le contexte de l'argumentation EPR, la mécanique quantique était certes soupçonnée de n'être ni complète ni achevée, mais c'est clairement sur la complétude que l'argumentation portait. Nous nous accorderons bien avec Einstein, à l'exigence de localité près, si nous demandons à une théorie complète de *traiter* sans ambiguïté l'ensemble des

⁶⁹Dans *La Partie et le tout*.

⁷⁰Bohm et Aharonov (1957).

⁷¹Popper, dans le troisième volume de son *Postscript* (Popper, 1982), traite indistinctement de ces deux notions qu'il voit confondues dans la problématique où elles se sont posées. Mais la physique a évolué depuis lors et les problèmes relatifs à l'une ou à l'autre de ces deux notions ne se superposent plus [à ce sujet, voir Paty (1982a)].

propriétés, représentées par des *grandeurs physiques*, des systèmes qu'elle étudie. Toutefois cette définition laisse le champ libre à plusieurs acceptions des notions de "traitement théorique" ou de "grandeurs physiques", et il est vrai, si nous parlons de la théorie quantique, que ces acceptions doivent faire la place à des déterminations probabilistes de grandeurs conçues comme des champs de "potentialité". Toutefois cette terminologie est en elle-même peu claire, du moins quant au langage, car pour ce qui est du formalisme théorique, il ne présente pas, en soi, d'ambiguïté.

Mais que nous soyons renvoyés, en fin de compte, à de telles notions, n'implique-t-il pas comme une sorte de point aveugle de la mécanique quantique, qui touche à la difficulté de formuler distinctement certaines de ses propositions fondamentales? En ce sens toute clarification notionnelle ou logique des concepts rencontrés apparaît comme un préalable nécessaire. Celles sur la non-localité⁷² illustrent, par leur difficulté à conclure, la persistance d'obscurités conceptuelles. La non-localité, même si elle est rendue plus claire — du moins du point de vue de sa définition et de ses implications théoriques — par les considérations qui précèdent, n'est pas vraiment dissociable des problèmes de l'observation et de la mesure, où résident pour l'essentiel ces obscurités: qu'on se reporte aux définitions invoquées de la localité par Einstein et par Bell.⁷³

Il s'agissait de garantir *l'indépendance de chacun des sous-systèmes par rapport à ce qu'il peut advenir à l'autre* après qu'ils se soient séparés spatialement. Une telle définition apparaît liée en premier lieu à la possibilité même de décrire les sous-systèmes en question et, en deuxième lieu, à ce qui leur advient, c'est-à-dire à la détermination, par l'opération de mesure, des grandeurs physiques qui leur sont affectées. La difficulté est de dissocier ces deux considérations. Admettons un instant que cela soit possible et raisonnons en nous en tenant à la description des systèmes supposés exister indépendamment de notre observation. Soit [dénommons (1) cette proposition], la définition ci-dessus de la localité concerne des sous-systèmes *définissables indépendamment* l'un de l'autre une fois qu'ils sont séparés spatialement (séparabilité locale) et les inégalités de Bell s'appliquent (c'est le cas de tous les systèmes macroscopiques et non-quantiques); si de tels systèmes définis séparément entretenaient une corrélation qui viole les inégalités de Bell, il faudrait conclure à l'existence d'une interaction instantanée à distance entre eux. Soit [proposition (2)] elle concerne des sous-systèmes *d'un système quantique initial* et alors, pour être opératoire, elle supposerait la possibilité de décrire indépendamment l'un de l'autre les sous-systèmes (mais dans ce cas ce ne seraient plus des

⁷²Voir, p. ex., d'Espagnat (1981) et Heywood et Redhead (1983).

