

Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie sur les variables cachées de la mécanique quantique.

Michel Paty

► **To cite this version:**

Michel Paty. Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie sur les variables cachées de la mécanique quantique.. La Pensée, 1993, p.93-116. halshs-00167125

HAL Id: halshs-00167125

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00167125>

Submitted on 14 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La Pensée (Paris), n°292, mars-avril 1993, 93-116.

Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie sur les ‘variables cachées’ de la mécanique quantique

PAR MICHEL PATY*

à David Bohm, in memoriam

RESUME.

Les partisans des ‘variables cachées’ pour compléter la mécanique quantique d'une manière déterministe se sont appuyés sur les objections d'Einstein, et l'on a souvent cru que telle était aussi la position de ce dernier. On montre, par l'étude des travaux de David Bohm et de Louis de Broglie sur cette question et par l'examen de la correspondance échangée entre eux et Einstein, que ce dernier ne partageait pas le programme des ‘variables cachées’, ce qui confirme l'analyse de ses conceptions propres que nous avons effectuée par ailleurs.

ABSTRACT

The positions of the proponents of ‘hidden variables’ to complete quantum mechanics in a deterministic way have often been identified to Einstein's one. We show, from the study of David Bohm's and de Louis de Broglie's works on hidden variables and from the reactions of Einstein through the correspondence he exchanged with them, that Einstein did not share the deterministic programme of hidden variables. This confirms what we previously could infer from the direct analysis of his own conceptions.

* Equipe REHSEIS, CNRS et Université Paris 7, 2 place Jussieu, 75251 PARIS-Cedex 05.

1. EINSTEIN ET L'INTERPRETATION DE LA MECANIQUE QUANTIQUE¹.

Einstein, qui avait largement contribué à la naissance et au développement de la physique des quanta, formula, comme on le sait, des critiques à l'encontre de la mécanique quantique telle qu'elle fut interprétée, à partir de 1927, par Niels Bohr et l'Ecole de Copenhague. La nouvelle théorie se présentait sous un formalisme élaboré, dont l'interprétation physique n'était pas évidente: l'Ecole de Copenhague-Göttingen en fournissait une où les considérations physiques étaient directement rapportées à des conceptions générales sur la connaissance, dont la 'philosophie de la complémentarité' de Niels Bohr exprime les tendances essentielles. En critiquant cet ensemble alors indissociable que constitua longtemps la mécanique quantique et son interprétation non seulement physique, mais aussi philosophique, Einstein s'interroge avant tout sur le caractère fondamental ou non de la théorie, en se montrant soucieux de préserver la nécessaire autonomie de l'interprétation physique, tout en réclamant de la théorie physique qu'elle satisfasse certaines exigences, de nature théorique et méta-théorique.

L'importance du caractère 'fondamental' a directement à voir avec ses travaux dans la direction de la théorie du champ, inaugurés par sa théorie de la Relativité générale. La physique, pour lui, a atteint un stade où elle ne peut se contenter d'être une simple 'phénoménologie'; elle doit, d'une manière ou d'une autre, intégrer les leçons de la Relativité générale. Il sait bien - par son propre travail dans ce domaine - que les phénomènes quantiques relèvent présentement d'une approche différente de celle en termes de champ défini sur le continuum spatio-temporel, et ses considérations sur la mécanique quantique s'en tiennent à la spécificité de cette dernière. Mais, dans la mesure où elle est présentée par ses promoteurs comme une théorie fondamentale, et même définitive et complète, c'est par rapport à cette prétention qu'il l'interroge, d'autant plus qu'il faudra bien, un jour, raccorder dans une unité plus haute la théorie de la matière élémentaire et celle de la gravitation: par-delà ses critiques immédiates, c'est à un tel programme qu'il songe constamment. Il n'impose pas, pour autant, à la mécanique quantique les exigences qu'il formule pour une théorie du champ: il se demande seulement si elle peut servir de base pour aller plus loin.

¹ Ce travail fait partie d'une étude plus vaste sur la pensée physique d'Einstein et les quanta (à paraître sous le titre *Einstein, les quanta et le réel*), entrepris en même temps qu'un autre ouvrage paru dernièrement, *Einstein philosophe, la physique comme pratique philosophique* (PUF, Paris, 1993). Il m'a semblé approprié de le publier sans attendre la parution du livre, comme contribution au centenaire de la naissance de Louis de Broglie. Le premier paragraphe donne quelques éléments résumant les analyses des autres chapitres du livre. Je remercie l'Université hébraïque de Jerusalem et l'équipe des 'Einstein papers' à l'Université de Boston pour l'autorisation d'utiliser des manuscrits inédits des Archives Einstein. Je remercie Olival Freire pour ses commentaires. Ce texte était terminé lorsque j'ai appris avec tristesse la disparition de David Bohm, le 27 octobre 1992. Je dédie ce travail à sa mémoire.

Faisant appel à des ‘expériences de pensée’², dont l’analyse permet de mettre à l’épreuve la cohérence logique des concepts et de la structure théorique qui les incorpore, il développe, au long des années, des considérations et des critères qui permettent de se prononcer sur la nature de ces concepts et des propositions théoriques. Parmi les exigences méta-théoriques ou épistémologiques qui sous-tendent son raisonnement, et autour desquelles celui-ci paraît s’organiser et se structurer, on trouve les catégories ou les notions de *réalité*, d’*observation*, de *déterminisme*, de *caractère statistique* des représentations, de *théorie complète*. Ces notions tiennent par ailleurs une place centrale dans sa pensée, par-delà le seul cas de la mécanique quantique³.

Leur examen, à travers les textes d’Einstein sur la mécanique quantique, montre qu’elles se présentent dans un certain ordre de priorité, dont nous retiendrons surtout ici que le réalisme est strictement requis tandis que la question du déterminisme n’est que subséquente.

Le problème de la *réalité physique* se propose en premier lieu: il est inséparablement problème de la nature de cette réalité et problème de sa représentation. Pour les physiciens quantiques ‘orthodoxes’, il se confond avec la question de l’observation et de la mesure. Einstein veut montrer, au contraire, que la *réalité physique* peut être pensée, et donc décrite, indépendamment de l’acte de mesure. Lorsqu’il écrit à Michele Besso, en 1949, à propos de son article "Réponse aux critiques", qu’il y "défend le bon Dieu contre l’idée d’un prétendu jeu de dés continu"⁴, il souligne que c’est "le bon Dieu", autrement dit, bien sûr, le Réel ou la réalité⁵, qui est au centre de ses remarques sur l’interprétation de la mécanique quantique, remarques qui constituent la part la plus importante de ce texte. Quant au "jeu de dés", ce n’est qu’un raccourci, frappant, mais qui renvoie à une argumentation plus complexe qu’une exigence immédiate de déterminisme ou un refus des probabilités. L’image de *Dieu qui ne joue pas aux dés*, qu’il a souvent reprise et qui a généralement été interprétée de manière simpliste, résume, en fait, l’ensemble des aspects, mêlés, de l’*interprétation*, de l’aspect statistique à l’effet de l’observation et de la mesure, et au problème de la description de systèmes physiques individuels.

C’est donc, avant tout, en référence à la réalité physique que se pose le problème de la description théorique. La formulation de l’exigence de *complétude théorique* et sa définition constitue le deuxième temps dans la logique du raisonnement d’Einstein. La *complétude théorique* vient assurer, précisément, dans l’architecture de son argumentation sur la mécanique quantique, l’exacte

² La plus connue est l’expérience de pensée EPR (Einstein, Podolski, Rosen 1935), qui fait intervenir des systèmes quantiques corrélés (par exemple deux particules issues d’un même atome) et qui le demeurent après leur séparation, quelle que soit leur distance. Cette propriété spécifiquement quantique sera mise en évidence, à la suite des travaux d’Einstein et de Bohr, par Bell (1964), et testée expérimentalement (expériences d’Aspect). Sur ces circonstances et sur l’interprétation de l’inséparabilité quantique, voir par ex. Paty 1982, 1985, 1986 a, 1988 a.

³ Voir Paty 1993 a, chapitre 9.

⁴ Einstein, lettre à Michele Besso du 30.11.1949, in Einstein, Besso 1972, lettre n° 165; cf. Einstein 1949.

⁵ Einstein partageait le ‘*Deus sive Natura*’ de Spinoza (voir Paty 1986 b).

adéquation de la représentation théorique à la réalité. Elle exprime la nécessité pour la théorie de rendre compte de tous les éléments de réalité qu'il est possible de caractériser par la pensée. A un élément caractérisé de la réalité doit correspondre une grandeur théorique définie dans une théorie complète⁶.

Le troisième temps est consacré à la recherche d'un moyen de caractériser un système physique réel indépendamment du fait qu'on l'observe ou non: la notion de corrélation de deux sous-systèmes fournit ce moyen, dont Einstein exprime l'essence en énonçant un *principe de localité* ou *séparabilité locale*, concept physique qu'il développe dans ce contexte comme l'un des critères limitant à ses yeux les choix possibles dans l'interprétation d'une théorie, c'est-à-dire de ses concepts fondamentaux. Le *déterminisme* n'intervient qu'ensuite: ce n'est pas lui qui est revendiqué en premier lieu pour caractériser la complétude; l'ordre des raisons est inverse: l'incomplétude étant acquise pour des raisons rattachées à l'intervention des catégories et concepts qui précèdent, l'absence de déterminisme s'ensuit. En effet, le non-respect du principe de séparabilité locale par la fonction ψ , qui décrit les systèmes quantiques, est la preuve, selon l'argumentation d'Einstein, que cette fonction ne peut pas fournir la description d'un système individuel.

La conclusion est que la mécanique quantique est une théorie statistique sur des ensembles de systèmes: c'est à ce stade seulement, et non d'emblée *a priori*, ou à quelque moment précédent, que la question du déterminisme, vis-à-vis d'une représentation seulement statistique, se voit posée. A cet égard, ainsi d'ailleurs que par rapport à l'idée de causalité - avec laquelle on la confond souvent, bien que les deux, déterminisme et causalité, diffèrent -, la revendication d'Einstein est beaucoup moins absolue qu'on ne l'imagine communément, et elle est en tout cas nuancée: il faut, décidément, entendre ce qu'il veut dire quand il affirme que Dieu "ne joue pas aux dés".

2. LES PARAMETRES CACHES POUR RESTAURER LA CAUSALITE ET LA LOCALITE. DIVERSITE D'OPINIONS SUR LA POSITION D'EINSTEIN.

Le problème de la réalité physique et de l'observation constitue l'enjeu fondamental du débat entre Einstein d'un côté, Niels Bohr, Max Born et l'«école orthodoxe» de l'autre. La mise en évidence du concept de non séparabilité locale s'est imposée, à la lumière des développements ultérieurs, comme le résultat le plus tangible de ce débat du point de vue physique: dans les conditions de la physique quantique, la réalité physique est «non séparable localement»⁷, et la mécanique quantique rend bien compte de cette propriété.

Ce n'est qu'assez récemment que l'attention a été attirée sur ce concept, à la faveur du résultat théorique important que constitue le théorème de Bell ainsi

⁶ Ce sens est précisé, par exemple, dans l'article EPR. Il existe un deuxième sens, plus général, de la «complétude théorique», mais ce n'est pas lui qui est en jeu ici (voir Paty 1988 b et 1993 a, chapitre 9).

⁷ Sur le sens exact de cette proposition, voir Paty 1982, 1986 a, 1993 b.

que des expériences de ‘corrélation à distance’ effectuées sur des systèmes quantiques voisins de celui imaginé dans l'expérience de pensée ‘EPR’. Jusqu'alors, la question de la non-séparabilité et de la non-localité avait été occultée par celle de l'indéterminisme, à quoi semblait se ramener, aux yeux de la plupart, le débat sur l'interprétation de la mécanique quantique⁸.

