

SÉMINAIRE DE PHILOSOPHIE ET MATHÉMATIQUES

MICHEL PATY

L'inséparable quantité en perspective. Corrélations à distance, théorie de la mesure et probabilités

Séminaire de Philosophie et Mathématiques, 1981, fascicule 11

« L'inséparable quantité en perspective. Corrélations à distance, théorie de la mesure et probabilités », , p. 1-20

http://www.numdam.org/item?id=SPHM_1981__11_A1_0

© École normale supérieure – IREM Paris Nord – École centrale des arts et manufactures, 1981, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Séminaire de philosophie et mathématiques » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

L'INSEPARABLE QUANTIQUE EN PERSPECTIVE
CORRELATIONS A DISTANCE, THEORIE DE LA MESURE
ET PROBABILITES*

par

Michel PATY

Centre de Recherches Nucléaires et
Université Louis Pasteur, Strasbourg

Cet exposé, présenté au Séminaire de Philosophie et Mathématiques,
Ecole Normale Supérieure, Paris, le 23 novembre 1981, reprend pour
l'essentiel une communication présentée au Colloque Popper et la
Science d'aujourd'hui, Cerisy-la-Salle, juillet 1981.

Dans une première partie, je m'efforcerai de procéder à une mise en perspective de la question de l'inséparabilité quantique : mise en perspective d'ordre historique et épistémologique, qui montrera la décantation et la démarcation des aspects respectivement physique et philosophique de ce problème.

Dans la deuxième partie, je m'attacherai à diverses considérations sur la manière de penser l'inséparabilité, dans une philosophie réaliste critique préservant l'objectivité. Je montrerai comment cette question est à rapporter à la signification d'une théorie quantique de la mesure et notamment à une interprétation objective des probabilités.

J'aimerais commencer par quelques remarques préliminaires.

La mécanique quantique, telle qu'elle est mise en oeuvre depuis sa naissance dans les branches les plus diverses de la physique contemporaine, n'a cessé de s'éprouver contre les faits d'expérience avec un succès remarquable. Le champ de ses mises en défaut possibles est immense ; or, toutes les expériences faites à ce jour la corroborent. Toutefois, l'on se pose encore à son sujet la question de savoir si cette théorie est bien complète. Il faut, bien entendu, distinguer entre une théorie complète et une théorie définitive : même ses partisans les plus acharnés ne pensent pas que la théorie quantique soit une théorie définitive et les physiciens de ce temps, sont à cet égard plus modestes - ou sceptiques - que ceux de l'époque, point si lointaine, où la physique classique paraissait au faite de son achèvement. Certes, la mécanique quantique constitue, par ses concepts, ses axiomes ou principes, et son formalisme, le noyau et le cadre de toute théorie physique de la matière : mais elle n'épuise pas de telles théories, puisqu'elle n'est pas par elle-même une dynamique. L'électrodynamique quantique et les théories plus récentes des autres champs de force ne se réduisent pas à la mécanique quantique dans sa formulation bien établie (1), et se présentent comme des constructions théoriques effectuées à partir d'elle. Mais ces constructions, dans leur processus tâtonnant, n'interrogent nullement - pour l'instant - la complétude de la mécanique quantique, dont elles adoptent fondamentalement les principes. (Bien qu'elles posent toutefois le problème de la juxtaposition des conceptions quantiques et des exigences relativistes, si hétérogène comme on sait). Aucun corps de théorie ne justifie mieux, semble-t-il, que celles-ci, l'assertion du Duhem-Quine sur l'impossibilité d'en

tester séparément les parties : ici, non seulement le noyau théorique, mais encore l'une ou l'autre de ses propositions fondamentales. Passé le cap de son premier établissement, la mécanique quantique échapperait-elle à la possibilité de se voir falsifiée ? Sous cette forme provocante, la question qui se profile est celle de la stabilité des conceptions qui sont à la racine de la théorie quantique, et qui paraissent bien modeler désormais l'approche de la connaissance en physique. Pourtant, ces conceptions, précises sur le plan formel, s'entourent d'un certain flou quant à ce qu'il est convenu d'appeler l'"interprétation". Par-delà le formalisme et la construction théorique, le panorama des idées quantiques semble marqué par une ambiguïté de la problématique, ou au moins de son vocabulaire, telle que l'on passe, semble-t-il, sur certaines questions de fond, indistinctement d'une formulation physique à une formulation philosophique et inversement.

Or, en vérité, la distinction est possible : le cas du concept d'inséparabilité en témoigne de façon exemplaire. Les développements auxquels il a donné lieu depuis l'établissement de la mécanique quantique ont permis précisément de résoudre l'ambiguïté et de donner la netteté à l'image qui était floue, en centrant distinctement les deux foyers, l'un physique, l'autre philosophique, de sa problématique.

C'est à cette décantation, à cette résolution des deux termes de la problématique, que je voudrais me consacrer ici, en suivant le cheminement qui mène de l'idée de corrélation quantique à distance (paradoxe EPR) à la signification des tests expérimentaux de l'inséparabilité quantique c'est-à-dire à l'interprétation de l'inséparabilité.