⁷³Voir la deuxième section de ce travail.

sous-systèmes quantiques, qui ne sont pas définis séparément); si de tels sous-systèmes existaient séparément, ils violeraient certes les inégalités de Bell et l'on pourrait parler d'interaction instantanée à distance entre eux, comme dans le cas de la proposition (1). Mais si l'on admet que les systèmes de la proposition (2) sont définis par la mécanique quantique et par elle seule (et comment faire autrement, d'après ce qu'on a dit plus haut et sans supposer une superthéorie ou un superlangage qui édicterait une définition différente des systèmes en question), alors il n'est pas possible de parler de définition séparée, indépendante, des sous-systèmes, et la question d'interaction à distance ne se pose aucunement (ce serait une interaction entre quoi et quoi)? La non-séparabilité locale apparaît même, précisément, définitoire des sous-systèmes sous ce rapport.⁷⁴ La description quantique s'effectue, jusqu'ici, sans référence explicite ou contraignante à la notion d'espace: à ce stade, le terme de non-localité n'est pas opératoire et comme c'est la mécanique quantique seule et non l'espace de configuration qui est concernée, c'est le terme de non-séparabilité (des sous-systèmes) qui indique le mieux ce qui est en question. La non-localité ne se rend manifeste que lorsqu'on se préoccupe de localiser dans l'espace des parties de ce système, et cette opération fait intervenir la mesure au sens quantique. D'ailleurs, le critère par lequel on conclut à la non-localité du système étudié (au sens de la non-séparabilité locale) ne s'en tient pas à la description ou désignation abstraite des systèmes mais porte sur la détermination même de leur état, obtenue par la mesure: voir la dérivation du théorème de Bell, et l'expression des quantités mesurées dans les expériences de corrélation à distance. Si le système est indissociable en deux sous-systèmes séparés et indépendants l'un de l'autre, mesurer l'un de ces sous-systèmes c'est mesurer l'autre en même temps, et c'est de cet état de choses que résultent les corrélations strictes observées, qui ne doivent pas être transcrites en termes de transmission d'information;⁷⁵ et, la relativité restreinte n'étant pas concernée, on peut parler à propos de cette dernière et de la mécanique quantique de "coexistence pacifique".⁷⁶ Ceci, du moins, pour autant que nous fassions abstraction du phénomène proprement dit de la mesure qui porte l'état de ce système à notre connaissance en le projetant dans les conditions macroscopiques qui comprennent l'espace de configuration. Ce sont les conditions de cette projection que nous ne comprenons pas bien: c'est tout le problème d'une théorie quantique de la mesure. Cette dernière constitue l'un des "axiomes" de la mécanique quantique, mais c'est un axiome qui a davantage les apparences d'une règle pratique que d'un principe fondamental. On est tenté de penser que c'est à ce niveau que se manifestent les doutes les plus

⁷⁴Je l'ai indiqué dans Paty (1982b, 1986).

⁷⁵Shimony parle, dans ce sens, de "non-localité incontrôlable" (Shimony, 1984); cf. aussi Redhead (1983).

⁷⁶Shimony (1984) et Redhead (1983).

sérieux sur la complétude de la mécanique quantique. La non-séparabilité locale nous renvoie, en tout état de cause, à ce problème qui lui est inhérent, et notre essai de clarification des concepts se heurte à cette limite. Ce n'est pas notre propos d'aborder ici ce problème bien spécifique.⁷⁷

Nous n'avons certes pas épuisé les problèmes épistémologiques de la physique quantique en tentant de clarifier quelque peu la notion de non-séparabilité locale ou non-localité. Nous entrevoyons peut-être comment ceux qui demeurent se trouvent déplacés par rapport à ce problème. Des auteurs persistent à vouloir expliquer la non-localité par des modèles d'action mécanique, soit en invoquant une violation de la causalité relativiste qui entraînerait la possibilité d'actions où la cause suit l'effet (mais, ce faisant, on applique des équations sans aucun discernement critique sur la signification physique des grandeurs considérées),⁷⁸ soit en proposant des actions supraluminales sans transport d'énergie matérielle sur le mode d'un nouveau type d'éther.⁷⁹ Ce n'est pas le lieu ici de discuter ces tentatives, sinon pour indiquer qu'elles apparaissent, par rapport au problème de la localité, comme des essais de récupération *ad hoc*, justifiées en fait, dans l'esprit de leurs auteurs, par d'autres considérations.⁸⁰

Remerciements

Je remercie vivement John S. Bell pour sa lecture critique du texte qui m'a permis de l'améliorer sur plusieurs points. Je reste bien entendu seul responsable des erreurs qui auraient pu subsister.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aharonov, Yakir and Albert, David Z., States and observables in relativistic quantum field theories, *Phys. Rev.* **D21**, 3316-3324 (1980).
 Aharonov, Yakir and Albert, David Z., Can we make sense out of the measurement process in relativistic quantum mechanics? *Phys. Rev.* **D24**, 359-370 (1981).