Mais la revendication d'Einstein concernant la réalité des systèmes physiques séparables localement ne doit pas être confondue avec les tentatives effectuées par ailleurs en vue de restaurer le déterminisme et la causalité. La nature probabiliste de la mécanique quantique semble impliquer que c'est seulement à partir de données statistiques que l'on peut reconstituer les propriétés de systèmes individuels; cette situation est inverse de celle de la physique classique, où les comportements d'ensembles statistiques sont au contraire déduits des comportements individuels, comme l'ont remarqué aussi bien Einstein que des partisans de l'interprétation orthodoxe, en matière de constatation d'un état de fait.

C'est précisément dans la perspective de revenir à une situation plus traditionnelle à cet égard, et de restaurer, dans le domaine quantique, un déterminisme et une causalité au sens classique, en considérant la possibilité de décrire les systèmes physiques d'une façon qui ne soit pas seulement probabiliste, que les ‘théories à variables cachées’ ont été proposées par divers auteurs comme alternatives à la mécanique quantique⁹.

Selon cette approche, il convient d'ajouter, aux variables décrivant les systèmes quantiques, des paramètres supplémentaires qui complèteraient la description dans le sens d'un déterminisme strict (tout en préservant les relations de la mécanique quantique, qui seraient retrouvées à la limite des distributions moyennes de ces variables ou paramètres). Tel était le sens des théories de l'‘onde-pilote’ et de la ‘double solution’ proposées par Louis de Broglie déjà en 1926-1927¹⁰, et des modèles variés qui furent élaborés ensuite. Les partisans de ces modèles revendiquaient la nécessité de *compléter* la théorie quantique en retrouvant le déterminisme et se recommandaient généralement des arguments d'*incomplétude* d'Einstein (dont l'idée, nous l'avons vu, était sensiblement différente). La question restait posée de savoir si ce déterminisme causal était ou non compatible avec la mécanique quantique: si oui, cette dernière serait une théorie statistique fournissant des moyennes sur des processus sous-jacents plus fins. Cette question s'est vue périodiquement reprise, depuis la preuve d'‘incompatibilité’ de von Neumann¹¹, qui s'avéra n'être, en fait, que relative à une classe restreinte de telles variables, jusqu'aux résultats de Bell¹² selon lesquels c'est, en réalité, la classe entière des variables supplémentaires cachées ‘locales’ qui est incompatible avec la mécanique quantique. C'est ainsi que Bell fut amené à

⁸ Sur ce point, voir Paty 1986 a.

⁹ Voir, pour un examen détaillé de toutes les théories proposées dans ce sens, Jammer 1974 (chapitre 7), et Belinfante 1973. Voir aussi Wheeler, Zurek 1983, et Paty 1986 a. Je renvoie à ce dernier travail et aux références qui y sont indiquées, ne pouvant m'étendre ici sur ce sujet.

¹⁰ De Broglie 1926, 1927 a et b, 1928.

¹¹ Von Neumann 1932.

¹² Bell 1966, 1964.

redécouvrir l'importance de la non-séparabilité locale, quelque peu occultée dans le débat sur le caractère complet ou non de la mécanique quantique qui avait glissé, pour bien des protagonistes, à un débat sur l'indéterminisme.

Il est vrai que le modèle de de Broglie de 1926-1927 et la preuve de von Neumann de 1932 furent élaborés avant l'argument 'EPR'. Mais les partisans de l'approche en termes de variables cachées déterministes virent dans l'argument 'EPR' un appui à leurs thèses. Ils prenaient toutefois comme point de départ ce que l'argument 'EPR' donnait pour conclusion (la mécanique quantique décrit des ensembles de systèmes), sans se poser généralement le problème, essentiel dans l'argument, de la séparabilité et de la localité. Aux yeux de la plupart, la restauration du déterminisme rétablirait du même coup la localité (alors que, nous le savons désormais, les deux problèmes sont distincts). Remarquons que la position de David Bohm était sensiblement différente: il voulait rétablir le déterminisme, mais non la localité, puisque les modèles dont il fait état sont non locaux, comme le remarquera John Bell.

On remarquera, avec ce dernier¹³, une faiblesse de la terminologie: plutôt que de 'variables cachées', il serait préférable de parler de 'variables *incontrôlées*', dans la mesure où l'on ne peut, par hypothèse, en dire, en l'état actuel, davantage sur elles. Le terme 'variables cachées' pourrait laisser entendre qu'il s'agit d'une affaire de goût, et le physicien pragmatique n'en aurait cure, car, dirait-il, "*pourquoi se préoccuper d'entités cachées qui n'ont d'effet sur rien?*". Sous-entendu, pour Bell, si ces variables ont un sens physique, elles sont susceptibles de se manifester par un effet (effet que nous ne connaissons pas encore), et de prendre une certaine valeur, de la même façon qu'une particule, par exemple, se manifeste par la scintillation qui résulte de son impact sur un écran en une position donnée.

On a souvent voulu voir en Einstein un partisan de cette solution, en raison de son attitude critique à l'égard de la mécanique quantique et de son refus d'un "jeu de dés fondamental", qui ont indéniablement joué un grand rôle dans la motivation de ces théories. Louis de Broglie, par exemple, tout en se rendant bien compte qu'Einstein se proposait pour les quanta un programme différent du sien, se sentit encouragé par l'attitude critique de ce dernier sur l'incomplétude et la description statistique dans son retour, en 1952, à la direction première (causale et déterministe) de ses recherches, ébauchées dès 1926, et qu'il avait abandonnées ensuite pour adopter la conception 'orthodoxe'. Il nous reste donc à voir ce qu'il en est. Mais il est utile d'évoquer, en commençant, les opinions différentes sur ce sujet.

Max Born fait cette assimilation de la position d'Einstein à une recherche de variables cachées déterministes. "Il attendait", écrit-il, "la mise sur pied d'une théorie plus exacte qui supprimerait cette incomplétude. Son espoir ne s'est pas encore réalisé, et les physiciens ont de bonnes raisons (qui reposent principalement sur les travaux de von Neumann [...]) de croire que c'est

¹³ Bell 1976 b.

impossible"¹⁴. La référence au théorème de von Neumann sur l'incompatibilité de la mécanique quantique et de variables cachées déterministes¹⁵ indique bien que Max Born identifie ces dernières et la voie recherchée par Einstein. Son commentaire à une lettre ultérieure de ce dernier exprime la même opinion. Bien qu'Einstein critiquât dans sa lettre le modèle déterministe proposé en 1952 par David Bohm, le trouvant "un peu trop facile", Born n'en continue pourtant pas moins d'estimer que la théorie de Bohm était "totalement conforme à ses propres idées" [d'Einstein]¹⁶.

Abraham Pais constate, de son côté, dans sa biographie *Subtle is the Lord*, qu'il n'a jamais trouvé le terme 'variables cachées' dans les écrits ou dans les lettres d'Einstein, mais il ne s'attarde pas davantage sur le problème (il se dit d'ailleurs peu familier de la question des interprétations alternatives de la mécanique quantique)¹⁷.

Selon Bell lui-même, dans l'article où il démontre son théorème suivant lequel de telles variables (à séparabilité locale) sont incompatibles avec les prédictions statistiques de la mécanique quantique, Einstein était partisan des variables cachées. "Le paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen", écrit-il, "a été proposé comme un argument selon lequel la théorie quantique ne pouvait être une théorie complète, et des variables supplémentaires devaient lui être ajoutées. Ces variables additionnelles devaient rétablir dans la théorie la causalité et la localité"¹⁸. Bell indique ailleurs que deux textes d'Einstein, ses "Notes autobiographiques" et sa "Réponse aux critiques", "suggèrent que le problème des variables cachées présente un certain intérêt"¹⁹.

L'historien des sciences Max Jammer pense, quand à lui, qu'Einstein n'était pas partisan des variables cachées, et impute le crédit de l'opinion contraire au retentissement de l'article de Bell de 1964²⁰. Contestant, dans un texte sur "Einstein et les variables cachées"²¹, l'interprétation de Jammer, John Bell maintient que la position d'Einstein revient à défendre de telles variables, en se

¹⁴ Max Born, commentaire aux lettres n° 88 et 89, *in* Einstein, Born, 1969, trad. fr. p. 192.

¹⁵ Von Neumann 1932.

¹⁶ Einstein, Born 1969, commentaire de Max Born après la lettre n° 99. Born se rend compte, en fait, de ce qu'il ne s'agissait pas seulement, pour Einstein, de réinterpréter "les formules quantiques dans un sens déterministe" (*ibid.*), mais il ne tente pas d'approfondir le sens de cette constatation pour voir où se situait vraiment leur divergence.

¹⁷ Pais 1982, p. 456-457, en note.

¹⁸ Bell 1964 (*in* Bell 1987, p. 14).

¹⁹ Bell 1966 (*in* Bell 1987, p. 12): en fait, cet article a été écrit antérieurement à Bell 1964. Les textes d'Einstein sont Einstein 1946 et 1949. Voir les analyses que nous proposons dans Paty 1993 b.

²⁰ Jammer 1974. John Stachel, tout comme Max Jammer, estime qu'Einstein n'était pas partisan des variables cachées (Stachel 1986). Bernard d'Espagnat, de son côté (d'Espagnat 1976), ainsi que Mario Bunge du sien (Bunge 1985, vol. 7, p. 184), attribuent à Einstein le programme de variables cachées.

²¹ John Bell, "Einstein and hidden variables", en appendice à Bell 1976 a, p. 42-45 (et *in* Bell 1987, p. 89-91).

fondant sur les citations qu'il avait indiquées²². Dans la première, Einstein estime qu'il faut tenir ferme à l'hypothèse de l'indépendance de deux systèmes séparés spatialement (séparabilité locale). Dans la seconde, il compare la situation de la "théorie quantique statistique" à celle de la mécanique statistique par rapport à la mécanique classique. Pour Bell, cela signifie clairement une "adhésion à ce que l'on entend habituellement par variables cachées". Il donne deux autres citations d'Einstein qui (jointes au titre même de l'article 'EPR', "La mécanique quantique est-elle une théorie complète?") concluent à l'incomplétude de la théorie, à son caractère statistique résultant de cette incomplétude, et estiment qu'une théorie complète est possible²³. Bell indique également les références des lettres à Max Born dans lesquelles Einstein exprime son insatisfaction quant à l'interprétation de la mécanique quantique, et notamment son caractère statistique, récusant le "jeu de dés fondamental".

Bell identifie donc le diagnostic d'incomplétude de la mécanique quantique (et d'insatisfaction sur son caractère statistique) porté par Einstein et le projet de la compléter avec le "programme des variables cachées"²⁴: pourtant, dans les textes qu'il mentionne, Einstein ne dit rien relativement à des variables cachées. Cette identification ne correspond pas à l'analyse que nous avons pu faire nous-même de ces textes²⁵.

Nous savons, certes, qu'Einstein nourrissait l'espoir, et peut-être le projet, de parvenir à une *théorie complète* des phénomènes quantiques²⁶. Mais la voie qu'il envisageait n'était pas de partir du schéma théorique existant et de lui ajouter des éléments qui manqueraient, en *complétant* simplement la théorie existante: il fallait, à ses yeux, la fonder sur d'autres bases (d'autres principes, plus fondamentaux, d'autres concepts, moins classiques et 'mécaniques'). Si l'on entend par 'variables cachées' la perspective d'un déterminisme plus fin, fourni par une sous-structure qui serait simplement emboîtée dans la structure du niveau quantique, c'est-à-dire la perspective de garder comme point de départ les concepts classiques tels qu'ils sont employés en mécanique quantique, cette perspective n'est assurément pas la sienne.

Par contre, le programme de David Bohm dans ses premiers travaux, et celui de Louis de Broglie à partir de 1952, le premier concernant l'« onde-pilote », le second la « double solution », allaient indéniablement dans cette direction. Einstein a maintenu avec ces deux chercheurs des relations étroites, et c'est à son témoignage direct que nous allons faire appel quant à sa position sur leurs tentatives. Comme nous allons le voir, elles ne le contentaient pas, même s'il suivait ces travaux avec une certaine sympathie, dans la mesure où ils exprimaient une insatisfaction à l'égard de la mécanique quantique dans son interprétation dominante, considérée comme théorie fondamentale et complète.