L'IDEE DE CORRELATION A DISTANCE DANS LE DEBAT ENTRE LE REALISME DETERMINISTE ET L'INTERPRETATION ORTHODOXE

Le paradoxe soulevé en 1935 par Einstein, Podolski et Rosen (paradoxe EPR) (2), qui aboutit à mettre en évidence le concept spécifiquement quantique de non-séparabilité, se situe dans une problématique de l'interprétation de la mécanique quantique par opposition à une problématique de la construction où sont apparus d'autres concepts comme l'indiscernabilité, ou des concepts provisoires comme

la dualité onde-corpuscule. Ce trait lui est commun avec la conception quantique de la mesure, avec laquelle il a partie liée. La première question qui se pose de façon évidente est donc celle de savoir si le paradoxe - et la question de l'inséparabilité qui le prolonge et le résoud - est de nature physique ou épistémologique. Cette imbrication, voire cette confusion, se présente d'emblée en raison de l'absence de clarté épistémologique sur la signification et la portée des conceptions quantiques. Il s'agissait, pour Einstein et ses collaborateurs, de s'interroger sur la complétude de la théorie quantique à partir de la signification des relations de Heisenberg, dites d'incertitude ou d'indétermination : ces relations expriment l'impossibilité de connaître simultanément, pour un système quantique, les valeurs de deux variables conjuguées telles que la position et l'impulsion, ou des composantes différentes du moment angulaire. Pour Einstein, qui revendiquait une conception réaliste et déterministe de la théorie physique, cet état de chose manifestait le caractère insatisfaisant) incomplet, mais non pas inexact - de la mécanique quantique. L'énoncé du paradoxe EPR se situe dans le débat fameux qui le mit aux prises avec Bohr : débat fécond, comme on sait, et qui, par cette dernière péripétie, devait mettre en lumière ce concept d'importance capitale de la théorie quantique, l'inséparabilité.

La théorie quantique n'est pas complète, proclamaient en substance Einstein et ses collaborateurs, car elle échoue à représenter tous les éléments de la réalité physique. Ces derniers étaient caractérisés par le critère suivant : "si, sans perturber aucunement un système, nous pouvons prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette quantité physique"(3) . Il s'agissait, par l'énoncé d'un tel critère d'apparence très générale, de dépasser la fin de non-recevoir opposée généralement par les représentants de l'école de Copenhague aux objections émises jusqu'alors à l'encontre du principe d'incompatibilité des variables conjuguées. En effet, la réponse communément donnée à ces objections était que, si les quantités conjuguées ne peuvent être connues simultanément, cela est dû essentiellement à la perturbation engendrée par l'observation ou la mesure. Cette réponse, illustrée par de multiples expériences imaginaires proposées par Heisenberg à l'appui des relations d'indétermination, était parfaitement cohérente

avec l'ensemble des idées de l'école de Copenhague, puisqu'elle rapportait la caractérisation des systèmes quantiques à la possibilité de leur approche par les instruments et la pensée classiques. Elle ne pouvait que laisser insatisfaits les partisans d'une conception réaliste, pour laquelle les systèmes physiques "microscopiques" doivent être considérés en eux-mêmes, d'une manière objective et déterministe (c'est-à-dire que leurs lois ne doivent rien à l'influence ou au choix d'un point de vue de l'observateur). C'est précisément l'intérêt du critère exprimé par EPR de proposer un moyen de penser un élément d'un système physique sans le ramener à une opération directe de mesure.

Considérons donc, avec Einstein, Podolski et Rosen, l'expérience de pensée suivante : soit un système M (molécule) se scindant en deux sous-systèmes (atomes) A et B. Ces deux particules s'éloignent l'une de l'autre de telle sorte qu'elles n'entretiennent bientôt plus d'interaction entre elles : une fois séparées, toute mesure sur l'une ne peut influencer sur l'autre, à moins de télépathie (4) (ou, évidemment, de transmission d'une influence physique se propageant à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière). Si l'on mesure l'impulsion - ou une composante du spin (5) - de la particule B, la particule A ne sera pas informée de cette opération. Mais il existe une corrélation, classique, très générale, entre les particules A et B, qui résulte des lois de conservation rigoureuses entre les quantités (impulsion, moment angulaire ou spin) du système initial et de l'ensemble des sous-systèmes finals : quel que soit le moment où l'on mesure l'impulsion de B, celle de A lui est évidemment corrélée ($P_A = -P_B$ si $P_M = 0$). Il s'ensuit que, aussi distantes que soient les particules A et B l'une de l'autre, la mesure de B nous informe, sans perturber A, de la valeur de son impulsion. L'impulsion de A est donc un élément de réalité physique selon le critère EPR. Aucune mesure sur A n'ayant été effectuée, nous sommes libres de mesurer par exemple sa position. Or la mécanique quantique prétend que la connaissance simultanée de ces deux quantités conjuguées pour A est impossible, c'est-à-dire que la mesure de la position de A interdit la connaissance de son impulsion, bien que celle-ci ait pu être prédite sans aucune mesure qui l'eût perturbée, c'est-à-dire bien qu'elle corresponde à un élément de réalité. D'où le paradoxe, signalant aux yeux d'EPR un grave défaut d'incomplétude de la mécanique quantique, qui échoue à rendre compte de tous les éléments de la réalité physique.

Notons ici l'intérêt de l'idée de corrélation distante, qui permet aux auteurs du paradoxe de mettre en défaut l'explication traditionnelle de l'incompatibilité des variables en termes de perturbation par l'acte d'observation, explication qui s'apparente à une "réponse passe-partout", et occulte la nature physique de la question posée par une prise de position philosophique sur la nature de la connaissance. L'introduction de cette idée apparaît comme une première étape, dans le développement du débat, de la décantation du mélange physique/philosophique de la problématique. (Une étape ultérieure, nous le verrons, sera l'introduction par Bell du critère de localité, qui permettra de passer d'une expérience imaginaire à une expérience effective ; critère qui précise en fait le contenu physique de l'idée de corrélation). Il n'est pas sans intérêt de noter que l'on trouve cette idée de corrélation dans un travail erroné de Popper (6).