⁷⁷Parmi les propositions les plus récentes pour clarifier le problème de la mesure dans le sens de l'objectivité, voir, p. ex., Cini *et al.* (1979) et Cini (1983). Voir aussi Gisin et Piron (1981) (mais ce dernier travail s'en tient à un plan très formel). Sur certains paradoxes de la mesure au sens de la mécanique quantique vis-à-vis de la relativité, et leur solution au moins partielle, voir Aharonov et Albert (1980, 1981).

⁷⁸Voir les nombreuses publications dans ce sens de O. Costa de Beauregard.

⁷⁹Voir les travaux de Vigier (p. ex. 1980), Garuccio et Vigier (1982), etc. . . Ces auteurs ont proposé une expérience pour démarquer la mécanique quantique et la théorie de l'onde pilote (expérience d'interférence basée sur la non-localité d'un seul photon). La signification de ce type de test a été contestée par plusieurs auteurs, qui ne pensent pas qu'il puisse départager les deux conceptions. Voir p. ex. Cantelaube (1984). Je remercie Yves Cantelaube pour une intéressante discussion sur ces arguments.

⁸⁰La théorie causale de l'onde pilote dans le cas de Vigier *et al.*

- Aspect, Alain, Proposed experiment to test the non-separability of quantum mechanics, *Phys. Rev. D* **14**, 1944–1951 (1976).
- Aspect, Alain, Expériences basées sur les inégalités de Bell, in *Implications*, pp. 63–77 (1981a).
- Aspect, Alain; Grangier, Philippe; Roger, Gérard, Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 460–463 (1981b).
- Aspect, Alain; Grangier, Philippe; Roger, Gérard, Experimental realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91–94 (1982a).
- Aspect, Alain; Dalibar, J.; Roger, Gérard, Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804–1807 (1982b).
- Aspect, Alain, *Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de polarisation de photons*, Thèse, Université de Paris-Sud, Orsay (1983a).
- Aspect, Alain, Etude expérimentale des corrélations Einstein–Podolsky–Rosen, in Gruber, pp. 385–404 (1983b).
- Baracca, Angelo; Bohm, David; Hiley, Basil; Stuart, A. E. G., On some new notions concerning locality and non-locality in the quantum theory, *Nuov. Cim.* **28B**, 453–466 (1975).
- Belinfante, Frederick J., *A Survey of Hidden-Variables Theories*, Pergamon Press, Oxford (1973).
- Belinfante, Frederick, *Measurements and Time Reversal in Objective Quantum Theory*, Pergamon Press, Oxford (1975).
- Belinfante, Frederick J., Can individual particles have individual properties? *Am. J. Phys.* **46**, 329–336 (1978).
- Bell, John S., On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox, *Physics* **1**, 195–200 (1964).
- Bell, John S., On the problem of hidden variables in quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **38**, 447–452 (1966).
- Bell, John S., Introduction to the hidden-variable question, in d'Espagnat, pp. 171–181 (1971).
- Bell, John S., Subject and object, in Mehra, pp. 687–690 (1973).
- Bell, John S., On wave packet reduction in the Coleman–Hepp model, *Helv. Phys. Acta* **48**, 93–98 (1975).
- Bell, John S., Einstein and hidden variables, in *Proceedings of the Symposium on Frontiers Problems in High Energy Physics, in Honour of Gilberto Bernardini, on his 70th birthday*, Scuola Normale Superiore, Pisa, pp. 42–45 (1976a).
- Bell, John S., The measurement theory of Everett and de Broglie's pilot wave, in *Quantum Mechanics, Determinism, Causality and Particles* (Edited by M. Hato et al.), pp. 11–17, Reidel, Dordrecht (1976b).
- Bell, John S., Quantum mechanics for cosmologists, invited talk at *Quantum Gravity Conference*, Oxford (1981).
- Bell, John S., On the impossible pilot wave, *Found. Phys.* **12**, 989–999 (1982).
- Bell, John S., Bertlmann's socks and the nature of reality, *Implications*, pp. 41–62 (1981).
- Berthelot, André, Comments on determinism, locality, Bell's theorem and quantum mechanics, *Nuov. Cim.* **57B**, 193–226 (1980).
- Bitsakis, Eftichios (ed.), *The Concept of Physical Reality*, Zacharopoulos, Athens (1983).
- Bohm, David, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1951).
- Bohm, David, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables, *Phys. Rev.* **85**, 166–179, 180–193 (1952).
- Bohm, David and Aharonov, Yakir, Discussion of experimental proof for the paradox of Einstein, Rosen and Podolsky, *Phys. Rev.* **108**, 1070–1076 (1957).