²² Einstein 1946, p. 84-85, et 1949, p. 672.

²³ Einstein 1949, p. 666, et Einstein, Podolsky, Rosen, 1935.

²⁴ Bell 1976 a, éd. 1987, p. 90.

²⁵ Voir Paty 1993 b.

²⁶ *Ibid.*

S'il ne nous paraît pas possible d'identifier le programme d'Einstein et celui des variables cachées, l'opinion contraire de Bell sur ce sujet n'en représente pas moins un élément important pour comprendre la signification profonde des développements sur la non-localité. Comme Bell l'a montré, la non-séparabilité locale est une propriété générale des systèmes quantiques, dont la démonstration n'est pas liée à l'un ou l'autre des modèles particuliers de "variables cachées" visant à restaurer le déterminisme et la localité (c'est l'ensemble des théories locales et déterministes - et d'ailleurs aussi indéterministes - qui sont contraires aux prédictions de la mécanique quantique)²⁷. Cette propriété transcende, pour ainsi dire, ces modèles, et s'applique à toute théorie qui se proposerait de reproduire la mécanique quantique à titre d'approximation. Bell a obtenu son théorème, qui est ainsi un *théorème général sur la non-localité*, en transcrivant mathématiquement, comme il l'a lui-même indiqué²⁸, l'hypothèse de séparabilité locale d'Einstein en termes de paramètres cachés, et en comparant les prédictions ainsi obtenues à celles de la mécanique quantique considérées pour les mêmes systèmes. Les variables cachées qui interviennent dans les calculs intermédiaires disparaissent dans l'expression des grandeurs physiques finalement comparables.

Les 'variables cachées' au sens de Bell, telles du moins qu'il les envisage dans ses premières recherches sur la localité, ne s'identifient pas à un modèle d'un type particulier, quel qu'il soit. Elles sont simplement le moyen d'exprimer mathématiquement une propriété générale de systèmes physiques (la non-séparabilité locale) sur laquelle la mécanique quantique restait *a priori* muette: bien qu'elle fût incluse dans le formalisme, cette propriété aurait pu (n'eût été la démonstration du théorème) n'être qu'apparente et rester compatible avec une localité sous-jacente. On pourrait aussi bien, d'ailleurs, parler dans ce sens, pour la localité, si elle avait pu être maintenue, de '*propriété cachée*' (ou incontrôlable, ou muette). Tel me semble du moins le sens profond de l'assimilation que fait Bell de la position d'Einstein au programme général des variables cachées: elle se justifie dans la perspective de sa propre recherche (c'est la méditation sur la localité au sens d'Einstein qui l'a amené à formuler son théorème²⁹), sinon du point de vue strictement historique. Au surplus Bell admet parfaitement que le modèle non relativiste de Bohm de 1952 était trop simpliste (ce dont Bohm convenait d'ailleurs³⁰). Lui-même considère, à vrai dire, la théorie de l'onde-pilote avec sympathie³¹; mais ce qui le retient dans cette théorie, plutôt que son aspect de modèle causal, c'est qu'elle permet de régler un "problème de principe", qui préoccupait aussi Einstein, à savoir celui de la frontière entre la description en termes d'états quantiques et la description classique³².

²⁷ Cf. Clauser, Horne 1974; d'Espagnat 1975, 1976; Bell 1975. Voir Paty 1986 a.

²⁸ Cf. Bell 1964, éd. 1987, p. 14.

²⁹ Sur ce point, voir Paty 1986 a.

³⁰ Voir plus bas.

³¹ Cf. Bell 1982, 1987 et, pour une étude, Ben-Dov 1988.

³² Bell 1987, p. viii.

3. EINSTEIN ET LES PREMIERS TRAVAUX DE DAVID BOHM SUR L'INTERPRETATION CAUSALE.

Peu après la publication de son livre, *Quantum theory*, apprécié par Einstein et Pauli³³ et devenu un classique, David Bohm étudia la possibilité d'introduire des variables cachées en physique quantique. Dans son ouvrage, qui porte la marque d'une certaine influence de la philosophie de Bohr, il avait conclu à l'incompatibilité de telles variables avec la mécanique quantique, en raisonnant sur la base de l'expérience de pensée 'EPR'; il trouvait qu'elles s'opposaient au principe d'indétermination, en requérant que des éléments simultanés de réalité correspondent à des grandeurs non-commutables³⁴. C'est "stimulé par ses discussions avec Einstein", et par d'autres critiques de l'approche de Bohr, qu'il revint sur la question³⁵. Son point de départ est une critique particulière de l'interprétation de la mécanique quantique, à savoir le caractère invérifiable de la prétention de cette dernière à être la description la plus complète d'un système individuel (Bohm greffe, en quelque sorte, un aspect de l'objection d'Einstein sur une perspective encore marquée d'observationalisme).

Il propose alors de compléter la théorie en donnant une forme plus explicite à la fonction d'onde³⁶, ce qui revient en fait à supposer que chaque particule de l'ensemble décrit par la fonction ψ possède une position, x (qui constitue de fait la variable cachée), et une impulsion, mv , donc une trajectoire définie, qui est connue dès lors que l'état initial est donné. Au potentiel classique

³³ Bohm 1951. Les avis d'Einstein et Pauli sur l'ouvrage de Bohm sont indiqués par Bohm lui-même (cf. Jammer 1974, p. 279). Par ailleurs, dans une lettre à Nathan Rosen du 11.3.1954 (Archives Einstein), Einstein parle du "livre excellent" de Bohm.

³⁴ Bohm 1951, chapitre 22, sect. 19. D. Bohm montrait dans un chapitre antérieur que le principe d'indétermination n'a pas simplement une portée opératoire. Les relations d'indétermination entre deux grandeurs décrivant un système quantique (par exemple, la position q et la quantité de mouvement p) assurent qu'elles ne peuvent être définies en même temps avec une précision illimitée. Cette relation s'écrit: $\Delta q \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$, Δ représentant l'imprécision sur la grandeur considérée, et h étant la constante de Planck. La mécanique quantique représente les grandeurs par des opérateurs mathématiques (par ex., p est un opérateur de dérivation, $p = \frac{\square}{\square q}$), et l'inégalité ci-dessus est reliée au fait que ces opérateurs ne commutent pas, c'est-à-dire que: $q p - p q \neq 0$.

³⁵ Selon son témoignage, rapporté par Max Jammer. Parmi ces critiques, celles faites par des physiciens russes comme Vladimir Fock ont joué un rôle. Sur la reprise des variables cachées par David Bohm, voir Jammer 1974, p. 278-296. Bohm était assistant à l'Université de Princeton avant d'être victime de la 'chasse aux sorcières' du sénateur Joseph McCarthy, suspendu, et contraint de chercher un emploi à l'extérieur. Grâce à la recommandation d'Einstein, il obtint un poste de professeur à l'université de São Paulo, au Brésil, où il demeura de 1951 à 1955.

³⁶ $\psi = R \exp(i \frac{S}{\hbar})$, R et S étant des fonction réelles (la probabilité de densité est $\rho(x) = R^2(x) = |\psi|^2$), dont les équations respectives sont obtenues en portant ψ dans l'équation de Schrödinger. L'équation de S , à la limite classique où l'on fait tendre \hbar vers 0, se ramène à celle de Hamilton-Jacobi de la mécanique. Le gradient de S , $\frac{\text{grad } S}{m}$, est interprété, à la limite classique, comme vitesse d'une particule de position x . Cf. Bohm 1952 (première partie).

s'ajoute un potentiel quantique, fonction de la position, qui exerce une force réelle et s'avère être la source du mouvement non classique des particules³⁷. Les prédictions de la théorie retrouvent celles de la mécanique quantique, la différence résidant seulement dans l'interprétation de ψ , supposée représenter un champ réel (la variable décrivant la trajectoire demeure *cachée* dans la mesure où il n'est pas possible de connaître la position initiale).

Pour l'essentiel, la théorie de David Bohm est analogue à celle de l'onde-pilote proposée par Louis de Broglie au Conseil Solvay de 1927, et réfutée alors par Pauli³⁸. Bohm la compléta par une théorie de la mesure, dans laquelle la variable cachée dépend en même temps du système et de l'appareil de mesure, l'interaction des deux induisant des fluctuations instantanées du potentiel quantique sur tout le système (mais il s'agit d'un processus sans échange d'information, qui ne viole donc pas le principe de relativité)³⁹. Il rendait compte de la sorte de l'expérience de pensée 'EPR': la suppression du paradoxe réside, à vrai dire, en ceci que l'explication proposée équivaut à une traduction de la non-séparabilité (avec cet avantage de l'affranchir de la difficulté de la réduction de la fonction d'onde).

Contrairement à l'attente de Bohm, Einstein ne manifesta pas un grand enthousiasme pour sa proposition. "J'ai le sentiment", lui écrit Bohm, "que vous ne voulez pas accepter ce point de vue, pour la raison que vous le regardez comme non plausible"⁴⁰. Et d'exposer à son correspondant qu'à ses yeux la plausibilité est un sentiment subjectif et que les seuls critères d'acceptabilité ou de rejet d'une théorie sont sa cohérence interne, son accord avec les faits connus, sa capacité à fournir une description objective de la réalité qui soit complète et précise. Un peu plus tard, Bohm fait état de ce que "Pauli a admis la consistance logique" de sa propre interprétation, mais qu'"il continue d'en rejeter la philosophie" en disant "qu'il ne croit pas en une théorie qui puisse même nous permettre de *concevoir*

³⁷ Le potentiel quantique est donné par: $U(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta R}{R}$, (avec $\hbar = \frac{h}{2\pi}$).

³⁸ De Broglie 1928 b, et Pauli, interventions dans *Electrons et photons* 1928, p. 134-135. C'est après avoir rédigé la première partie de son travail que Bohm se rendit compte que de Broglie avait proposé une idée semblable une vingtaine d'années auparavant: il lui envoya son article que, dans un premier temps, de Broglie jugea de façon critique (reprenant les objections faites naguère par Pauli à sa propre théorie: de Broglie 1951), avant d'y trouver une stimulation qui le poussa à revenir à ses anciennes idées (cf. de Broglie 1952 a et b). Voir plus bas. Pauli rejeta immédiatement la théorie de Bohm (voir Jammer 1974, p. 279). Cette dernière est également équivalente au modèle hydrodynamique de Madelung (Madelung 1926).

³⁹ Bohm 1952 (deuxième partie). La théorie de l'onde-pilote ou des variables cachées de Bohm évite ainsi la difficulté conceptuelle d'une séparation arbitraire entre le système physique et l'appareil de mesure, inhérente à la version courante de la mécanique quantique, et résoud le problème de la mesure en s'affranchissant de la réduction ('du paquet d'onde'). John Bell (Bell 1976 b, 1980, 1981, 1982) a souligné son intérêt à cet égard, et rapproché, pour cette raison, la théorie de l'onde-pilote et la théorie d'Everett dite 'de l'état relatif' (cf. Ben-Dov 1987, 1988).

⁴⁰ David Bohm, lettre à Albert Einstein, non datée, écrite de Princeton, selon toute vraisemblance en 1951 (Archives Einstein). Bohm y fait allusion à une conversation téléphonique entre eux. Toutes les lettres échangées entre D. Bohm et A. Einstein que nous citons dans ce qui suit se trouvent aux Archives Einstein.

une distinction entre le cerveau de l'observateur et le reste du monde"⁴¹. (Autrement dit, Pauli rejette toute idée de l'observation et de la mesure qui ne soit pas strictement conforme à l'interprétation observationnaliste orthodoxe).