Bohr répliqua immédiatement à l'objection en invoquant l'inséparabilité des deux sous-systèmes de l'état final (7). Toutefois sa formulation n'était pas claire, toute imprégnée qu'elle était de sa conception de l'observation. Ce qui est en cause, selon Bohr, dans le critère proposé par Einstein et ses collaborateurs, c'est l'expression "sans perturber aucunement le système". En effet, si les deux systèmes ne sont pas séparés, au point de n'en constituer qu'un seul, une mesure sur l'un est une mesure de leur système commun ; l'inséparabilité des systèmes est celle de leurs fonctions d'ondes, qui les représentent, et celle-ci est inscrite dans le formalisme quantique - et donc existait déjà avant l'argumentation d'EPR. Ce dernier a donc eu pour effet de débusquer l'inséparabilité, que reconnut aussitôt Bohr. Mais cette reconnaissance ne fut pas neutre, épistémologiquement, et Bohr, en l'effectuant, se référait à l'"influence des conditions précises qui définissent les types de prédictions que l'on peut faire sur l'évolution du système", conditions qui "constituent un élément inhérent à la description de tout phénomène auquel on peut valablement attribuer le qualificatif de réalité". Cette définition - assez floue, il faut bien dire - était encore très marquée par l'opérationalisme, et revenait à dire que le dispositif pour tester l'une des quantités conjuguées (relative à la particule B) était incompatible avec celui pour tester l'autre relative à la particule A). Elle s'inscrivait sans difficulté dans la perspective du principe de complémentarité et de l'acceptation orthodoxe de la notion

d'observation, en comprenant les conditions de cette dernière dans la définition des quantités observées.

Il était donc difficile, pour cette raison, que ceux qui maintenaient avec Einstein la nécessité pour une théorie physique d'être objective, fussent satisfaits d'une telle explication. Au surplus, que les deux systèmes, pourtant séparés spatialement à des distances arbitraires, n'en fissent toujours qu'un seul, était difficile à accepter pour qui considérait la nécessité de caractériser spatio-temporellement les systèmes physiques. Mais l'inséparabilité ne se ramène pas à une conception philosophique comme celle de Bohr. Elle comporte quelque chose de beaucoup plus fondamental que le choix épistémologique ci-dessus : on en voudra pour preuve - ou à tout le moins pour indice - l'évolution de la pensée de Bohr, et son élaboration de la notion de "phénomène quantique", que l'on peut voir comme une tentative de se débarrasser d'un vêtement trop étroitement opérationnaliste (8).

DE L'EXPERIENCE DE PENSEE A L'EXPERIENCE EFFECTIVE : LE CRITERE DE LOCALITE.

L'expérience de pensée qui se trouve au centre de l'argument EPR constituait un test de la cohérence de la mécanique quantique et de son interprétation : cohérence interne de son schéma logique, et cohérence de la théorie par rapport à son objet. Imaginant une expérience possible en principe, Einstein et ses collaborateurs concluaient à une contradiction, signe pour eux de l'incomplétude ; Bohr au contraire réfutait leur raisonnement dès son point de départ, c'est-à-dire récusait la légitimité même de l'expérience envisagée qui lui apparaissait non pas paradoxale, mais tautologique. Ce sur quoi les deux conceptions en présence s'opposaient fondamentalement, au travers des prémisses du raisonnement, c'était sur le rapport de la théorie physique et de son objet. Ce dernier doit-il être tel que le requiert le critère - qui définit un élément de réalité - invoqué par EPR, indépendamment des conceptions quantiques ? S'agit-il en quelque sorte, d'un critère absolu ? La non-séparabilité s'inscrit en faux contre une telle revendication. Mais, étant donné la manière

dont Bohr l'invoquait, elle pouvait paraître indissociablement liée à sa propre approche épistémologique. Comme telle, elle semblait s'opposer à tout programme ou perspective réaliste quant au rôle de la théorie physique, et ne pouvait être reçue, par les partisans d'un tel programme, comme une réponse décisive et sans appel à l'argument EPR. Il eût fallu pour cela qu'elle pût être considérée comme une propriété objective des systèmes quantiques. Que les partisans d'une perspective réaliste n'aient pu l'énoncer ainsi est significatif de l'incertitude épistémologique qui prévalait alors ; cette incertitude était liée à la question de l'"indéterminisme" et de la difficulté à interpréter objectivement la fonction d'onde (9). A l'instar des réponses à ce problème, l'acceptation de l'inséparabilité était donc considérée fondamentalement comme une affaire de choix.

La description de l'expérience de pensée ne permettait - telle est d'ailleurs la nature de ce type de raisonnement - aucune décision indépendante des conceptions épistémologiques adoptées. Ceux pour qui la mécanique quantique est objet de soupçon, pour des raisons notamment - mais pas seulement - liées aux ambiguïtés de l'interprétation pouvaient se sentir fondés à persister dans leur refus de la non-séparabilité. A l'inverse, les partisans de la complétude - sinon définitive, du moins relative aux problèmes envisagés - pouvaient, avec Bohr, considérer l'inséparabilité comme caractérisant légitimement l'approche quantique. Entre les deux, si la décantation philosophique avait été effectuée, il eût été déjà pensable de considérer l'inséparabilité comme une propriété objective des systèmes quantiques puisque, aussi bien, déjà une approche objective de la question de l'"indéterminisme" et des probabilités s'était fait jour (10). En fait, la position la plus fréquente à l'égard de l'inséparabilité était une simple neutralité pratique : elle fonctionnait dans le formalisme, et l'on pouvait l'accepter ou non comme fondamentale. La question ne paraissait pas si urgente, et rien ne semblait obliger véritablement à choisir. Le problème épistémologique de fond était celui du déterminisme, et des solutions réalistes en étaient recherchées surtout (11) du côté des "variables cachées".