- Bohm, David, *Causality and Chance in Modern Physics* (1957). Routledge & Kegan Paul, London, 1967.
- Bohm, David, Hidden variables in the quantum theory, in *Quantum Radiation and High Energy Physics* (Edited by D. R. Bates), part B, Academic Press, New York (1962); reprinted in Bohm, pp. 65–110 (1980).
- Bohm, David, On a new mode of description in physics, *Int. J. theor. Phys.* **3**, 171 (1970).
- Bohm, David, Quantum theory as an indication of a new order in physics, Part. A: The development of new orders as known through the history of physics, *Found. Phys.* **1**, 359–381 (1971); reprinted in Bohm pp. 111–139 (1980b).
- Bohm, David, Quantum theory as an indication of a new order in physics. Part. B: Implicate and explicate order in physical law, *Found. Phys.* **3**, 139–168 (1973); reprinted in Bohm, 140–171 (1980).
- Bohm, David and Hiley, Basil J., On the intuitive understanding of non-locality as implied by quantum theory, *Found. Phys.* **5**, 93–109 (1975); reprinted in Leite Lopes and Paty pp. 207–222 (1977).
- Bohm, David and Hiley, Basil J., Einstein and non-locality in the quantum theory, in *Einstein, the First Hundred Years* (Edited by Goldman, McKay and Woudhysen), Pergamon Press, Oxford (1980a).
- Bohm, David, *Wholeness and the Implicate Order*, Routledge & Kegan Paul, London (1980b).
- Bohm, David and Hiley, Basil J., Non-locality in quantum theory understood in terms of Einstein's non-linear field approach, *Found. Phys.* **11**, 529–546 (1981a).
- Bohm, David and Hiley, Basil J., On a quantum algebraic approach to a generalised phase space, *Found. Phys.* **11**, 179–203 (1981b).
- Bohm, David and Hiley, Basil J., On the Aharonov–Bohm effect, *Nuov. Cim.* **A52**, 295–308 (1979).
- Bohr, Niels, *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge University Press, Cambridge (1934); re-ed. (1941). Trad. fr. *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Gauthiers-Villars, Paris (1961).
- Bohr, Niels, Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* **48**, 696–702 (1935).
- Bohr, Niels, Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics, in Schilpp, pp. 199–242 (1949); trad. fr. dans Bohr, (trad. 1964), pp. 55–108 (1958).
- Bohr, Niels, *Atomic Physics and Human Knowledge*, New York (1958); *Physique atomique et connaissance humaine* (trad. fr. 1961, par E. Bauer et R. Omnes), Gauthiers-Villars, Paris (1961); Conthier, Genève (1964).
- Bohr, Niels, The Solvay meetings and the development of quantum physics, in *La théorie quantique des champs, Douzième Conseil de Physique Solvay, Bruxelles, 9–14 octobre 1961*, pp. 13–36. Interscience/Stoops, New York/Bruxelles (1962).
- Bohr, Niels, *Essays 1958–1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, Interscience, New York (1963).
- De Broglie, Louis, Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférences et de diffraction à la théorie des quanta de lumière. *C.-r. hebdom. Séanc. Acad. Sci., Paris* **183**, 447–448 (1926).
- De Broglie, Louis, La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire, *ibid.* **184**, 273 (1927).
- De Broglie, Louis, La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement, *J. phys. le radium, série 6*, **8**, 225–241 (1927).
- Louis de Broglie, *physicien et penseur*, Albin Michel, Paris (1953).

