

Séance du 25 avril 1953

LA PHYSIQUE QUANTIQUE RESTERA-T-ELLE INDÉTERMINISTE ?

**M. Louis de Broglie**, *Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, Professeur à la Sorbonne, a présenté à la Société les arguments suivants :*

I. – Au moment où me sont apparues, en 1923-1924, les premières idées qui ont servi de bases au développement de la Mécanique ondulatoire, j'étais convaincu qu'il fallait réaliser une fusion physique des notions d'onde et de corpuscule dans le cadre des conceptions classiques sur les représentations spatio-temporelles et sur la causalité, mais en y englobant, en outre, les idées nouvelles découlant de l'introduction en Physique du quantum d'Action. Je cherchai donc à me représenter la dualité onde-corpuscule par une image spatiale où le corpuscule serait le centre d'un phénomène ondulatoire étendu. Je fus ainsi amené à envisager, à côté des solutions continues des équations de la Mécanique ondulatoire habituellement considérées dont la signification *statistique* s'imposait de plus en plus, d'autres solutions comportant une singularité et permettant de définir la position dans l'espace du corpuscule. J'ai développé cette théorie que j'avais appelée «théorie de la double solution» dans le numéro de mai 1927 du *Journal de Physique*.

À la même époque, une tendance entièrement opposée à la mienne groupa, autour de MM. Born et Bohr, une pléiade de jeunes savants aujourd'hui illustres, tels que MM. Heisenberg, Pauli et Dirac. Rejetant le déterminisme de la Physique classique, s'appuyant sur la découverte des «relations d'incertitude» dues à M. Heisenberg et sur les idées de M. Bohr relatives à la «complémentarité», ils proposaient de la Mécanique ondulatoire une interprétation purement probabiliste, où, contrairement à toutes les idées anciennes, les lois de probabilité avaient un caractère primaire et ne résultaient pas d'un déterminisme caché.

Ces points de vue se confrontèrent au Conseil de Physique Solvay d'octobre 1927. Mais à cette réunion, j'eus le tort de présenter mes idées sous une forme édulcorée (la théorie de l'onde-pilote) qui prêtait à de nombreuses objections. Devant la réprobation presque unanime qui accueillit mon exposé, je me décourageai et me ralliai à l'interprétation probabiliste de Born,

Bohr et Heisenberg à laquelle je suis resté fidèle depuis vingt-cinq ans.

II. – Il y a dix-huit mois, un jeune physicien américain, M. David Bohm, a repris, d'ailleurs avec talent, mes anciennes idées sous la forme tronquée et peu défendable de l'onde-pilote. Peu après, M. J.-P. Vigier a signalé une analogie profonde entre mes idées sur les ondes à singularités et les tentatives de M. Einstein pour représenter les particules matérielles comme des singularités du champ dans le cadre de la Relativité généralisée. Ceci m'a amené à réfléchir à nouveau sur mon ancienne idée de la double solution et sur la possibilité éventuelle de la reprendre, au besoin avec les modifications nécessaires. Dans mon exposé, je dirai pourquoi un ensemble de raisons me paraissent justifier un nouvel examen de ces problèmes.

Partant des remarques de M. Vigier, on pourrait notamment chercher à se représenter les corpuscules matériels (et également les photons) comme des singularités au sein d'un champ spatio-temporel à caractère ondulatoire, dont la structure ferait intervenir le quantum d'action de Planck. On pourrait espérer parvenir ainsi à unir les conceptions d'Einstein sur les particules avec celles de ma théorie de la double solution. par cette voie pourrait être réalisée finalement une synthèse grandiose de la Relativité et des Quanta.

Malgré la possibilité d'un échec final, il paraît donc utile de reprendre par sa base le problème très difficile de l'interprétation de la Mécanique ondulatoire, afin de voir si l'interprétation actuellement orthodoxe est vraiment la seule que l'on puisse adopter.

#### COMPTE RENDU DE LA SÉANCE

*La séance est ouverte à 16h 30, sous la présidence de M. G. Bachelard, vice-président de la Société.*

**M. Bachelard.** – M. Louis de Broglie nous fait l'honneur de venir faire une conférence sur ses nouveaux travaux. Je n'ai pas besoin de présenter à des philosophes très curieux, très attentifs à l'évolution de la science, un savant comme celui-là, et, par conséquent, je donne tout de suite la parole à M. Louis de Broglie.

Si vous avez quelques sujets de discussion, quelques objections à lui présenter, M. Louis de Broglie veut bien se prêter à une discussion ; je l'en remercie aussi et je lui donne la parole.