C'était une matière de débats périodiquement repris, depuis l'ouvrage de Von Neumann, de savoir si des variables - non actuellement observées - chargées de restaurer le déterminisme local classique étaient ou non compatibles avec les prédictions statistiques

de la mécanique quantique(12). C'est à Bell qu'il revint de montrer que les preuves d'incompatibilité avancées jusqu'alors n'étaient pas d'une généralité suffisante (13). Allant plus loin, il proposa un critère caractérisant ce qui permettrait à de telles variables de répondre aux exigences du déterminisme classique : ce critère est celui de localité, et il présente cet avantage de dépasser le seul cas d'une problématique de variables supplémentaires pour désigner une propriété très générale des systèmes physiques. Le critère de localité devait exprimer - dans le cadre probabiliste qui est celui de la mécanique quantique - la revendication qui paraissait si naturelle à Einstein : chacune des particules issues du système initial possède, dès qu'elles sont séparées, des propriétés indépendantes de l'autre, c'est-à-dire qu'elle constitue un système à elle seule, qu'il doit être possible de déterminer sans aucune référence à l'autre - si ce n'est les propriétés évidentes et classiques de conservation. D'où cette conséquence que le résultat de la mesure d'une quantité sur le premier système doit être indépendant de toute mesure effectuée sur le second.

Reprenant l'expérience décrite par Einstein et ses collaborateurs puis par Bohm, John Bell exprima cette propriété en faisant intervenir des variables "cachées locales", qui disparaissaient ensuite des relations lors de l'effectuation de moyennes. Il obtint, comme transcription de la condition de localité, des inégalités - ou limites de corrélation - entre les probabilités relatives aux grandeurs des sous-systèmes supposés. La mécanique quantique, qui ne requiert aucune condition de localité, exige au contraire des corrélations strictes. Il se trouve, comme Bell put immédiatement le montrer, que ces limites de corrélations et ces corrélations strictes ne sont pas tout à fait compatibles, et que dans certaines conditions précises, les prédictions de la mécanique quantique sont contradictoires avec celles du déterminisme local sous-jacent (14). Qui dit contradiction dit ici prédictions différentes et, pour peu que certaines conditions expérimentales soient disponibles, falsifiabilités possibles de l'une et de l'autre prédiction. Par là-même, le débat sur les corrélations d'EPR et l'inséparabilité quittait le terrain de la seule confrontation épistémologique : une décision était rendue possible, indépendante des approches philosophiques, qui serait imposée seulement par les faits.

Il convient ici de souligner l'avancée considérable que représente, dans le débat sur les conceptions quantiques, le critère de localité tel que Bell l'a énoncé. Il permet de passer d'une expérience de pensée à une expérience de fait, et de rompre une certaine circularité des raisonnements invoqués. Ce n'est pas mon propos de décrire ici l'état de ce passage, et les expériences difficiles et minutieuses, dont celle d'Aspect représente actuellement le point le plus achevé (15). Le réel a, semble-t-il, parlé, et indiqué une confirmation de la mécanique quantique et une mise en défaut de la localité dans les systèmes quantiques. Ce qui est testé par les expériences de corrélation à distance, c'est l'inséparabilité de ces systèmes : c'est-à-dire cette propriété spécifique que Bohr avait souligné, et qui résulte du formalisme quantique dans son ensemble. Bien entendu, l'aspect épistémologique des problèmes de la mécanique quantique n'a pas disparu pour autant. L'inséparabilité n'oblige pas à la traduction donnée par Bohr en termes d'approche ; ce qui est modifié, désormais, c'est la caractérisation du problème en termes réalistes : plus profondément qu'une simple nécessité de l'approche, la non-séparabilité apparaît comme une propriété des systèmes. (Nous reviendrons plus loin sur les problèmes conceptuels posés par une propriété aussi peu classique).

Le critère de localité, éprouvé par les tests expérimentaux des inégalités de Bell, ne désigne pas, malgré l'apparence, une proposition (l'inséparabilité) - propriété ou principe - isolée, de la mécanique quantique (16). Elle existait déjà, nous l'avons vu, avant d'être explicitée. Elle n'est pas isolable des autres principes ou axiomes du formalisme ; on peut la voir au contraire comme résumant la cohérence de l'ensemble des propositions de la théorie, et ce avec d'autant plus de raison que tout test de la localité est un contre-test de la mécanique quantique. La falsifiabilité de l'inséparabilité répond donc encore à l'hypothèse de Duhem-Quine sur l'impossibilité de tester isolément des parties d'une théorie.

Quelle que soit l'attitude épistémologique que l'on puisse avoir à l'égard de la mécanique quantique ou, d'une manière générale, de toute théorie physique, il reste ce fait indépassable de l'inséparabilité. Il convient de noter que les expériences de corrélation à distance qui l'éprouvent constituent un test de la mécanique quantique plus fin que l'ensemble des expériences antérieures, pourtant relatives à une multitude de données et qui témoignaient pour elle

d'une puissance sans précédent dans l'histoire des théories physiques. Peut être faut-il voir là le paradoxe le plus étonnant ! Le caractère inédit de ce test réside dans les distances arbitrairement grandes qui sont en jeu, et qui ne suffisent pas à déterminer une séparation à l'intérieur des systèmes quantiques. Il était, avec le critère de Bell et les expériences de corrélation à distance, désormais possible de contrôler directement cet état de choses ou cette propriété.