- De Broglie, Louis, *Tentative d'interprétation causale et non-linéaire de la mécanique ondulatoire*, Gauthiers-Villars, Paris (1956).
- Brown, Harvey R., O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica, *Cadern. Hist. fil. ciênc.* **2**, 51-89 (1981).
- Brown, Harvey R. and Redhead, Michael, A critique of the disturbance theory of indeterminacy in quantum mechanics, *Found. Phys.* **11**, 1-20 (1981).
- Bunge, Mario, (ed.), *Quantum Theory and Reality*, Springer-Verlag, Berlin (1967a).
- Bunge, Mario, A ghost-free axiomatisation of quantum mechanics, in Bunge, pp. 105-117 (1967b).
- Bunge, Mario, *Foundation of Physics*, Springer-Verlag, Berlin (1967c).
- Bunge, Mario, (ed.), *Delaware Seminars in the Foundation of Physics*, Springer-Verlag, Berlin (1967d).
- Bunge, Mario; Halbwachs, Francis; Kuhn, Thomas S.; Piaget, Jean; Rosenfeld, Léon, *Les théories de la causalité*, Presses Univ. de France, Paris (1971a).
- Bunge, Mario, Conjonction, succession, détermination, causalité, in Bunge *et al.*, pp. 112-132 (1971b).
- Bunge, Mario, *Philosophy of Physics*, Reidel, Dordrecht (1973); trad. fr. par Françoise Balibar, *Philosophie de la Physique*, Seuil, Paris (1975).
- Cantelaube, Yves, Possible experimental tests of photon non-locality from one-photon state, *Phys. Lett.* **101A**, 7-10 (1984).
- Chevalley, Catherine, Une nouvelle science, in *Troublante mécanique quantique*, p. 18-25 (1984).
- Cini, Marcello; De Maria, M.; Mattioli, G.; Nicolò, F., Wave packet reduction in quantum mechanics. A model of measuring apparatus, *Found. Phys.* **9**, 479-500 (1979).
- Cini, Marcello, Quantum theory of measurement without wave packet collapse, *Nuov. Cim.* **73B**, 27-56 (1983).
- Clauser, John F., Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect, *Phys. Rev.* **D9**, 853-860 (1974).
- Clauser, John F.; Horne, M. A.; Shimony, A.; Holt, R. A., Proposed experiment to test local hidden-variable theories, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880-884 (1969).
- Clauser, John F. and Shimony, Abner, Bell's theorem: experimental tests and implications, *Rep. Progr. Phys.* **41**, 1881-1927 (1978).
- Colodny, Robert G., (ed.), *Paradigms and Paradoxes, the Philosophical Challenge of the Quantum Domain*, University of Pittsburgh Press, Pittsburgh (1972).
- Costa de Beauregard, Olivier, Les duellistes Bell et Clauser-Horne-Shimony s'aveuglent en refusant la "causalité rétrograde" inscrite en clair dans le formalisme, *Lettres épistémologiques* (Bienne), 1-8 (1977).
- Cronin, James, Le système $K^0-\bar{K}^0$, in Gruber, pp. 405-422 (1983).
- Cufaro Petroni, Nicola and Vigier, Jean-Pierre, Dirac's aether in relativistic quantum mechanics, *Found. Phys.* **13**, 253-286 (1983).
- Dagenais, M. and Mandel, L., Investigation of two-time correlations in photon emissions from a single atom, *Phys. Rev.* **A18**, 2217-2228 (1978).
- Dirac, Paul A. M., *The Principles of Quantum Mechanics* (1930). 4th ed. revised (1958), Clarendon Press, Oxford (1981).
- Duhem, Pierre, *La théorie physique. Son objet, sa structure* (1906); 2ème éd., augmentée de "Physique de croyant" et de "La valeur de la théorie physique" (1914); réed., Vrin, Paris (1981).