Tout en appréciant vivement l'indépendance de jugement du jeune physicien⁴², Einstein n'est pas disposé à le suivre: sans doute parce que, à ses yeux, sa théorie en reste au cadre des concepts de la mécanique quantique, quand il faudrait les dépasser. Expriment à Max Born le sentiment que la tentative de David Bohm "d'interpréter la théorie quantique dans un sens déterministe" lui "semble un peu trop facile", Einstein ajoute: "mais tu es évidemment mieux placé pour en juger"⁴³. Si Born lui semble mieux placé pour en juger, c'est bien que, pour lui, la théorie de Bohm (tout comme celle de Louis de Broglie de 1927) n'est qu'une simple variante de la mécanique quantique, et elle en partage le caractère 'empirique'.

Dans son texte de 1953 offert en hommage à Max Born⁴⁴, Einstein exprime son insatisfaction de la voie proposée par Bohm, retrouvant l'une des critiques de Pauli à l'onde pilote de de Broglie (la vitesse qui résulte des équations devrait être nulle, et l'on ne retrouve pas le mouvement classique à la limite macroscopique)⁴⁵, et concluant que "la seule interprétation de l'équation de Schrödinger admissible jusqu'à présent est l'interprétation statistique donnée par Born". Bohm fait valoir, au contraire, que l'interprétation causale proposée par de Broglie (en 1927) et par lui-même permet de retrouver le cas macroscopique comme cas limite, et que c'est l'interprétation probabiliste de Born qui se trouve en défaut sur ce point⁴⁶. Il revient à la charge, comprenant que c'est la direction de

⁴¹ Dans une lettre ultérieure, de fin décembre 1951. Il s'agit probablement d'une réaction de Pauli à la seconde partie de Bohm 1952, moins négative qu'à la première. Quelque temps plus tard, Pauli publiera une vive critique des tentatives de David Bohm (Pauli 1953, *in* de Broglie 1953 a), que Max Born commente en ces termes: Pauli "assassine Bohm, non seulement sur le plan philosophique, mais aussi pour ses idées en physique" (Max Born, lettre à Einstein du 26.11.1953, *in* Einstein, Born 1969, lettre n° 105).

⁴² Comme l'attestent plusieurs documents où il en fait un vif éloge: cf. Einstein, lettres à P.M.S. Blackett, 17.4.1951, à Abrão de Morais, 5.8.1951 (Archives Einstein).

⁴³ Einstein, lettre à Max Born du 12.5.1952, *in* Einstein, Born 1969, lettre n°99: "As-tu vu que Bohm croit (comme de Broglie il y a 25 ans) pouvoir interpréter la théorie quantique dans un sens déterministe? Ce procédé me semble un peu trop facile; mais tu es évidemment mieux placé pour en juger". Born, dans son commentaire (Born 1969, p. 207), écrit: "Bien que [la théorie de David Bohm] soit totalement conforme à ses propres idées [*sic*], la simple réinterprétation des formules quantiques dans un sens déterministe lui semblait 'trop facile'" (cf. plus haut, la note 16, et Paty 1993 a).

⁴⁴ Einstein 1953 a. Einstein mentionne les deux tentatives alors effectuées pour décrire les "'états réels' d'un système individuel", celle de Bohm et celle de Schrödinger, et les réfute toutes deux. De la première, qui "constitue un retour à de Broglie", il écrit qu'"elle a été poursuivie avec beaucoup de finesse par Bohm".

⁴⁵ Avec l'interprétation de Schrödinger, selon laquelle ψ décrit l'état réel, l'étalement de l'onde empêche la localisation, et interdit donc également, expose Einstein, de retrouver la limite macroscopique.

⁴⁶ Lettre de David Bohm à Einstein, du 4 février 1953. Einstein avait communiqué son texte (Einstein 1953 a) à Bohm avant l'impression; ce dernier lui exprime son désaccord avec sa façon de voir. Einstein accepte de faire suivre sa contribution par celle de Bohm (cf. Bohm 1953). Il

pensée, plus que le détail de l'argumentation, qu'Einstein n'aime pas: "Mais vous n'avez pas prouvé que ce modèle est inconséquent, parce qu'il s'accorde avec tous les faits que nous connaissons actuellement", et "d'une manière générale je ne requerrais pas votre principe [de simplicité logique] pour *rejeter* une théorie"⁴⁷. Si la protestation de Bohm sur ce dernier point est légitime, elle n'en éclaire pas moins la différence entre son point de vue et celui d'Einstein: le problème de ce dernier n'était pas de formuler un modèle théorique valide, mais une *théorie* entendue dans un sens fondamental, et c'est en pensant à une telle théorie qu'il invoquait le critère de simplicité logique.

L'appréciation exacte d'Einstein sur les conceptions de David Bohm à cette époque et sur la voie déterministe et causale, nous la trouvons dans une lettre qu'il adressa à Aron Kuppermann en 1953⁴⁸. "Le Dr Bohm", écrit-il, "a redécouvert une idée de de Broglie vieille de trente ans et, avec une grande pénétration, l'a élargie et approfondie. Le but est d'obtenir la description du système individuel au lieu de l'ensemble auquel appartient le système"⁴⁹. Pour Einstein, selon ce qu'il expose à son correspondant, il n'y a pas d'objection à faire, "d'un point de vue purement logique", à cette "interprétation du formalisme de l'actuelle théorie quantique". Mais elle lui semble cependant inacceptable "d'un point de vue physique" (à savoir le fait que, selon lui, la théorie de Bohm ne retrouve pas le cas classique comme limite). Et il conclut ainsi son commentaire: "Je pense qu'il n'est pas possible de se débarrasser du caractère statistique de la théorie quantique actuelle en ajoutant simplement quelque chose à cette théorie sans changer les concepts fondamentaux relatifs à la structure tout entière"⁵⁰. Le principe de superposition et l'interprétation statistique sont inséparablement liés entre eux. Si l'on pense qu'il faut éviter l'interprétation statistique et la remplacer, il semble que l'on ne puisse pas conserver une équation de Schrödinger *linéaire*⁵¹, qui implique, par sa linéarité, le principe de superposition des 'états'. La remarque s'applique d'ailleurs aussi bien, par-delà le modèle en question - la théorie de l'onde-pilote dans la version de Bohm - à tous les modèles théoriques de ce genre.

La correspondance régulière que Bohm et Einstein continuèrent d'entretenir tout au long des mois suivants, jusqu'à la mort du second, nous permet

propose également de demander à de Broglie de donner son point de vue (cf. de Broglie 1953 c, voir plus loin). Cf. Einstein, lettre à David Bohm, du 17.2.1953; dans cette lettre, Einstein rappelle sa conception de l'interprétation de Born de la fonction ψ et son lien à la mesure et à la mécanique classique.

⁴⁷ D. Bohm, lettre à Einstein, février 1953 (souligné par D.B.).

⁴⁸ Einstein, lettre à Aron Kuppermann du 14.11.1953 (Archives Einstein). A. Kuppermann, de l'Université de Notre-Dame (Indiana), projetant d'organiser un séminaire sur les idées de David Bohm, sollicitait l'avis d'Einstein.

⁴⁹ Suit à cet endroit la courte explication technique suivante: "L'interprétation statistique de Born de la fonction ψ est remplacée par une règle selon laquelle une ligne d'univers est associée à une fonction ψ donnée, qui est déterminée par une configuration initiale donnée (point) dans l'espace des coordonnées".

⁵⁰ Souligné par moi (M.P.).

⁵¹ Souligné par Einstein.

de suivre la position d'Einstein en relation au développement des travaux de Bohm (en collaboration, en 1954, avec Jean-Pierre Vigier⁵²) dans la direction d'une théorie causale, cette fois relativiste. Bohm considère maintenant⁵³ que la fonction ψ exprime bien une propriété statistique de la matière, et qu'elle est une approximation statistique d'un champ plus fondamental, le rapport entre les deux étant analogue à celui du mouvement brownien aux mouvements moléculaires sous-jacents. "Ce point de vue" écrit-il, "tend à se rapprocher de votre idée selon laquelle la mécanique quantique est 'incomplète'". Bohm pense, en fait, que c'est au niveau subatomique (celui des particules élémentaires) que l'on trouvera la clé des lois causales (toutefois il n'exclut pas que ce puisse être au niveau de l'unification de l'électromagnétisme et de la gravitation, c'est-à-dire dans la direction privilégiée par Einstein). Einstein l'encourage, sans se prononcer sur la voie particulière choisie par son correspondant, soulignant la difficulté de l'approche fondamentale - et rappelant incidemment le caractère "trop facile" de sa solution antérieure⁵⁴.

A Einstein qui évoque l'éventualité d'abandonner le continuum et l'espace et le temps comme concepts fondamentaux⁵⁵, Bohm exprime l'idée que toutes les possibilités de description de la nature en termes de mouvements continus n'ont pas été épuisées. Il lui semble, par ailleurs, qu'il faudrait d'abord connaître les lois du microscopique, pour obtenir ensuite celles du domaine macroscopique comme approximation statistique, le chemin inverse (celui dans lequel il voit Einstein) lui paraissant douteux. "Bien sûr", précise-t-il, "il n'y a pas de raison pour que [le chemin du macroscopique au microscopique] ne marche pas; mais, tout compte fait, il semble plus vraisemblable que les lois à grande échelle impliquent un processus de moyenne qui laisse peut-être échapper des propriétés *qualitatives* importantes du niveau microscopique, de sorte que la clé fondamentale peut nous échapper si nous étudions *seulement* les lois de champ macroscopique"⁵⁶. La remarque en elle-même est importante du point de vue méthodologique, et met le doigt sur ce qui est sans doute une faiblesse de l'approche d'Einstein. Celui-ci, comme nous le savons, ne fait pas de séparation entre les lois du microscopique et du macroscopique et recherche un principe

⁵² Sur la direction de recherche de J.-P. Vigier, voir plus bas.

⁵³ David Bohm, lettre à Einstein du 3.2.1954.

⁵⁴ C'était le terme qu'il avait employé dans sa lettre à Max Born: voir plus haut. Einstein, lettre à David Bohm du 10.2.1954: "Je me réjouis de ce que vous soyez profondément plongé dans la recherche d'une description objective des phénomènes et de ce que vous éprouviez le sentiment que *la tâche est bien plus difficile que ce que vous aviez pensé jusqu'alors*. Ne vous laissez pas impressionner par l'immensité du problème. Si Dieu a créé le monde, son premier souci n'a sûrement pas été de nous rendre sa compréhension facile. C'est ce que je pense avec force depuis cinquante ans" (souligné par moi, M.P.). Et encore, Einstein, lettre à David Bohm, 28.10.1954 (Bohm lui a simplement écrit, le 18 octobre, que son travail avançait bien): "Au cours des dernières années, on a vu plusieurs tentatives de compléter la théorie quantique comme vous avez aussi essayé de le faire. Mais il me semble que nous sommes très loin d'une solution satisfaisante à ce problème".

⁵⁵ Dans la suite de la lettre citée dans la note précédente: voir Paty 1993 b.

⁵⁶ David Bohm, lettre à Einstein du 14.11.1954.

formel qui soit applicable aux deux, tout en laissant de côté dans cette recherche les indications (à ses yeux trop empiriques, et cependant d'une richesse considérable) de la physique du microscopique.

Mais, par ailleurs, la considération de principe énoncée par Bohm est marquée par sa propre tentative d'alors, de modéliser les phénomènes physiques en termes de niveaux emboîtés les uns dans les autres, ce qui en restreint la portée. Son point de vue est, plus explicitement encore qu'avant, celui de variables cachées, responsables cette fois d'une dynamique sous-jacente: "Sous la théorie quantique, il y a un niveau subquantique de mouvements déterminés de façon continue et causale...", la théorie quantique étant retrouvée par passage aux moyennes (à l'instar du mouvement brownien, déjà évoqué). "En d'autres termes", explique Bohm, "les événements au niveau atomique sont *contingents* relativement aux mouvements (généralement irréguliers) de quelque espèce d'entité encore inconnue mais qualitativement nouvelle, qui existe sous le niveau atomique. Il en résulte que les relations entre les objets qui peuvent être définis au niveau atomique seront caractérisées par les lois du hasard, puisqu'elles ne seront déterminées qu'en termes d'un genre quasi-ergodique des mouvements de nouvelles sortes d'entités qui existent au niveau inférieur"⁵⁷.