En établissant le caractère irréductible de l'inséparabilité quantique, ces expériences - et en particulier celle d'Aspect - revêtent une importance aussi grande pour la mécanique quantique que celles de Michelson et Morley pour la théorie de la relativité restreinte. Ni les unes ni les autres n'ont été vraiment invoquées dans l'élaboration des théories correspondantes - et l'inséparabilité, notamment, a été pensée à partir du formalisme bien avant le fait expérimental. Mais l'absence de tout vent d'éther constituait en vérité la pierre de touche des nouvelles idées sur la relativité de l'espace et du temps ; de même, les corrélations fortes à distance marquent la différence conceptuelle la plus nette entre la théorie quantique et les idées de toutes les théories antérieures. Et, comme cela a été le cas pour le principe de relativité, l'inséparabilité quantique s'avère déjà devoir être comptée au nombre des principes les plus familiers et les plus fondamentaux de notre arsenal théorique.

PENSER LA NON-SEPARABILITE

Ce concept heurte certes le sens commun habitué aux notions intuitives de séparation locale des objets. Mais nous savons que les autres conceptions quantiques obligent également à une critique radicale de la notion d'espace et de l'idée de localisation. Les expériences sur l'inséparabilité indiquent qu'il est vain de vouloir dissoudre cette notion dans des mécanismes physiques sous-jacents. L'essentiel ayant été dit du point de vue du questionnement physique, toute interrogation sur l'inséparabilité relève désormais de la clarification épistémologique sur les fondements de la mécanique quantique.

L'inséparabilité est généralement - étant donné le critère invoqué qui la désigne aux tests - considérée comme équivalente à la non-localité. Elle s'exprime d'ailleurs le plus souvent dans la

proposition suivante : un système de particules corrélées n'est pas séparable localement. Mais, une fois acquis que les systèmes inséparables sont non-locaux, on peut considérer que ces deux concepts ne sont pas d'utilisation absolument identique. En effet, l'inséparabilité fait référence avant tout à un caractère défini dans et par le formalisme quantique : il s'agit de l'inséparabilité des fonctions d'onde, de l'impossibilité pour un vecteur d'état de deuxième espèce de se transformer par une action causale en vecteur d'état de première espèce (17). Par contre, la non-localité se rapporte à une propriété comparative : étant donné un système, constitué de deux sous-systèmes, on désire le confronter à une catégorisation spatiale qui n'est pas initialement incluse dans le formalisme. Pour certains, elle l'est implicitement, car on ne saurait penser un système physique sans référence à l'espace ; mais il semble que ce soit là une position discutable. Elle présente cet inconvénient de prendre l'espace comme un concept a priori, nous ramenant en quelque sorte à une position kantienne sur la connaissance. Il y aurait, bien entendu, lieu de développer extensivement cette considération, qui nous renvoie à la question des rapports entre les concepts classiques et les concepts quantiques, c'est-à-dire, à nouveau, au débat sur la nature de la connaissance soulevé dès les débuts de la théorie quantique. L'approche choisie ici est celle où la mécanique quantique détermine elle-même sa référence ; elle s'efforce de ne pas introduire d'autres concepts ou principes que ceux requis par le formalisme lui-même, étant acquis que ce dernier rend complètement compte des faits d'expérience. Elle n'accepte donc pas sans nécessité et sans critique l'introduction de la notion d'espace dans la description des phénomènes ; l'inséparabilité lui paraît être l'indicateur le plus évident de la limite d'un tel concept. Considérant que cela a un sens de parler de système quantique pris en lui-même, avant toute approche instrumentale, on soulignera, selon cette vue, qu'un système quantique étendu n'est pas un système macroscopique, et que l'espace n'est pas un premier concept de la théorie quantique : son utilisation est soumise à des restrictions du genre de celles indiquée par la non-séparabilité locale. Si l'on considère, comme le font un certain nombre de théoriciens et de commentateurs, que la séparation locale des systèmes correspond à une nécessité première de l'entendement, on n'évitera pas l'aporie des soi-disant "influences instantanées à distance", à moins bien sûr de s'en tenir aux thèses épistémologiques de l'école de Copenhague, qui me paraissent présenter d'évidentes

faiblesses philosophiques, et qui sont, en tout état de cause, incompatibles avec un programme réaliste en matière de théorie physique.

Parler d'"influences" à distance, entre les deux particules ou sous-systèmes de l'expérience de corrélation, présente en réalité une difficulté logique du simple point de vue de la considération du formalisme. Ce dernier, en effet, interdit de désigner et de penser séparément les sous-systèmes corrélés du système considéré. L'idée d'influence à distance, même si l'on considère qu'il s'agit d'"influences non physiques", sous-entend que les sous-systèmes en question sont conceptuellement distincts et séparés spatialement, ce qui est contradictoire avec la première proposition. Une telle idée correspond donc à l'introduction d'une notion ad hoc, qui n'a de contrepartie claire ni dans la réalité physique ni dans le formalisme : elle est donc strictement superflue. Il est vrai que l'on tente, en l'invoquant, de réconcilier ce que l'abstraction du formalisme peut sembler présenter d'étranger à l'entendement, et les exigences du sens commun par lesquelles on voudrait caractériser ce dernier. D'une manière générale, l'idée d'"influence à distance" fonctionne, dans le cas qui nous occupe, comme une notion introduite de l'extérieur pour ajuster le concept d'inséparabilité soit à des théories spécifiques surajoutées - tel est le cas des mouvements stochastiques supra-luminaux d'un éther covariant de Dirac, considérés par J.P. Vigié (18) soit à des conceptions philosophiques qui a priori l'acceptent mal ; un troisième cas est celui dans lequel on accepte au contraire l'inséparabilité, et l'on invoque l'idée d'"influence instantanée" que pour la confronter aux conceptions antérieures, par exemple celles supposées résulter de l'exigence de "réalisme physique" (19) .