- Eberhard, P. H., Bell's theorem without hidden variables, *Nuov. Cim.* **38B**, 75–80 (1977).
- Einstein, Albert; Podolsky, Boris; Rosen, Nathan, Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* **47**, 777–780 (1935).
- Einstein, Albert, Autobiographisches-Autobiographical notes (1946), in Schilpp, pp. 1–96. Trad. fr. par Frédérique Lab, *Autoportrait*, Interéditions, Paris (1980).
- Einstein, Albert, Reply to criticism, in Schilpp, pp. 665–688 (1949).
- Einstein, Albert and Born, Max, *Briefwechsel 1916–1955* (1969); trad. fr. par Pierre Leccia, *Correspondance 1916–1959*, Seuil, Paris (1972).
- Einstein, Albert et Besso, Michele (1972), *Correspondance*, trad. fr. par P. Speziali, Hermann, Paris (1972); réed. (1979).
- Einstein, Albert et de Broglie, Louis (1979), *Correspondance, Annales de la Fondation Louis de Broglie*, **4**(1), pp. 53–61 (1979).
- Electrons et photons: Rapports et discussions du cinquième Conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l'Institut international de Physique Solvay*. Gauthier-Villars, Paris (1928).
- D'Espagnat, Bernard, (ed.), *Foundations of Quantum Mechanics. Proc. International School of Physics Enrico Fermi, Course XLIX*, Academic Press, New York (1971a).
- D'Espagnat, Bernard, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*. Benjamin, Menlo Park, CA (1971b); 2nd revised ed., Benjamin, Reading, MA (1976).
- D'Espagnat, Bernard, *A la recherche du réel, le regard d'un physicien*. Gauthier-Villars, Paris (1979).
- D'Espagnat, Bernard, Théorie quantique et réalité, *Pour la Science*, n°27, 72–87 (1980).
- D'Espagnat, Bernard, Explications d'objections à certaines thèses d'Olivier Costa de Beauregard, *Lettres Épistémologiques*, 9–28 (1981a).
- D'Espagnat, Bernard, The concepts of influence and of attributes as seen in connexion with Bell's theorem, *Found. Phys.* **11**, 205–234 (1981b).
- D'Espagnat, Bernard, Nonseparability and the tentative descriptions of reality, *Phys. Rep.* **110**, 201–264 (1984).
- Everett, Hugh III, Relative State formulation of quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 454–462 (1957).
- Feynman, Richard; Leighton, R. B.; Sands, M., *The Feynman Lectures on Physics*, 3 vols. Addison-Wesley, Reading, MA (1965).
- Frescura, F. A. M. and Hiley, Basil J., The algebraization of quantum mechanics and the implicate order, *Found. Phys.* **10**, 705–722 (1980).
- Froissart, Marcel, Constructive generalization of Bell's inequalities, *Nuov. Cim.* **64B**, 241–251 (1981).
- Garuccio, Augusto, Generalized inequalities following from Einstein locality, *Lett. Nuov. Cim.* **23**, 559–565 (1979).
- Garuccio, Augusto and Vigier, Jean-Pierre, Possible experimental test of the causal stochastic interpretation of quantum mechanics: physical reality of the de Broglie waves, *Found. Phys.* **10**, 797–801 (1980).
- Garuccio, Augusto; Rapisarda, Vittorio; Vigier, Jean-Pierre, New experimental set-up for the detection of De Broglie waves, *Phys. Rev. Lett.* **90A**, 17 (1982).
- Gisin, Nicolas et Piron, Constantin, Collapse of the wave packet without mixture, *Lett. math. Phys.* **5**, 379–385 (1981).
- Gruber, C., Piron, C., M. T. and Weill, R. (eds), *Les fondements de la mécanique quantique*, Ass. Vaudoise des chercheurs en physique, Lausanne (1983).