Cette idée d'une "hiérarchie sans fin de microstructures" ne plaît pas à Einstein: penser que la solution se trouve dans les structures sub-atomiques correspond, pour lui, à l'idée de la "grande majorité des physiciens contemporains", même s'"ils ne vont pas aussi loin" que Bohm⁵⁸. "Mon instinct", écrit-il à ce dernier, "ne me permet pas de suivre tout ce développement, même si c'est par une série impressionnante de découvertes empiriques que l'on y est parvenu et qu'il est testé"⁵⁹. Et il lui rappelle sa voie propre: "Je ne crois pas à des lois pour le microscopique ou le macroscopique, mais seulement à des lois (de structure) d'une validité rigoureuse générale. Et je crois que ces lois sont *logiquement simples*, et que la foi dans leur simplicité est notre meilleur guide. Dans ce cas, il ne serait pas nécessaire d'avoir pour point de départ plus qu'un nombre relativement faible de faits empiriques. Si la manière dont la nature est organisée ne correspond pas à cette croyance, alors il ne nous reste que très peu d'espoir de la comprendre plus profondément". Mais il admet que la simplicité logique peut aussi nous tromper, si l'on ne part pas des bons concepts élémentaires: "Si, par exemple, il n'est pas exact que la réalité puisse être décrite comme un champ continu, alors tous mes efforts sont vains, même si les lois sont de la plus grande simplicité imaginable".

Pour Einstein, l'absence de possibilité de tester empiriquement sa théorie n'est pas non plus une preuve de sa fausseté. Elle tient à la nature mathématique des équations, non linéaires, et à l'impossibilité d'obtenir des singularités: "cela montre que nos méthodes mathématiques sont insuffisantes

⁵⁷ *Ibid.* L'idée de base cette fois est un champ à équations non-linéaires. Bohm ne pense pas très plausible l'abandon du continuum d'espace-temps.

⁵⁸ Einstein, lettre à David Bohm du 24.11.1954.

⁵⁹ *Ibid.* Il s'agit des progrès de la physique quantique et des physiques atomique, nucléaire et des particules élémentaires.

dans leur état actuel pour aboutir à une décision". "Je ne cherche pas à vous convaincre", indique-t-il à Bohm, "je voulais simplement vous montrer comment j'en suis venu à cette attitude. Ce qui m'a particulièrement frappé de manière très forte, c'est de m'être rendu compte qu'en utilisant une méthode semi-empirique on ne serait jamais parvenu aux équations de la gravitation pour l'espace vide. C'est seulement le point de vue de la simplicité logique qui peut nous aider ici (loi du champ relativiste la plus simple pour un champ tensoriel (symétrique))"⁶⁰.

4. EINSTEIN ET LA DIRECTION DES RECHERCHES DE LOUIS DE BROGLIE.

Lorsque Louis de Broglie proposa, en 1926-1927, sa théorie de la 'double solution' (contemporaine de l'interprétation probabiliste de Max Born), il était mené par le souci de réconcilier les quanta de lumière d'Einstein (c'est-à-dire la lumière en tant que corpuscule) et les phénomènes optiques (entendons ondulatoires) de diffraction et d'interférences. Dans sa "nouvelle optique des quanta de lumière"⁶¹, le corpuscule lumineux est "une sorte de singularité au sein d'une onde étendue à laquelle il est incorporé, et qui⁶² guide son mouvement parce qu'il est solidaire de cette onde", selon une description résumée qu'il en donna plus tard⁶³: il en rapporte d'ailleurs l'inspiration à Einstein⁶⁴, qui avait formulé, à l'aube de la dualité onde-corpuscule, une hypothèse sur le champ à points singuliers⁶⁵, et dont l'idée de 'champ fantôme' guidant la particule de lumière pourrait fort bien l'avoir influencé comme elle l'avait fait pour Born⁶⁶.

Mais l'onde en question ne pouvait être celle décrite par la fonction ψ de la mécanique quantique, homogène et ne contenant pas de singularité, et dans laquelle de Broglie voyait "une onde fictive", représentation incomplète et statistique ne décrivant que des moyennes. A la solution de la mécanique quantique devait correspondre une autre solution à singularité qui représenterait le système réel (et individuel) dans son comportement spatio-temporel. Avec cette théorie, qui prolongeait son extension de la dualité onde-corpuscule aux éléments de matière, de Broglie poursuivait son programme⁶⁷ d'"obtenir une image précise du monde microphysique réalisant une véritable synthèse permettant de comprendre clairement la coexistence des ondes et des corpuscules". Il s'agissait,

⁶⁰ *Ibid.* Einstein évoque son travail en Relativité générale, que nous avons analysé par ailleurs (Paty 1993 a).

⁶¹ De Broglie 1926.

⁶² Selon le résultat qu'il obtint dans son second article (de Broglie 1927 a). Un autre travail de la même année (de Broglie 1927 c) donne une présentation d'ensemble de sa théorie.

⁶³ De Broglie 1961.

⁶⁴ "... Conception qui m'était inspirée, plus ou moins consciemment, par de profondes remarques qu'avait faites Einstein à ce sujet" (de Broglie 1961).

⁶⁵ En 1909.

⁶⁶ Einstein avait proposé cette idée au tout début des années vingt. Voir Paty 1993 b.

⁶⁷ Ou, selon ses propres termes, "le but qui [jusqu'en 1927] avait toujours été le mien" (de Broglie 1961).

ce faisant, de préserver les caractères classiques du corpuscule, tout en réalisant son union avec l'onde, c'est-à-dire de remplacer la dualité onde *ou* corpuscule par une synthèse onde *et* corpuscule⁶⁸. Mais ce n'était encore qu'une ébauche de théorie, plus intuitive que rigoureuse, et dans la formulation de laquelle de Broglie se heurtait à de grandes difficultés mathématiques.

De Broglie ne présenta au Conseil Solvay de 1927 qu'une version simplifiée de la théorie de la double solution, sous la forme de sa théorie de l'"onde pilote"⁶⁹. C'est au sein de l'onde continue elle-même, solution de l'équation de la mécanique quantique (la fonction ψ), qu'il place le corpuscule, en le supposant entraîné (guidé) par elle⁷⁰. La théorie se contente ici de constater la dualité onde-corpuscule, sans essayer de l'expliquer comme se le proposait la théorie de la double solution; sous cette "forme atténuée" de ses premières idées, elle avait "l'avantage de conserver la notion intuitive de corpuscule ponctuel bien localisé dans l'espace et de maintenir le déterminisme rigoureux de son mouvement". Mais ce qu'elle gagnait en simplicité et en caractère intuitif (au sens de l'intuition visuelle), elle le perdait en vraisemblance. Outre l'objection que Pauli ne manqua pas de lui opposer immédiatement⁷¹, de Broglie lui-même se rendit compte que l'onde de la mécanique quantique ne peut représenter concrètement le mouvement du corpuscule en accord avec la physique classique (elle est une représentation sur l'espace de configuration, non sur l'espace physique, et il critiquait d'ailleurs lui-même pour cela la conception de Schrödinger qui interprétait cette onde comme réelle).

Pour cette raison, et d'autres, il renonça à cette direction de recherches et se rallia à la mécanique quantique orthodoxe⁷². Mais à vrai dire, même dans ce long ralliement qui dura vingt cinq années, jusqu'en 1952, la mécanique quantique qu'il professait était encore essentiellement une théorie de la dualité onde-corpuscule, qui se satisfaisait, certes, d'une interprétation probabiliste pour une fonction d'onde à la signification physique abstraite. C'est à ces circonstances qu'Einstein fait allusion dans sa préface à la traduction anglaise du livre de de Broglie *Physique et microphysique*⁷³, écrivant, à propos des idées présentées dans le livre (dont l'original fut publié en 1947, donc avant le retour de de Broglie à ses idées antérieures): "Ce qui, cependant, m'a fait le plus impression, c'est la présentation sincère du combat pour parvenir à un fondement conceptuel logique de la physique, qui a finalement conduit de Broglie à la ferme conviction que tous

⁶⁸ Comme l'écrit Max Jammer (Jammer 1974, p. 49).

⁶⁹ Pour échapper, comme il le dit plus tard, aux critiques pour manque de rigueur en raison de ces difficultés (de Broglie 1952 a). Voir, pour la communication au Conseil Solvay, de Broglie 1928 b.

⁷⁰ Selon la relation $\varphi = -\frac{\hbar}{m} \text{grad } \varphi$ (φ : vitesse locale d'un fluide fictif de densité $|\psi|^2$; φ est défini par $\psi = a \exp(i\varphi)$). C'est, en fait, le modèle hydrodynamique de Madelung (Madelung 1926), retrouvé indépendamment par de Broglie.

⁷¹ Voir plus haut.

⁷² De Broglie 1973.

⁷³ De Broglie 1947.

les processus élémentaires sont de nature statistique"⁷⁴.

Le travail de David Bohm retrouvant l'«onde-pilote» fut, nous l'avons dit, l'occasion pour de Broglie de reprendre son ancien programme d'une représentation spatio-temporelle de la physique quantique, c'est-à-dire de la dualité des ondes et des corpuscules que cette dernière n'avait, pour lui, fondamentalement jamais cessé d'être. Les améliorations apportées à la théorie par Bohm (notamment l'analyse des processus de mesure) permettaient d'écarter certaines des anciennes objections de Pauli. D'autre part, Jean-Pierre Vigié venait, de son côté, d'établir un rapprochement entre la théorie de la double solution de de Broglie et un théorème d'Einstein (formulé à la même époque que la première, en 1927) sur un sujet tout différent, la Relativité générale⁷⁵; selon ce théorème, les particules apparaissent comme des singularités dans la métrique de l'espace-temps, pour des équations non-linéaires, ce que Vigié raccordait aux idées de Bohm. En reprenant d'Einstein le thème de la complétude, de Broglie vit, dans ce regain d'intérêt pour son ancienne théorie, la possibilité de dépasser "l'indéterminisme et l'impossibilité de représenter les réalités de l'échelle atomique d'une façon précise" (tout en admettant la validité de la mécanique quantique actuelle⁷⁶) en direction d'"une réalité parfaitement déterminée et descriptible dans le cadre de l'espace et du temps par des variables qui nous seraient cachées, c'est-à-dire qui échapperaient à nos déterminations expérimentales"⁷⁷.

Toutes les recherches ultérieures de Louis de Broglie furent dès lors orientées dans cette direction⁷⁸. A la théorie de la double solution, il devait plus tard adjoindre, à partir de 1960, l'idée d'une «thermodynamique cachée des particules», c'est-à-dire de fluctuations de la localisation d'une particule, qui s'appuie sur l'équivalence, en thermodynamique, pour ce qui est du résultat, entre la fluctuation de position d'une particule unique localisée, et la répartition statistique d'un ensemble de particules localisées: ce qui revient à l'introduction d'un élément aléatoire dans la théorie de la double solution. En élaborant cet

⁷⁴ Einstein 1955.

⁷⁵ Einstein, Grommer 1927. Ce premier résultat du travail d'Einstein avec Jakob Grommer avait ensuite été étendu dans ses travaux avec Banesh Hoffmann et Leopold Infeld (Einstein, Infeld, Hoffmann 1938 a; Einstein, Infeld 1938 b). "Il est intéressant de noter", écrivait à l'époque Einstein à Ehrenfest au sujet du premier travail, "que des équations de champ peuvent déterminer le mouvement des singularités" (Einstein, lettre à Ehrenfest du 11.1.1927, Archives Einstein). Leur mouvement est celui de géodésiques de l'espace-temps.

⁷⁶ Y compris les relations de Heisenberg, qu'il attribuait à l'interaction due à la mesure.

⁷⁷ De Broglie 1952 b. Voir également de Broglie 1952 a. De Broglie a évoqué en détail son parcours, dans un article que son titre résume: "De la mécanique ondulatoire à la mécanique quantique (l'aller et le retour)" (de Broglie 1973).