Conclure, de l'évidence expérimentale pour l'inséparabilité - celle des expériences de corrélation à distance - , à l'existence indubitable d'influences ou de propagations supraluminales ou instantanées, me paraît tout aussi arbitraire que pouvait l'être, relativement aux expériences de Michelson et Morley, la déduction d'une contraction physique dans la direction du mouvement par rapport à l'éther. Il s'avéra, dans ce dernier cas, avec la théorie de la relativité d'Einstein, que cette contraction n'était qu'une propriété cinématique, c'est-à-dire une conséquence logique de la nouvelle conceptualisation de l'espace et du temps. De même l'inséparabilité quantique n'est-elle pas une propriété de nature dynamique, mais résulte-t-elle de la définition des systèmes ou des objets quantiques, au sein même de la théorie.

Il convient toutefois de noter que l'idée d'une "influence", même non physique - entendue dans un sens purement mathématique ou dans celui d'une commodité conceptuelle -, est assez significative d'un aspect du problème des corrélations qui nous reste à discuter : faisant référence à une action entre les deux systèmes, ou sur eux, elle renvoie implicitement à l'acte de l'observation ou de la mesure. Si l'on invoque, en effet, une influence entre les systèmes, c'est parce que l'on conçoit leurs états comme n'étant déterminés qu'à l'instant même de la mesure. L'idée d'influence exprimerait ainsi la rémanence du paradoxe sous l'évanouissement apparent auquel le formalisme quantique l'avait conduit ; et cette part énigmatique, qui demeure sous la transparence de l'incertitude où nous sommes encore sur la signification des opérations de mesure.

Avant d'en venir maintenant à cet ultime problème, il nous faut signaler un point, sans aucun doute fondamental, qui lie encore - comme il le liait dès le début, mais à l'intérieur de brumes conceptuelles dont une part non négligeable semble dissipées - l'inséparabilité à la complétude ou non de la théorie quantique : mais complétude est à entendre cette fois au sens d'achèvement. C'est que l'inséparabilité, au sens de non-localité, se présente à nous comme le lieu pour l'instant irréductible de la différence - c'est-à-dire de l'absence de rapports conceptuels et axiomatiques - entre la mécanique quantique et la relativité. Mais il y aurait trop à dire sur ce point et je ne fais ici que le mentionner. Les développements auxquels a donné lieu le concept d'inséparabilité ont éclairé comment ce concept ne signalait par une difficulté interne de la mécanique quantique ; mais il indique à coup sûr la difficulté de sa fusion fondamentale avec la relativité. Ce qui nous rappelle évidemment aux considérations d'Einstein, mais, on le voit, sous un éclairage quelque peu différent.

L'INSEPARABILITE ET LE PROBLEME DE LA MESURE

Nous avons essayé de rendre compte de l'inséparabilité dans une approche objective (correspondant à un programme philosophique réaliste sur la connaissance). Il nous reste un aspect important à clarifier. Dans la perspective que nous avons choisie, il n'est que secondaire, puisqu'il concerne non pas les systèmes pris en eux-mêmes, mais leur observation. Mais celle-ci, comme on sait, reste encore pour beaucoup la pierre d'achoppement de l'approche objective. On peut

le voir dans le cas qui nous occupe : pour étudier les propriétés des systèmes quantiques étendus, et d'abord pour établir leur inséparabilité, il faut procéder à des opérations d'observation et de mesure.

Selon la conception traditionnelle, c'est au moment de la mesure que "la potentialité", d'une particule ou d'un système à être dans un état donné, se réalise. Si nous reprenons l'exemple de la molécule scindée en deux atomes, il faudra en conclure que ce n'est qu'à cet instant que la quantité considérée pour l'un des deux atomes prend la valeur donnée. Il faudrait donc admettre qu'il en est de même pour l'autre, mais une mesure, puisqu'il s'agit d'un seul système. La mécanique quantique ne pose pas la question de la distance qui sépare les deux atomes constituant ce système ; mais la mesure, elle, la pose, et fait ainsi rebondir le paradoxe que l'on avait cru évanoui au niveau de la considération des systèmes. Car, si l'on mesure simultanément les quantités correspondantes (spin) relatives à chacun des atomes, la corrélation observée ne sera plus seulement celle des parties d'un microsystème, mais celle des deux instruments macroscopiques de mesure. La question de la transmission d'un signal est posée pour ces derniers, bien que la possibilité physique ait pu en être éliminée par un dispositif du type de celui utilisé dans l'expérience d'Aspect.

Remarquons que cette résurgence du paradoxe est liée à une conception bien précise de la mesure au sens quantique. C'est donc en fin de compte au problème de la mesure que nous nous trouvons renvoyés, problème qui peut se formuler ainsi : quel est le rapport entre le système quantique et l'appareil de mesure qui fait en sorte que tel résultat soit obtenu ? Ce problème est celui de la réduction (du paquet d'onde). Il comporte, lui aussi, un aspect épistémologique et un aspect physique, qui ne sont pas distingués dans les conceptions de l'Ecole de Copenhague - y compris dans la théorie ergodique de Daneri, Loinger et Prosperi(20) -, qui en appelle à la nécessité, pour rendre compte des phénomènes quantiques, des concepts et des appareils classiques. Distinguer ces deux aspects, au contraire, cela peut conduire à la possibilité d'une description objective, c'est-à-dire purement quantique, du processus de mesure, dans laquelle l'appareil n'intervient fondamentalement que comme un système quantique qui interagit avec le système étudié (l'amplification ergodique dans l'appareil macroscopique ne s'effectuant qu'après la réduction éventuelle).