**M. Louis de Broglie.** <sup>1</sup>– Dans un article paru dans la *Revue de Métaphysique et de Morale*, sous le titre : «Souvenirs personnels sur les débuts de la Mécanique ondulatoire», reproduit ensuite dans mon livre *Physique et Microphysique*, j'avais rappelé par quels états d'esprit j'avais passé entre 1923 et 1928 en ce qui concerne l'interprétation de la Mécanique ondulatoire et j'ai expliqué qu'après avoir tenté de développer une interprétation concrète et déterministe conforme dans ses grandes lignes aux conceptions traditionnelles de la Physique, j'avais fini, en présence des difficultés que je rencontrais et des objections qui m'étaient faites, par me rallier au point de vue probabiliste et indéterministe de MM. Bohr et Heisenberg. Pendant près de vingt-cinq ans, je suis resté fidèle à cette manière de voir d'ailleurs adoptée par la presque unanimité des théoriciens de la Physique et je l'ai exposée dans mon enseignement, mes conférences et mes livres. Dans l'été de 1951, j'ai eu connaissance, par une aimable communication personnelle de l'auteur, d'un Mémoire d'un jeune physicien américain, M. David Bohm, Mémoire qui a paru ensuite dans le numéro du 15 janvier 1952 de la *Physical Review*. Dans ce mémoire, M. Bohm reprend intégralement, tout au moins sous l'une des formes que je leur avais données, mes conceptions de 1927, en les complétant d'une façon intéressante sur certains points. Ensuite, M. J.-P. Vigié a signalé à mon attention la ressemblance qui existe entre une démonstration donnée par Einstein sur le mouvement des particules en Relativité généralisée et une démonstration que j'avais donnée tout à fait indépendamment en 1927 dans la tentative que j'avais appelée «théorie de la double solution». Toutes ces circonstances ont ramené dans ces derniers temps mon attention sur ces questions et, sans que je veuille affirmer qu'il soit possible de rétablir une conception déterministe de la Mécanique ondulatoire dans le sens de mes idées primitives, je crois cependant que l'on doit réexaminer la question en se gardant de toute idée philosophique préconçue et en se préoccupant seulement de savoir si une interprétation cohérente de tous les faits bien établis pourrait être ainsi obtenue. Pour exposer le problème, tel qu'il se pose

---

<sup>1</sup>. Nous devons à l'amabilité de l'éditeur Gauthier-Villars de reproduire ici le texte publié par M. Louis de Broglie dans le volume : *La Physique quantique restera-t-elle indéterministe ?* Paris, Gauthier-Villars, 1953 («Les grands problèmes des Sciences»), pp. 1-22.

Un texte voisin avait été publié en décembre 1952 dans la *Revue d'Histoire des Sciences*, V, 4, pp. 289-311.

aujourd'hui, il me paraît utile de suivre le développement historique des conceptions nouvelles de la Physique quantique.

Le grand drame de la Microphysique contemporaine a été, on le sait, la découverte de la dualité des ondes et des corpuscules. C'est d'abord dans l'étude des propriétés de la lumière que cette dualité s'est manifestée. Pendant longtemps, il avait été naturel de penser que la lumière est formée de corpuscules en mouvement rapide. L'existence des rayons lumineux, rectilignes dans les milieux homogènes, la réflexion sur les miroirs analogue au rebondissement d'une balle sur un mur, la réfraction au passage d'un milieu dans un autre peuvent aisément s'expliquer ainsi d'une façon très intuitive. Aussi cette théorie corpusculaire de la lumière, à laquelle Newton se ralliait, a-t-elle été adoptée par la plupart des physiciens jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle. Il faut cependant noter que, dès la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, le grand savant hollandais, Christiaan Huygens, avait proposé une théorie ondulatoire de la lumière et donné de remarquables explications, encore classiques aujourd'hui, des phénomènes de réflexion, de réfraction et de double réfraction à l'aide de la conception des ondes et du principe qui porte son nom, sans parvenir cependant à interpréter l'existence des rayons lumineux. Il faut noter aussi que Newton, après avoir découvert le phénomène d'interférences qu'on nomme depuis lors «les anneaux de Newton» avait tenté une fort intéressante synthèse du point de vue des ondes et de celui des corpuscules dans sa «théorie des accès» restée malheureusement embryonnaire, et rapidement oubliée. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, les travaux du médecin anglais, Thomas Young, ramenèrent l'attention sur les phénomènes d'interférences et, peu après, Malus découvrait l'existence de la polarisation de la lumière. Ayant repris l'étude expérimentale des interférences ainsi que celle de la diffraction connue depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, mais peu étudiée jusque-là, Augustin Fresnel montra que ces phénomènes s'interprètent entièrement par la théorie ondulatoire de la lumière, alors que la théorie corpusculaire paraît totalement incapable d'en rendre compte. Complétant sur ce point l'œuvre de Huygens, il montre aussi que la théorie des ondes explique la propagation rectiligne des rayons lumineux dans les milieux homogènes. Puis, lorsque après une lutte très âpre il a convaincu ses adversaires, Fresnel, en introduisant l'hypothèse que dans l'onde lumineuse la vibration est transversale à la direction de la propagation, donne aussi une théorie complète, toujours classique aujourd'hui, des phénomènes de polarisation et de double