⁷⁸ Voir, par exemple: de Broglie 1951, 1953 b et c, etc. Evoquant, en 1952, la perspective entrevue par Vigié et lui-même, de Broglie écrit: "En se représentant les corpuscules matériels (et également les photons) comme des singularités dans la métrique de l'espace-temps entourées d'un champ ondulatoire dont elles feraient partie et dont la définition introduirait la constante de Planck, on devrait parvenir à unir les conceptions d'Einstein sur les particules et celles de ma théorie de la double solution. L'avenir dira si cette grandiose synthèse de la relativité et des quanta est vraiment possible" (de Broglie 1952 a). (C'est ici de la Relativité générale qu'il s'agit. Mais seule la Relativité restreinte est concernée par les travaux effectifs de de Broglie.)

aspect de sa théorie, de Broglie invoquait la remarque d'Einstein, dans l'article donné par ce dernier à son volume jubilaire⁷⁹, faisant un parallèle entre la mécanique statistique et la loi du mouvement brownien qui ne fournissent, ni l'une ni l'autre, une base de départ pour une théorie complète⁸⁰.

Einstein avait suivi en leur temps les tentatives de de Broglie, comme toutes celles qui se proposaient de donner corps à la physique des quanta. Il avait même soutenu de Broglie au Conseil Solvay de 1927 et, sinon le détail de sa théorie, du moins la direction générale de sa recherche, dans la mesure où elle se portait sur ce qu'il considérait comme des difficultés réelles de la mécanique quantique⁸¹. Toutefois, comme de Broglie lui-même devait en faire la remarque, si Einstein "[l]'encourageait dans la voie où [il, de Broglie, s'] était engagé", c'était "sans cependant approuver nettement [s]a tentative"⁸². De Broglie diagnostique d'ailleurs chez Einstein une "attitude réservée, [une] sorte de timidité devant la question des quanta, qui depuis 1925 l'avait empêché de faire et même d'encourager explicitement toute tentative de solution du problème des ondes et des corpuscules"⁸³.

Dans le texte de 1953 offert en hommage à Louis de Broglie, Einstein évoque précisément les efforts de ce dernier pour "compléter la théorie ondulatoire des quanta, et chercher à donner, *dans le cadre conceptuel de la mécanique classique (point matériel, énergie potentielle)*, une description complète de la configuration d'un système en fonction du temps - idée sur laquelle, assez récemment et sans connaître le travail de de Broglie, vient de retomber M. David Bohm (théorie de l'onde-pilote)"⁸⁴. Les expressions mêmes qu'il emploie montrent bien comment Einstein voit le programme de de Broglie et celui de Bohm: comme la recherche d'une complétude théorique au sens du déterminisme de la physique classique. Il indique d'ailleurs aussitôt que ce n'est pas dans ce sens-là qu'il a lui-même orienté ses recherches: "J'ai pourtant sans cesse cherché un moyen de résoudre l'énigme des quanta d'une autre manière..."⁸⁵.

Sa direction propre, comme nous l'avons vu, est déterminée par la

⁷⁹ Einstein 1953 e, *in* de Broglie 1953 a.

⁸⁰ De Broglie 1973.

⁸¹ Einstein avait fait une remarque concernant la probabilité de présence de particules à telle position de l'écran, soulignant déjà que la représentation par l'onde de Schrödinger impliquait une non-localisation: exprimant cette dernière en termes d'influence instantanée à distance entre deux points de l'écran, il y voyait une insuffisance de la théorie. A la suite de cette remarque, il avait déclaré: "Je pense que M. de Broglie a raison de chercher dans cette direction" (Einstein 1928, p. 256: voir Paty 1985). De Broglie le rappela d'ailleurs (de Broglie 1973).

⁸² De Broglie 1952 b.

⁸³ De Broglie 1955.

⁸⁴ Einstein 1953 b, p. 4-5 (souligné par moi, M.P.).

⁸⁵ Ceci, dès la naissance de la théorie ondulatoire: "bien que j'aie assisté avec admiration, en des années de relative jeunesse, à la découverte géniale faite par Louis de Broglie d'un lien intime entre les états quantiques discrets et les états de résonance - j'ai pourtant ...", et Einstein précise que son texte (1953 b) est consacré à essayer d'expliquer pourquoi sa voie est différente (p. 4-5): voir, par ailleurs, notre analyse des conceptions d'Einstein (Paty 1993 b).

conviction que le point de départ fondamental doit être différent (tel est le sens de ses considérations sur l'incomplétude): "Il m'apparaît que la théorie quantique statistique constitue aussi peu un point de départ utilisable pour l'élaboration d'une théorie plus complète que, peut-être, la théorie du mouvement brownien fondée sur la mécanique classique et la loi de la pression osmotique n'aurait pu constituer un point de départ utilisable pour la construction de la mécanique cinétique des molécules, si la théorie du mouvement brownien avait précédé celle-ci"⁸⁶.

La correspondance échangée entre Einstein et de Broglie en 1953 et 1954 comporte des éléments d'un vif intérêt qui confirment et complètent ce que nous savons de leurs positions respectives. Ayant proposé à de Broglie, comme il l'avait fait à Bohm, de s'associer par des contributions qui préciseraient leurs points de vue respectifs à l'ouvrage en hommage à Max Born⁸⁷, Einstein lui dit se réjouir d'avoir ainsi l'occasion de savoir ce que Louis de Broglie pense actuellement "des fondements de la théorie quantique", et trouver utile que son article et celui de Bohm paraissent, car, dit-il, "je sais que l'intérêt pour les questions de principe est très vif dans la nouvelle génération de physiciens"⁸⁸. De Broglie lui avait adressé une lettre d'acceptation par laquelle il annonçait l'envoi d'une courte note "précisant [son] point de vue actuel sur la question de l'interprétation de la Mécanique ondulatoire", et indiquait à son correspondant que son point de vue "est assez différent de celui de M. Bohm"⁸⁹. La théorie de Bohm lui paraît "inacceptable sous sa forme actuelle", "parce qu'elle considère l'onde ψ comme une réalité physique"⁹⁰: la double solution est plus satisfaisante à ses yeux, puisque l'onde ψ de la mécanique quantique reste fictive, l'onde u étant seule réelle (c'est elle qui porte le corpuscule); mais son existence requiert des équations non-linéaires.

⁸⁶ Einstein 1953 b, p. 10-11. Cette remarque d'Einstein eut, comme on l'a dit, valeur d'inspiration pour le développement par de Broglie d'une 'thermodynamique cachée des particules', mais cela ne veut évidemment pas dire pour autant que cette dernière soit plus proche des vues d'Einstein (elle fut d'ailleurs développée après sa mort).

⁸⁷ Einstein, lettre à Louis de Broglie du 2.4.1953 (Archives Einstein). Il leur offrait ainsi une tribune internationale de choix pour exposer leurs idées (Born étant le fondateur de l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde et l'un des mentors de l'interprétation courante de la mécanique quantique). Nous avons mentionné plus haut la lettre à Max Born (Einstein, lettre à Max Born, 12.10.1953, lettre n° 103), dans laquelle Einstein présentait sa propre contribution à ce volume en son honneur comme "une comptine scientifique qui a un peu effrayé Bohm et de Broglie" (auxquels, en conséquence, il a proposé de donner leurs points de vue). Bien qu'elle ait "pour but d'exposer le caractère irremplaçable de [l']interprétation statistique" de Born, elle n'était évidemment pas davantage faite pour plaire aux partisans de l'interprétation orthodoxe.

⁸⁸ Einstein, lettre à Louis de Broglie du 14.4.1953 (Archives Einstein).

⁸⁹ Louis de Broglie, lettre à Albert Einstein du 9.4.1953 (Archives Einstein). Dans une lettre en date du 24 .4.1953, de Broglie précise que son exposé porte sur ses "tentatives d'interprétation causale de la mécanique ondulatoire" et lui en envoie le texte en français: "L'interprétation de la mécanique ondulatoire à l'aide d'ondes à singularités", paru en traduction allemande dans le volume offert à Max Born (De Broglie 1953 c). L'exposé de de Broglie porte sur la double solution, et rappelle, comme l'écrit Louis de Broglie dans sa lettre à Einstein, "quelles furent autrefois mes conceptions sur cette question et pourquoi j'ai repris récemment un nouvel examen de ces conceptions".

⁹⁰ Louis de Broglie, lettre à Albert Einstein du 24.4.1953 (Archives Einstein).

Dans une lettre de mai 1953, Einstein commente la note que lui a envoyée de Broglie sur ses conceptions⁹¹. Le point de vue de de Broglie est clair, dit-il en substance, il marque sa différence avec la théorie de David Bohm: "Vous ne croyez pas, si je vous comprends bien, à la possibilité d'adopter le programme de nouveau mis en avant par M. Bohm: a) solution de l'équation de Schrödinger par un champ ψ , b) adjonction d'une trajectoire compatible avec la fonction ψ ". Puis il essaie de se résumer, pour lui-même, l'idée directrice de la nouvelle théorie de son correspondant (et, ce faisant, il en souligne les traits saillants): "Au lieu de cela vous proposez une représentation de la réalité physique (description complète) qui serait de la forme $\Psi = \psi \Omega$. Ceci constitue *une forme de produit dans laquelle l'un des facteurs traduit la structure particulière et l'autre la structure ondulatoire*. Ce serait là en fait une représentation satisfaisante de la double structure que nous impose l'expérience. Ce serait une théorie vraiment nouvelle et non pas *un complément* des anciennes théories"⁹².

Sous la forme ramassée ainsi proposée, Einstein extrait l'essence de l'idée de Louis de Broglie, considérée par rapport à sa propre préoccupation. Elle porte d'une part sur la possibilité d'exprimer le double caractère onde-corpuscule par un champ (nous savons qu'il a, quant à lui, abordé les choses différemment, ce caractère ne pouvant pas être fondationnel à ses yeux). Elle fait état, d'autre part, de ce qu'il ne suffit pas d'apporter "un complément" aux anciennes théories, comme le fait la théorie de l'«onde-pilote», mais il faut une théorie vraiment nouvelle (la théorie de de Broglie prétend être telle; nous savons que, pour Einstein, la théorie complète ne peut être obtenue qu'en changeant les bases de départ). Cette réaction d'Einstein, le besoin qu'il éprouve d'explicitier ainsi les deux traits saillants de la théorie proposée par de Broglie, est significative eu égard à la nature de ses propres doutes et de son propre programme: elle laisse bien voir la différence de son approche avec celle de Louis de Broglie. Cette différence concerne en premier lieu la dualité, dont une théorie nouvelle devrait, pour lui, s'affranchir, ne se proposant que de la retrouver à l'approximation de la théorie quantique actuelle.

Si Einstein manifeste son intérêt pour les propositions de Louis de Broglie, de toute évidence il ne les reprend pas à son compte, ne serait-ce que parce qu'elles comportent trop d'arbitraire. On le devine, bien qu'il ne le dise pas expressément, à sa demande de précisions: "Pour autant que je puisse voir, pensez-vous que le produit doit satisfaire à l'équation initiale de Schrödinger, ou bien le facteur 'ondulatoire' seul doit-il posséder cette propriété, ou alors les deux facteurs, ou encore les deux facteurs *et* leur produit ?"⁹³. Il poursuit en explicitant une autre condition de la solution envisagée par de Broglie (condition qui correspond au principe de superposition): "Votre but serait aussi atteint si la fonction cherchée pouvait être représentée par une somme de tels produits. Finalement, il ne paraît pas nécessaire que le tout puisse être représenté par une

⁹¹ Einstein, lettre à Louis de Broglie, mai 1953 (*in* Einstein, de Broglie, 1979).

⁹² *Ibid.* (souligné par moi, M.P.).

⁹³ *Ibid.* (Souligné par A.E.).

seule fonction (une composante), mais peut-être par un ensemble de plusieurs composantes".