Je ne me propose pas ici, bien entendu, de résoudre le problème de la théorie de la mesure. Ce qui m'intéresse, c'est de voir si la signification philosophique d'une théorie quantique de la mesure peut être rattachée à la question des corrélations à distance entre les systèmes quantiques ou les appareils de mesure. S'il y a une solution satisfaisante du point de vue objectif, elle est à chercher dans la direction où la considération de l'interaction des systèmes quantiques - celui sous étude, et celui qui représente l'appareil - suffit au problème.

La direction qui paraît la plus appropriée à notre problème est évidemment celle où l'on considère qu'il n'y a pas de réduction, c'est-à-dire que ce n'est pas au moment de l'interaction du système étudié et de l'appareil que l'état du système se détermine, et que la mesure ne fait que transcrire - par cascade d'interactions successives - la donnée de l'état initial. Telle est la position de Margenau, insistant sur l'existence, entre le système considéré en lui-même, et l'instrument de mesure, du dispositif de préparation des états (21). C'est à travers lui qu'a lieu la détermination de l'état du système. Cette interprétation peut être complétée par l'acceptation du caractère objectif des probabilités affectées à chacun des états de la superposition - telle est la position de Bunge (22). Si, l'acceptant, nous revenons à la considération de la corrélacion entre les deux sous-systèmes, celle des résultats de leurs mesures respectives n'est plus paradoxale. Elle ne s'effectue pas au moment de la mesure, soit de l'un, soit de l'autre, soit des deux ensemble, au cours d'une prétendue "actualisation des potentialités du système". Elle est de nature très classique, puisqu'elle était déterminée dès la scission du système initial, comme l'était la relation de quantités comme l'énergie, par exemple, déterminées de façon certaine (obéissant à une règle de "supersélection"). La différence est que, dans le cas considéré, il s'agit de quantités caractérisées par des fréquences. De fait, la considération des différents états possibles, c'est-à-dire des divers éléments de la superposition par laquelle on représente généralement le système, invite à traiter les quantités considérées suivant les fréquences qui leur sont relatives, et nous renvoie à l'interprétation objective des probabilités.

La théorie d'Everett et Wheeler, dite de l'état relatif, considère également qu'il n'y a pas de réduction (23). Ce qui est

intéressant, pour notre problème, dans cette théorie, par delà certaines obscurités, c'est qu'elle fait explicitement appel à l'inséparabilité. Car la fonction d'onde de la partie microscopique de l'appareil qui interagit avec le système est inséparable de celle de ce dernier - l'un et l'autre sont dans des états relatifs - et l'on ne saurait donc l'extraire. (Si l'on obtient un état donné pour la fonction d'onde relative à l'appareil et en fin de compte au système, c'est parce que l'orthogonalité des diverses fonctions d'onde de chaque superposition élimine les composantes qui ne correspondent pas à l'état réel initial. Mais il s'agit là d'un souhait de principe plutôt que d'une démonstration).

Si la mesure est ainsi liée à l'inséparabilité, cela boucle, de notre point de vue, la logique du raisonnement. En effet, la compréhension des faits expérimentaux de corrélation à distance des systèmes quantiques, faits dont rend compte le concept d'inséparabilité, apparaissait dépendre encore d'une théorie de la mesure, par le rôle des appareils sur la définition de l'état du système. Si la mesure renvoie, comme dans la conception de l'état relatif, à l'inséparabilité, cela signifie qu'elle n'ajoute rien à la détermination des systèmes, et que c'est bien, sans paradoxe ni influence instantanée, par rapport à ces systèmes quantiques considérés en eux-mêmes que les corrélations doivent être comprises (24).

Notes

Remarque. Il n'était pas possible de détailler davantage, dans le présent texte, l'explication des arguments proprement physiques. Je renvoie, pour une lecture complémentaire à l'usage des non spécialistes, aux articles et ouvrages de divulgation déjà parus sur ce sujet, et, parmi eux, mes "Nouveaux voyages au pays des quanta" in B. Hoffmann et M. Paty, L'étrange histoire des quanta, coll. Points-Science, Seuil, Paris, 1981, dans lequel je décris assez extensivement cette question.

- 1) Par exemple telle que J. Von Neumann l'a décrite dans ses Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik (1932) ; trad. fr. par Alexandre Proca, Les Fondements mathématiques de la mécanique quantique, Presses Univ. de France, Paris, 1947 .
- 2) A. Einstein, B. Podolski and N. Rosen, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?" Physical Review 47, 1935, 777.
- 3) Ibid. Souligné par moi (M.P.)
- 4) Il s'agit ici d'une boutade d'Einstein, faite par ailleurs, pour insister sur le caractère d'impossibilité. (Une pointe d'humour qu'il n'est pas inutile de souligner pesamment...).
- 5) Dans l'article d'EPR, ce sont la position et l'impulsion qui sont considérés David Bohm, en décrivant cette expérience imaginaire dans son livre Quantum theory, Prentice Hall, Englewood Cliffs N.J., 1951, considéra le cas des composantes du spin des particules. C'est ce cas qui a été repris dans les développements ultérieurs jusqu'à Bell et aux expériences de corrélation à distance.
- 6) Karl Popper, Logik der Forschung (1935) ; La Logique de la découverte scientifique, trad. de l'anglais (sur l'édition de 1968) par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, Payot, Paris, 1973. Cf. p.240 et suiv. et surtout p.146-250 ; ainsi que la lettre d'Albert Einstein à Karl Popper, du 11.9.1935, publiée en appendice à ce livre, p.468-471.
- 7) N. Bohr, "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete ?", Phys. Rev. 48, 1935, 696.