réfraction. Fresnel meurt physique à trente-neuf ans en 1827, paraissant avoir établi sur des bases inébranlables la théorie ondulatoire de la lumière. Quarante ans plus tard, Maxwell donnera des ondes de Fresnel une interprétation électromagnétique et, montrant ainsi que toute onde lumineuse est une perturbation électromagnétique d'un type particulier, il fera rentrer toute l'Optique dans l'Électromagnétisme. Mais la géniale synthèse de Maxwell, si elle a changé l'idée que l'on se faisait de la nature des ondes lumineuses, a laissé intacte la croyance, commune dès lors à tous les physiciens, que la lumière est formée d'ondes où l'énergie est répartie de façon continue.

C'est alors, dans les dernières années du XIX<sup>e</sup> siècle, que le drame commence. La découverte de l'effet photoélectrique par Hertz, en 1887, apporte le premier exemple d'un phénomène d'action de la lumière sur la matière que la conception ondulatoire de la lumière n'est pas capable d'interpréter. En 1905, Albert Einstein, qui vient de découvrir la théorie de la Relativité, montre qu'on peut interpréter l'effet photoélectrique en revenant au moins partiellement à une théorie corpusculaire de la lumière, en admettant que dans toute onde lumineuse de fréquence  $\nu$  l'énergie est concentrée en «grains» de valeur  $h\nu$ , où  $h$  est la constante des quanta introduite par Planck dans la théorie du rayonnement noir : ces grains de lumière, que Einstein appelait «quanta de lumière», nous les appelons aujourd'hui «photons». D'ailleurs, Einstein voit bien que sa théorie n'est pas une théorie strictement corpusculaire, car elle fait intervenir la notion de fréquence qui est d'origine ondulatoire. Une théorie strictement granulaire ne peut, du reste, interpréter les phénomènes d'interférences et de diffraction, et Einstein pressent qu'il faut conserver les ondes lumineuses et établir entre les ondes et les grains une sorte de correspondance statistique, idée très profonde nous le verrons.

La théorie d'Einstein est vivement critiquée, on en montre facilement les difficultés. Mais sa valeur vient de ce qu'elle se rattache très intimement à un grand courant d'idées qui est alors en train de bouleverser toute la Physique de l'échelle atomique : la Théorie des Quanta. Je rappelle rapidement que l'étude expérimentale du rayonnement du corps noir avait montré que la composition spectrale de ce rayonnement n'est pas du tout celle que pouvaient faire prévoir les théories classiques. S'étant bien assuré que la discordance était totale et irrémédiable, Planck avait

introduit, en 1900, l'hypothèse des quanta, tout à fait étrangère à toutes les conceptions classiques et même inconciliable avec elles, qui lui avait permis de trouver une loi de répartition spectrale pour le rayonnement du corps noir, bien en accord avec les faits expérimentaux. Cette hypothèse des quanta impliquait une sorte d'atomicité de l'action au sens de la Mécanique, conception nouvelle et peu conforme aux intuitions physiques. Le quantum d'action est mesuré par la fameuse «constante de Planck»  $h$ , dont Planck avait pu déduire la valeur numérique à partir des résultats expérimentaux sur le corps noir. Rapidement, l'hypothèse des quanta, si étrange qu'elle pût paraître au premier abord, s'était montrée d'une très grande portée dans le domaine des phénomènes de l'échelle atomique. Einstein l'avait utilisée dans sa théorie des quanta de lumière : il en avait aussi montré l'importance dans le domaine des chaleurs spécifiques. Bientôt, Bohr et ses continuateurs immédiats, dont le principal fut Sommerfeld, allaient montrer qu'en introduisant les quanta dans la théorie de l'atome conçu suivant la suggestion de Rutherford comme un système solaire en miniature, on pouvait obtenir une interprétation remarquable des propriétés des atomes et en particulier des lois qui régissent leurs émissions spectrales. Il en résultait de ces théories sur lesquelles je ne puis m'étendre ici que, à très petite échelle, les électrons et autres corpuscules matériels ne suivaient pas, comme on le croyait jusque-là, les lois de la Mécanique classique, mais qu'ils ne pouvaient avoir que certains états de mouvement (les états stationnaires de Bohr) satisfaisant à certaines «conditions de quanta» où figuraient, à côté naturellement de la constante  $h$ , des nombres entiers, les nombres quantiques. Cette apparition de nombres entiers dans les problèmes de Micromécanique pouvait paraître fort surprenante, mais, comme les nombres entiers apparaissent fréquemment en théorie des ondes dans le calcul des phénomènes d'interférences ou de résonance, on pouvait apercevoir là une indication en faveur de l'idée que, pour les électrons et autres corpuscules matériels, existe comme pour les photons et les ondes lumineuses une dualité onde-corpuscule. C'est une des idées qui m'ont guidé dans mes premières recherches sur la Mécanique ondulatoire.