Sa remarque la plus importante, qui nous éclaire sur ses propres vues, est relative à l'arbitraire, sur lequel il revient: "Vous pensez que cette liberté constitue un grand malheur⁹⁴ pour les théoriciens. Cette liberté m'a tellement préoccupé que je me suis obstiné à rechercher un *principe formel qui limiterait* notre liberté...". La différence avec l'approche de de Broglie est ici plus nettement marquée encore: la voie d'Einstein est celle d'une recherche première d'un principe formel. "Mais", ajoute Einstein (et ce 'mais' marque à lui seul la différence), "nous avons en commun la conviction⁹⁵ que nous devons rester attachés à l'idée⁹⁶ de la possibilité d'une représentation entièrement *objective* de la *réalité*⁹⁷ *physique*"⁹⁸. On notera encore que c'est la réalité qui est mise en avant, et non la causalité ou le déterminisme, sur lesquels insistait Louis de Broglie.

Dans une lettre ultérieure, Einstein revient sur sa "méthodologie", comme il dit, c'est-à-dire, en réalité, inséparablement sa démarche et son 'style'. Malgré leur "commune conviction"⁹⁹ qui les fait tous deux 'hérétiques'¹⁰⁰, c'est-à-dire leur sentiment de l'insuffisance de la mécanique quantique, leurs 'méthodologies' sont en effet différentes¹⁰¹. "Vue de l'extérieur", écrit Einstein, "ma méthodologie (...) semble assez bizarre. En effet, je dois ressembler à l'oiseau du désert, l'autruche, qui sans cesse cache sa tête dans le sable relativiste pour ne pas faire face aux méchants quanta". Einstein indique qu'il cherche aussi une "substructure", "nécessité que la théorie quantique actuelle cache habilement par l'application de la forme statistique". Mais, précise-t-il, "je suis convaincu qu'on ne pourra pas trouver cette substructure *par une voie constructive* en partant du comportement empirique des objets physiques"¹⁰². Le "refus de regarder les quanta en face", c'est, en fait, le refus de la voie 'empiriste-constructiviste'; quant à la "sous-structure" qu'il cherche, elle est tout autre que celle de de Broglie et de Bohm (voir plus haut ce qu'il disait à ce dernier à propos des niveaux emboîtés de particules): c'est le soubassement architectonique de la théorie.

Et c'est, en fait, par la voie de la recherche d'un *principe purement formel*, fondée "sur la conviction que les lois de la nature ont la plus grande

⁹⁴ "Unglück".

⁹⁵ "Gemeinsam aber ist uns die Ueberzeugung".

⁹⁶ "...dass wir an der Idee... festhalten sollen".

⁹⁷ "Wirklichkeit".

⁹⁸ *Ibid* (Souligné par moi, M.P.).

⁹⁹ Einstein, lettre à Louis de Broglie 14.2.1954, in Einstein, de Broglie 1979 c. Il vient de relire l'article de ce dernier "La physique quantique restera-t-elle indéterministe?" (de Broglie 1953 d) paru en traduction allemande. "Vos pensées si claires m'ont fait grand plaisir", écrit-il.

¹⁰⁰ "Le travail pour le volume jubilaire de de Broglie sera traduit en français par les collègues mêmes de là-bas. Mais le contenu sera pour les gens une hérésie de la pire espèce", écrivait Einstein en 1952 à son traducteur habituel et ami Maurice Solovine (lettre du 7.5.1952, in Einstein 1956, p. 120-121). Il s'agit de l'article Einstein 1953 b.

¹⁰¹ Einstein, lettre à Louis de Broglie 14.2.1954, in Einstein, de Broglie 1979.

¹⁰² *Ibid*. Littéralement: "en partant du comportement des choses physiques connu empiriquement". Souligné par Einstein.

simplicité logique imaginable", c'est-à-dire sur la recherche d'une "théorie du champ des quanta", qu'Einstein tente, pour sa part, d'aborder le problème quantique (comme nous le savons par ailleurs). Mais il convient qu'une telle théorie peut fort bien ne pas exister, et il admet que "dans ce cas mes efforts ne peuvent pas mener à la solution du problème de l'atomistique et des quanta, peut-être même pas nous rapprocher d'une solution". Les physiciens des quanta sont persuadés que tel est le cas: "Peut-être ont-ils raison sur ce point (...). Mais cette conviction négative est fondée sur une base seulement intuitive et non pas objective. Par ailleurs, je ne distingue aucune voie claire vers une théorie logiquement simple"¹⁰³.

A cette profession de foi et à cet aveu, Louis de Broglie répond en invoquant sa propre direction: la recherche d'"images spatio-temporelles précises du dualisme onde-corpuscule, permettant de justifier le succès des lois statistiques de la mécanique quantique"¹⁰⁴. De Broglie exprime également à Einstein son accord avec ce que celui-ci lui a écrit sur sa méthode de la "simplicité logique", estimant, face aux difficultés rencontrées par lui-même et ses collaborateurs¹⁰⁵ dans la recherche des bonnes équations non-linéaires, qu'elle seule probablement peut fournir une possibilité de progresser: "En accord avec vos idées", conclut-il sa lettre, "ce problème ne pourrait sans doute être résolu qu'en suivant une voie analogue à celle qui a conduit aux équations de la Relativité généralisée, c'est-à-dire en s'inspirant de l'idée de simplicité logique".

On voit bien, toutefois, par-delà une certaine concordance, la différence de démarche entre Einstein et de Broglie. Elle est présente dès le point de départ, dans la définition du but que chacun d'eux assigne à la théorie qu'il voudrait obtenir. Einstein estime la méthode "constructive" (c'est-à-dire, pour lui, empiriste) inadéquate et recherche un principe formel du genre d'un principe de relativité généralisé étendu, applicable à l'ensemble des lois physiques, car la solution ne peut désormais provenir que d'une plus grande unité. De Broglie recherche une solution dans le droit fil de l'intuition qui présidait déjà à ses premiers travaux, basée sur une *image* spatio-temporelle, celle d'un corpuscule lié à une onde, et posant en principe un déterminisme s'appliquant à ces concepts classiques. La 'méthodologie' qu'il met en oeuvre est celle de l'obtention, selon ses propres termes, "d'images spatio-temporelles précises du dualisme onde-corpuscule", ce qui le conduit à une diversité d'hypothèses possibles, dont le choix est "arbitraire", comme Einstein le remarquait.

Ce dernier, par contraste, tout en désirant maintenir le continuum spatio-temporel, ne parle jamais de sa représentation en termes d'images (il la voit très indirecte, à partir du champ pris comme concept premier), voulant précisément dépasser le dualisme et les concepts (classiques) qui l'expriment, trop

¹⁰³ *Ibid.*

¹⁰⁴ Louis de Broglie, lettre à Einstein, du 8.3.1954. La lettre d'Einstein du 15 février lui "a apporté un grand encouragement pour continuer à reprendre, en les approfondissant", les idées entrevues en 1927. "Je suis porté à croire que l'interprétation statistique actuellement admise est 'incomplète', et qu'il faut rechercher des images...".

¹⁰⁵ En particulier Jean-Pierre Vigié.

empiriques, et n'imposant pas suffisamment de contraintes. L'idée de contrainte logiquement imposée par un principe formel est centrale dans sa pensée: ce principe fondamental, s'exprimant par des limitations sur les possibilités de choix des grandeurs physiques, est chargé d'exprimer les propriétés des systèmes et des phénomènes matériels dans ce qu'elles ont d'essentiel, et doit constituer la base même de la théorie. La physique théorique au sens d'Einstein, telle que l'exige la physique à l'état où elle est parvenue, est gouvernée par quelques principes fondateurs.

Celle que de Broglie met en oeuvre est différente. On peut la caractériser comme la combinaison d'une théorie physique 'phénoménologique' (c'est-à-dire qui se propose une représentation théorique des faits empiriques en termes de modèles) et d'une 'physique mathématique' (qui exploite des aspects formels tels que des analogies d'expressions mathématiques)¹⁰⁶. Sa démarche première demeure la recherche d'une représentation spatio-temporelle conçue comme "image intelligible [du] dualisme", et des principes du genre invoqué par Einstein (généraux et de formulation abstraite) seraient accueillis volontiers, mais au titre de régulation plutôt que de fondation.

La différence entre les 'styles de recherche' d'Einstein et de de Broglie se manifeste également dans leurs attitudes respectives face au rapport entre la relativité et la physique quantique. Einstein maintient sa méthode (telle que nous avons tenté de la caractériser par ailleurs¹⁰⁷), qui est de considérer la théorie en fonction de son objet, et sa recherche de la généralisation du champ s'en tient à la considération du champ défini sur le continuum. S'il garde à l'esprit le problème des quanta, c'est comme une conséquence lointaine éventuelle: malgré ce but ultime, il ne mêle pas les deux théories - et c'est aussi parce que la théorie quantique lui semble insuffisante du point de vue de ses concepts et de ses principes fondamentaux. De Broglie, fidèle en cela à sa démarche initiale de 1923, continue de penser en même temps la théorie de la Relativité (restreinte, ce qui, pour Einstein serait de toute façon insuffisant) et la théorie quantique, les joignant dans un même modèle, qui ne peut être, malgré son apparence mathématique formelle, qu'une approche de nature phénoménologique.

Pour conclure, indiquons qu'Einstein donnait lui-même par avance, de manière implicite il est vrai, la réponse à la question de sa position par rapport aux variables cachées, quelque temps avant que celles-ci ne connaissent un regain d'intérêt. Il déclarait, dans sa "Réponse aux critiques" de 1949, que, puisque la mécanique quantique ne peut pas raisonnablement prétendre décrire de façon complète les systèmes individuels ("*raisonnablement*", c'est-à-dire sans faire appel à des actions instantanées à distance), "il apparaît inévitable de chercher *ailleurs* une description complète du système individuel"; cela étant, il devrait être clair dès le commencement, écrivait-il, que "*les éléments d'une telle description ne sont pas contenus dans le schéma conceptuel de la théorie quantique statistique*"¹⁰⁸.

¹⁰⁶ Voir Paty 1988 c.

¹⁰⁷ Paty 1993 a.

¹⁰⁸ Einstein 1949, p. 672 (souligné par moi, M.P.).

Les solutions en termes de variables cachées appartiennent clairement à ce schéma, qu'elles soient prises sous la forme simplifiée de la première théorie de David Bohm, ou plus raffinées, comme les approches ultérieures de Bohm, de de Broglie, de Vigier ou d'autres, et même si elles incluent des équations non-linéaires, dont Einstein soulignait la nécessité.

BIBLIOGRAPHIE.