- Heisenberg, Werner, *La partie et le tout* (original allemand 1969), trad. fr. Paul Kessler, Albin Michel (Paris).
- Hepp, Klaus, Quantum theory of measurement and macroscopic observables, *Helv. Phys. Acta* **45**, 237–248 (1972).
- Heywood, Peter and Redhead, Michael L. G., Non-locality and the Kochen–Specker paradox, *Found. Phys.* **13**, 481–499 (1983).
- Hoffmann, Banesh et Paty, Michel, *L'étrange histoire des quanta*, Seuil, Paris (1981).
- Hooker, Clifford A., The nature of quantum mechanical reality: Einstein versus Bohr, in Colodny, pp. 67–302 (1972).
- Les Implications conceptuelles de la physique quantique. Supplément au J. Phys.* **42**, Colloque C2, 1–118 (1981).
- Jammer, Max, *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, John Wiley, New York (1974).
- Jammer, Max, Le paradoxe d'Einstein–Podolsky–Rosen, *La Recherche* **11**, 510–519 (1980).
- Jánossy, L. and Naray, Zs., Investigation into interference phenomena at extremely low intensities by means of a large Michelson interferometer, *Nuov. Cim. Suppl.* **9**, 588–598 (1958).
- Jauch, J. M. and Piron, C., Can hidden variables be excluded in quantum mechanics? *Helv. Phys. Acta* **36**, 827–837 (1963).
- Kastler, Alfred, On the historical development of the indistinguishability concept for microparticles, in *Old and New Questions in Physics, Cosmology, Philosophy and Theoretical Biology. Essays in the Honour of Wolfgang Yourgrau* (Edited by A. van der Merwe), Plenum Press, New York (1981).
- Langevin, Paul, *La notion de corpuscule et d'atomes*, Réunion internationale de Chimie-Physique 1933, XVI, Hermann, Paris (1934).
- Langevin, Paul, Les courants positivistes et relativistes dans la philosophie de la physique, *Nouv. Théor. Phys.* 231–247 (1938).
- Langevin, Paul, La physique moderne et le déterminisme, *La Pensée* no. 1, 1–14 (1939).
- Leite Lopes, José et Paty, Michel (eds), *Quantum Mechanics, a Half Century Later*, Reidel, Dordrecht (1977).
- Lochak, Georges, La non-séparabilité substitut moderne de l'indéterminisme copenhaguien, in Bitsakis, pp. 111–128 (1983).
- Margenau, Henry, Philosophical problems concerning the meaning of measurement in physics, *Philos. Sci.* 25 (1958); repr. in Margenau, pp. 199–210 (1978).
- Margenau, Henry, *Physics and Philosophy: Selected Essays*, Reidel, Dordrecht (1978).
- Margenau, Henry and Park, James H., Objectivity in quantum mechanics, in Bunge, pp. 161–187 (1967).
- Mehra, Jagdish, (ed.), *The Physicist Conception of Nature*, Reidel, Dordrecht (1973).
- Mehra, Jagdish, *The Solvay Conference on Physics*, Reidel, Dordrecht (1975).
- Mugur-Schächter, Mioara, Elucidation of the probabilistic structure of quantum mechanics and definition of a compatible joint probability, *Foundat. Phys.* **13**, 419–465 (1983).
- Nouv. Théor. Phys., *Les nouvelles théories de la physique*, Réunion de l'Institut de coopération intellectuelle, Varsovie, 30 mai–3 juin 1938, Coll. Scientifique, Institut International de Coopération Intellectuelle, Paris (1939).
- Pais, Abraham, Einstein and the quantum theory, *Rev. mod. Phys.* **51**, 861–914 (1979).
- Paty, Michel, Les tentatives récentes de vérification de la mécanique quantique, *Cah. Fund. Sci.* **39**, 1–38 (1974).