- 8) Voir mon ouvrage en préparation, La Matière dérobée, à paraître en traduction italienne, Feltrinelli, Milan.
- 9) La non-séparabilité était acceptée dans le cadre du formalisme quantique et relevait épistémologiquement du même statut que ce dernier : soit une conception de type positiviste, soit un refus de la considérer comme fondamentale - tout en l'acceptant comme une approximation valide -, soit, plus généralement, une neutralité pratique. Impliquée dans le formalisme, l'inséparabilité apparaissait dans les calculs, indépendamment de toute interprétation laissée de côté dans le travail des praticiens.
- 10) Voir par exemple les conceptions de Langevin, Fock, Popper, et, plus récemment, de Bunge.
- 11) Surtout, mais non exclusivement. L'approche réaliste, du genre de celle qui nous paraît devoir prévaloir aujourd'hui, était préfigurée et désignée déjà par un Langevin par exemple (voir en particulier sa critique des catégories spatio-temporelles pour décrire les systèmes quantiques). Cf. Paul Langevin, La Notion de corpuscules et d'atomes, Hermann, Paris, 1934.
- 12) Voir p. ex. Max Jammer, op. cit. p. 265 et suiv. ; David Bohm op. cit. ; Frederik J. Belinfante, A Survey of hidden-variables theories, Pergamon Press, Oxford, 1973.
- 13) John S. Bell, "On the problem of hidden variables in quantum mechanics", Rev. Mod. Phys. 38, 1966, 447
- 14) John S. Bell, "On the Einstein Podolski Rosen paradox", Physics 1, 1964, 195. Bernard d'Espagnat a montré le caractère très général de la localité exprimée dans les inégalités de Bell en établissant simplement des inégalités analogues dans le cas d'exemples imagés (répartitions statistiques des partenaires de différents couples). Voir B. d'Espagnat, A la recherche du réel, Gauthier-Villars, Paris, 1979, et "Théorie quantique et réalité", Pour la Science, n° 27, janvier 1980, p. 72.
- 15) Pour des revues de ces expériences, voir M. Paty, "The recent attempts to verify quantum mechanics", in J. Leite Lopes and M. Paty eds, Quantum mechanics, a half century later, Reidel, Dordrecht,

1977, p. 261 ; John F. Clauser and Abner Shimony, "Bell's theorem : experimental tests and implications", Reports on Progress in Physics 41, 1978, 1881 ; Alain Aspect, "Expériences basées sur les inégalités de Bell", in les Implications conceptuelles de la physique quantique, Journal de Physique, Supplément Colloque n° 2, 1981, p. 63.

L'expérience d'Alain Aspect (A. Aspect, "Proposed experiment to test the non-separability of quantum mechanics", Phys. Rev. D 14 1976, 1944) présente cet avantage d'être relative à des corrélations entre des photons que sépare un intervalle (a-causal) du "genre espace" du "cône de lumière".

- 16) Du moins parlons-nous ici de la traduction de la non-localité dans les termes de la mécanique quantique. Car les inégalités de Bell, controuvées par l'expérience, caractérisent la localité indépendamment d'une théorie donnée. (Mais, bien sûr, les expériences qui leurs sont relatives portent sur des systèmes quantiques).
- 17) Cf. p. ex. B. d'Espagnat Conceptions de la physique contemporaine, Hermann, Paris, 1965 ; Conceptual foundations of quantum mechanics, Benjamin, Menlo Park, 1971 ; revised ed., 1976.
- 18) Voir Jean-Pierre Vigié, "Non locality, causality and aether in quantum mechanics", prepr. I.H.P., 1981
- 19) B. d'Espagnat, A la recherche du réel, op. cit.
Le "réalisme physique" tel que l'entend d'Espagnat, et auquel il faut selon lui renoncer pour un "réalisme voilé", est plus proche du réalisme classique que du réalisme critique qui est ici défendu. Voir B. d'Espagnat et M. Paty, "La Physique et le réel", Bull. Soc. Française de Philosophie, 74e année, n°1, janv. - mars 1980
- 20) A. Daneri, A. Loinger and G.M. Prosperi, "Quantum theory of measurement and ergodicity conditions", Nuclear Physics 33, 1962, 297
- 21) Voir p. ex. Henry Margenau, Physics and Philosophy : selected essays, Reidel, Dordrecht, 1978, p. 203, 207
- 22) Cf. p. ex. Mario Bunge, Philosophie de la physique, trad. fr. F. Balibar, Seuil, Paris, 1975. Voir également mon livre en préparation, op. cit.

23) Hugh Everett III, "Relative state" formulation of quantum mechanics", Rev. Mod. Phys. 29, 1957, 454 ; John A. Wheeler "Assessment of Everett's "relative state" formulation of quantum theory", Rev. Mod. Physics 29, 1957, 463. Voir aussi Jean-Marc Levy-Leblond, "Towards a proper quantum theory", in J. Leite Lopes and M. Paty eds, op. cit. p. 171.

24) Je remercie J.S. Bell et B. d'Espagnat de leurs remarques sur une première version du présent texte.