- BELINFANTE, Frederick 1973. *A survey of hidden-variables theories*, Pergamon Press, Oxford, 1973.
- BELL, John S. 1964. "On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox", *Physics* 1, 1964, 195-200. Repris in Bell 1987, p. 14-21.
- 1966. "On the problem of hidden variables in quantum mechanics", *Review of Modern Physics* 38, 1966, 447-452. Repris in Bell 1987, p. 1-13.
 - 1975. "The theory of local beables", *TH-2053-CERN*, 1975, presented at the sixth GIFT Seminar, Jaca, 2-7 june 1975. Egalement, in *Epistemological letters-Lettres épistémologiques* (Bienne), mars 1976. Repris in Bell 1987, p. 52-62 .
 - 1976 a. "Einstein-Podolsky-Rosen experiments" in *Proceedings of the Symposium on Frontier problems in high energy physics, in honour of Gilberto Bernardini on his 70 th birthday, Pisa, 1976*, Scuola Normale Superiore, Pisa, p. 33-45. Repris in Bell 1987, p. 81-92.
 - 1976 b. "The measurement theory of Everett and de Broglie's pilot wave", in Flato, M. et al. (eds.), *Quantum mechanics, determinism, causality, and particles*, Reidel, Dordrecht, 1976, p. 11-17; également in Bell 1987, p. 93-99.
 - 1980. "De Broglie-Bohm, delayed-choice, double-slit experiment, and density-matrix", in *International Journal of Quantum chemistry (Quantum chemistry Symposium)* 14, 1980, 155-159; également in Bell 1987, p. 111-116.
 - 1981. "Quantum mechanics for cosmologists", in Isham, C., Penrose, R., et Sciama, D. (eds.), *Quantum gravity 2*, Clarendon Press, Oxford, 1981, p. 611-637; également in Bell 1987, p. 117-138.
 - 1982. "On the impossible pilot wave", *Foundations of physics* 12, 1982 (n°10), 989-999. Repris in Bell 1987, p. 159-168.
 - 1987. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- BEN-DOV, Yoav 1987. "Bell's version of the 'pilot-wave' theory", *Fundamenta Scientiae* 8, 1987, 331-343.
- 1988. *Versions de la mécanique quantique sans réduction de la fonction d'onde*, Thèse de doctorat, Université Paris-13, 1988.
 - 1989. "De Broglie's causal interpretation of quantum mechanics", *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 14, 1989, 349-360.
- BOHM, David 1951. *Quantum theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (N.J.), 1951.
- 1952. "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden variables'", *Physical Review* 85, 1952, 166-179, 180-193.
 - 1953. "A discussion of certain remarks by Einstein on Born's probability interpretation of the Ψ -function", in Born 1953 a, p. 13-19.
 - 1957. *Causality and chance in modern physics*, Routledge and Kegan Paul, London, 1957; rééd., 1967.
 - 1962. "Hidden variables in the quantum theory", in Bates. R. (ed.), *Quantum radiation and high energy physics*, Academic Press, 1962: repris Bohm 1980 a, p. 65-110.

- 1980 a. *Wholeness and the implicate order*, Routledge and Kegan Paul, London, 1980.
- BOHR, Niels 1935 b. "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Physical Review* 48, 1935, 696-702.
- BORN, Max 1969 b. [Commentaires], in Einstein Born 1969.
- BROGLIE, Louis de 1926. "Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférences et de diffraction à la théorie des quanta de lumière", *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* (Paris), 183, 1926, 447. Egalement in de Broglie 1953 d, p. 25-27.
- 1927 a. "La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire", *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* (Paris), 184, 1927, 273-. Egalement in de Broglie 1953 d, p. 27-29.
- 1927 c. "La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement", *Journal de Physique et le radium* 8, 1927, 225-241 ; repris dans de Broglie 1953 d, p. 29-54.
- 1928. "La nouvelle dynamique des quanta", in *Electrons et photons* 1928, p. 105-141.
- 1947. *Physique et microphysique*, Albin Michel, Paris, 1947.
- 1951. "Remarques sur la théorie de l'onde-pilote", *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* (Paris) 233, 1951, 641-644; repris dans de Broglie 1953 d, p. 65-69.
- 1952 a. "Vue d'ensemble sur mes travaux scientifiques", in de Broglie 1953 a; également in de Broglie 1987, p. 39-63.
- 1952 b. "La physique quantique restera-t-elle indéterministe?", in de Broglie 1956; également in de Broglie 1987, p. 67-90.
- 1953 a. *Louis de Broglie, physicien et penseur*, Albin Michel, Paris, 1953.
- 1953 b. "Sur l'interprétation de la mécanique ondulatoire à l'aides d'ondes à régions singulières", *Compte-rendus des séances de l'Académie des sciences* (Paris) 236, 1953, 1459.
- 1953 c. "L'interprétation de la mécanique ondulatoire à l'aide d'ondes à régions singulières", in *Scientific papers presented to Max Born*, Oliver and Boyd, Edinburgh, 1953, p. 21-28.
- 1953 d. *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*, Gauthier-Villars, Paris, 1953.
- 1955. "Le dualisme des ondes et des corpuscules dans l'oeuvre d'Albert Einstein", discours à l'Académie des sciences, Paris, 5 déc. 1955, in de Broglie 1956 b.
- 1961. "Mon anxiété devant le problème des quanta", in de Broglie 1966; également in de Broglie 1987, p. 25-32.
- 1973 "De la mécanique ondulatoire à la mécanique quantique. L'aller et le retour", in de Broglie 1987.
- 1987. *Un itinéraire scientifique*, textes réunis et présentés par Georges Lochak, La Découverte, Paris, 1987.
- BUNGE, Mario 1985. *Treatise on basic philosophy*, vol. 7 : Philosophy of science and technology, part I : Formal and physical sciences, Reidel, Dordrecht, 1985.
- CLAUSER, J.F. and HORNE, M.A. 1974. "", *Physical Review* D 10, 1974, 526-.
- EINSTEIN, Albert 1928. "Interventions" au Cinquième Conseil Solvay de 1927, in *Electrons et photons* 1928, p. 253-256, 266.
- , PODOLSKY, Boris et ROSEN, Nathan 1935. "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Physical Review*, ser. 2, XLVII, 1935, 777-780. Trad. fr., "Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète?", in Einstein 1989, p. 224-230.
- et GROMMER, Jakob 1927. "Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz, I", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, 1927, 2-13.
- , INFELD, Leopold et HOFFMANN, Banesh 1938 a. "Gravitational equations and the problems of motion, I", *Annals of Mathematics*, ser. 2, XXXIX, 1938, 65-100.
- et INFELD, Leopold 1938 b. "Gravitational equations and the problems of motion, II", *Annals of Mathematics*, ser. 2, XXXIX, 1938, 65-100.
- 1946. "Autobiographisches. Autobiographical notes", in Schilpp, P.A. (ed), *Albert Einstein*,

- philosopher and scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949, p. 1- 95. [Texte rédigé en 1946.] Trad. fr. par Frédérique Lab: Albert Einstein, *Autoportrait*, Ediscience, Paris, p. 19-54; autre trad. fr., in Einstein 1991, p. 19-54.
- 1948. "Quantenmechanik und Wirklichkeit", *Dialectica* II, 1948, 35-39. Trad. fr., "Mécanique quantique et réalité", in trad. en fr. de Einstein Born 1969, p. 184-188. Autre trad. fr., in Einstein 1989, p. 244-249.
- 1949. "Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume", in Schilpp 1949, p. 663-693. [Original allemand, "Bemerkungen zu den in diesen bande Vereinigten Arbeiten", in Schilpp, P. A. (ed.) , *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1955, p. 493-511 (version en all de Schilpp 1949)].
- 1953 a. "Elementäre Ueberlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quanten-Mechanik", in *Scientific papers presented to Max Born on his retirement from the Tait chair of natural philosophy in the University of Edinburgh*, Oliver and Boyd, Edinburgh/Hafner, New York, 1953, p. 33-40. Trad. fr., "Réflexions élémentaires concernant l'interprétation des fondements de la mécanique quantique", in Einstein 1989, p. 251-256.
- 1953 b. "Einleitende Bemerkungen über Grundbegriffe. Remarques préliminaires sur les principes fondamentaux" (trad. fr. par Marie-Antoinette Tonnelat), in de Broglie 1953, p. 4-15; également in Einstein 1989, p. 121-124.
- 1955. "Foreword", in Broglie, Louis de, *Physics and microphysics*, trad. angl. [cf. de Broglie 1947], Pantheon, New York, 1955.
- 1956. *Lettres à Maurice Solovine. Briefe an Maurice Solovine*, reprod. en fac-simile, et trad. en fr. par Maurice Solovine, Gauthier-Villars, Paris, 1956. Ré-éd., Veb Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1960.
- et BORN, Max 1969. *Briefwechsel 1916-1955*, Nymphenburger Verlagshandlung, München, 1969. Trad. fr. par Pierre Leccia, *Correspondance 1916-1955, commentée par Max Born*, Seuil, Paris, 1972.
- et BESSO, Michele 1972. *Correspondance 1903-1955*, publiée par Pierre Speziali, Hermann, Paris, 1972; 1979.
- et de BROGLIE, Louis 1979. "Correspondance", *Annales de la Fondation Louis de Broglie* 4, 1979 (n°1), 53-61. [Textes originaux de deux lettres d'Einstein avec leur traduction en français et de lettres de Louis de Broglie.]
- 1989. *Oeuvres choisies, vol. 1: Mécanique statistique et physique quantique* (éd. par Françoise Balibar, Bruno Jech et Olivier Darrigol), 1989.
- 1991. *Oeuvres choisies, vol. 5: Science, éthique, philosophie* (éd. par Jacques Merleau-Ponty et F. Balibar), 1991.
- ELECTRONS ET PHOTONS* 1928. *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 1975. "On propositions and physical systems", *Physical Review D* 11, 1975, 1424-. Repris dans Leite Lopes, Paty 1977, p. 147-169.
- 1976. *Conceptual foudations of quantum mechanics*, second ed., revised, Benjamin, Reading (Ma), 1976.
- JAMMER, Max 1974. *The philosophy of quantum mechanics. The interpretations of quantum mechanics in historical perspective*, Wiley and sons, New York, 1974.
- LEITE LOPES, José and PATY, Michel (eds.), *Quantum mechanics, a half century later*, Reidel, Dordrecht, 1977.
- MADLUNG, Erwin 1926. "Quantentheorie in hydrodynamischer Form", *Zeitschrift für Physik* 40, 1926, 322-326.
- NEUMANN, John von 1932. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer, Berlin, 1932. Trad. fr. par Alexandre Proca, *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, Librairie Alcan et Presses Universitaires de France, Paris, 1947.

PAIS, Abraham 1982. *Subtle is the Lord. The science and life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982.

PATY, Michel 1982. "L'inséparabilité quantique en perspective, ou: Popper, Einstein et le débat quantique aujourd'hui", *Fundamenta Scientiae* 3, 1982, 79-92. Egalement in Bouveresse, Renée (dir.), 1989. *Karl Popper et la science d'aujourd'hui. Actes du Colloque de Cerisy, 1-11 juillet 1981*, Aubier, Paris, 1989, p. 255-272

- 1985. "Einstein et la complémentarité au sens de Bohr", *Revue d'histoire des sciences* 38, 1985 (n° 3-4), 325-351.

- 1986 a. "Einstein and Spinoza", in Marjorie Grene and Debra Nails (eds), *Spinoza and the sciences*, Reidel, Dordrecht, 1986, p. 267-302. [Pour l'original en français, voir: "La doctrine du parallélisme de Spinoza et le programme épistémologique d'Einstein, *Cahiers Spinoza*, ed. Réplique, Paris, n° 5, hiver 1984-1985, 93-108; et "Einstein et Spinoza", in Bouveresse, Renée (dir.), *Spinoza, science et religion*, Institut interdisciplinaire d'études épistémologiques, Lyon, et Vrin, Paris, 1988, p. 183-207.]

- 1986 b. "La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique", *Fundamenta Scientiae* 7, 1986, 47-87.

- 1988 a. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.

- 1988 b. "Sur la notion de complétude d'une théorie physique", in Fleury, Norbert; Joffily, Sergio; Martins Simões, J.A. et Troper, A. (eds), *Leite Lopes Festschrift. A pioneer physicist in the third world*, World Scientific Publishers, Singapore, 1988, p. 143-164.

- 1988 c. "Sur le style de recherche de Louis de Broglie", in *Louis de Broglie tel que nous l'avons connu*, Fondation Louis de Broglie, CNAM, Paris, 1988, p. 163-166.

- 1993 a. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, P.U.F., Paris, 1993.

- 1993 b. *La pensée physique d'Einstein et les quanta* (à paraître).

PAULI, Wolfgang 1953. "Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique et sur la théorie de l'onde-pilote", in de Broglie 1953, p. 33-42.

SCHILPP, Paul Arthur (ed.) 1949. *Albert Einstein, philosopher-scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949. Ré-ed., *Ibid.* et Cambridge University Press, London. [3^e édition, 1970].

STACHEL, John 1986. "Einstein and the quantum: fifty years of struggle", in Colodny, Robert (ed.), *From quarks to quasars*, University of Pittsburg Press, Pittsburg, 1986.

WHEELER, John A. and ZUREK, Wojcieh H. (eds.) 1983. *Quantum theory of measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.