- Paty, Michel, The recent attempts to verify quantum mechanics, in Leite Lopes and Paty, pp. 261–289 (1977).
- Paty, Michel, Les contributions d'Einstein à la première théorie des quanta, *Bull. Union Phys.* **631**, 693–709 (1981a).
- Paty, Michel, Nouveaux voyages au pays des quanta, in Hoffmann et Paty, pp. 195–274 (1981b).
- Paty, Michel, Interventions, in *Implications*, pp. C2 37–40, 78–80, 96–98, 109–111, 116–118 (1981c).
- Paty, Michel, L'inséparabilité quantique en perspective, *Fund. Sci.* **3**, 79–92 (1982a).
- Paty, Michel, La notion de programme épistémologique et la physique contemporaine, *Fund. Sci.* **3**, 321–336 (1982b).
- Paty, Michel, Eléments d'histoire des idées sur la théorie quantique jusqu'à l'argument EPR, in Gruber et al. pp. 9–48 (1983).
- Paty, Michel, Einstein dans la tempête (les critiques d'un père fondateur), in *Troublante mécanique quantique*, pp. 26–33 (1984a).
- Paty, Michel, *La matière dérobée*, Ed. fr. Archives Contemporaines, Paris (1984b).
- Pauli, Wolfgang, Einstein's contributions to quantum theory, in Schilpp, pp. 147–160 (1949).
- Peres, Asher, Unperformed experiments have no results, *Am. J. Phys.* **46**, 745–747 (1978).
- Pflegor, R. L. and Mandel, L., Interference of independent photon beam, *Phys. Rev.* **159**, 1084–1088 (1967).
- Popper, Karl, Quantum mechanics without "the observer", in Bunge pp. 7–44 (1967b).
- Popper, Karl, *The Logic of Scientific Discovery* (1959, réed. 1968), trad., augm. et revue par l'auteur, de *Logik der Forschung* (1935). Trad. française, *La logique de la découverte scientifique* (1973), par Nicole Thyssen-Ruthen et Philippe Devaux, Payot, Paris (1973).
- Popper, Karl, *Objective Knowledge. An Evolutionary Approach*, Clarendon Press, Oxford (1974).
- Popper, Karl, *Quantum Theory and the Schism in Physics, from the Postscript to the Logic of Scientific Discovery* (1956), 1st publ., edited by W. W. Bartley III, Hutchinson, London (1982).
- Rauch, H., Tests of quantum mechanics by neutron interferometry, in Gruber, pp. 329–370 (1983).
- Redhead, Michael, Non-locality and peaceful coexistence, in Swinburne, pp. 151–189 (1983).
- Schilpp, Paul-Arthur, (ed.), *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, The library of living philosophers, Evanston (1949).
- Selleri, Franco, On the direct observability of quantum waves, *Found. Phys.* **12**, 1087–1112 (1982).
- Selleri, Franco, Quantum reality as an empirical problem, in Bitsakis, pp. 131–151 (1983).
- Selleri, Franco and Tarozzi, Gino, Quantum mechanics reality and separability, *Riv. Nuov. Cim.* **4**(2), 1–53 (1981).
- Shimony, Abner, Controllable and non-controllable non-locality, préirage (1983).
- Stachel, John, Einstein and the quantum: fifty years of struggle, in R. G. Colodny (ed.), *From Quarks to Quasars*, Pittsburgh University Press, Pittsburgh (1986a).
- Stachel, John, Quantum logic, in R. G. Colodny (*ibid.*).
- Stapp, Henry P., S-matrix interpretation of quantum theory, *Phys. Rev. D*, **3**, 1303–1320 (1971).
- Stapp, Henry, Locality and reality, *Found. Phys.* **10**, 767–795 (1980).
- Stapp, Henry, Mind, matter and quantum mechanics, *Found. Phys.* **12**, 363–399 (1982).
- Steyerl, A., Quasi-bound states of the neutron, in Gruber, pp. 371–384 (1983).

- Swinburne, R., (ed.), *Space, Time and Causality*, Reidel, Dordrecht (1983).
- Tarozzi, Gino, On the relevance of the realist assumption in the proof of Bell inequality, *Mem. Accad. naz. Sci. Lett. Arti Modena*, ser. VI, **22-23**, 81-86 (1980-81).
- Troublante mécanique quantique (La grande querelle des physiciens)*, *Science et Avenir*, numéro spécial, no. 46 (1984).
- Vigier, Jean-Pierre, De Broglie waves on Dirac aether: a testable experimental assumption, *Lett. Nuov. Cim.* **29**, 467-475 (1980).
- Vigier, Jean-Pierre, Le débat Bohr-Einstein, in Bitsakis, pp. 51-109 (1983).
- Von Neumann, John, *Die mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932), Springer Verlag, Berlin (1932); trad. fr. par Alexandre Proca, *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, Presses Univ. de France, Paris (1947).