Vers 1920, à l'époque où, après une longue période de mobilisation, je me remettais à la recherche scientifique, la situation était donc la suivante. D'une part, l'existence des photons, qui devait bientôt recevoir de nouvelles confirmations par la découverte

des effets Compton et Raman apparaissait comme certaine, mais la nécessité d'invoquer la théorie des ondes, pour introduire la fréquence  $\nu$  qui figure dans la définition du photon et aussi pour rendre compte de l'ensemble des phénomènes d'interférences et de diffraction dont les lois sont établies avec une extrême précision, démontrait la nécessité d'une vue synthétique s'exprimant par la dualité onde-corpuscule pour la lumière. D'autre part, l'existence à très petite échelle des mouvements quantifiés des corpuscules suggérait, je l'ai dit, l'idée d'introduire aussi la dualité onde-corpuscule pour les électrons et autres éléments de la matière. Il me parut donc évident qu'il fallait réaliser une synthèse générale, applicable à la matière comme à la lumière et reliant par des formules, où figurerait nécessairement la constante  $h$  de Planck, les aspects onde et corpuscule indissolublement liés l'un à l'autre.

C'est cette synthèse dont j'ai jeté les premières bases dans les Notes parues dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* au début de l'automne 1923 et, d'une façon plus complète, dans ma thèse de doctorat soutenue en novembre 1924. M'inspirant de considérations relativistes et aussi d'idées apparentées à celles qu'Hamilton avait développées un siècle auparavant, j'arrivais à associer au mouvement de tout corpuscule la propagation d'une onde dont la fréquence et la longueur d'onde étaient reliées à l'énergie et à la quantité de mouvement du corpuscule par des formules où figurait la constante  $h$  et je montrais que l'on pouvait ainsi comprendre la raison d'être des mouvements quantifiés des électrons dans les atomes. Sans entrer ici dans aucun détail technique, j'insisterai sur le point suivant. J'associais au mouvement rectiligne et uniforme d'un corpuscule en l'absence de champ la propagation dans la direction du mouvement d'une onde plane monochromatique ayant une amplitude constante et une phase linéaire en  $x, y, z, t$ . Comme j'établissais une relation entre l'énergie et la quantité de mouvement du corpuscule d'une part, la fréquence et la longueur d'onde de l'onde d'autre part, je reliais en somme l'état de mouvement du corpuscule à la *phase* de l'onde. Mais comment faire correspondre avec l'onde le fait que le corpuscule est localisé, qu'il a une position dans l'espace ? Question difficile à résoudre, car l'onde plane monochromatique, ayant même amplitude en tout point de l'espace, ne permet aucunement de définir à chaque instant un point privilégié qui serait la position du corpuscule à cet instant. Cette difficulté, jointe à quelques autres considérations relativistes sur lesquelles je passe, m'avait fait

penser que, si la phase de l'onde plane monochromatique a un sens physique certain, il n'en est pas de même pour l'amplitude constante de cette onde ; la répartition uniforme de cette amplitude dans l'espace signifierait simplement qu'*a priori* le corpuscule peut se trouver en n'importe quel point de l'espace avec une égale probabilité. L'amplitude n'aurait donc qu'un sens de probabilité et la véritable position du corpuscule (car je ne doutais pas alors que cette position dût exister à chaque instant) ne serait pas représentée par elle. Aussi avais-je donné à l'onde que j'introduisais le nom «d'onde de phase» pour bien marquer qu'à mes yeux, c'était essentiellement la phase de cette onde qui possédait un sens physique.

Les idées que j'avais soutenues dans ma thèse et qui avaient d'abord été accueillies avec un étonnement sans doute mêlé d'un peu de scepticisme ne tardèrent pas cependant à recevoir des confirmations éclatantes. Ce furent d'abord du point de vue théorique les admirables travaux de M. Schrödinger qui, en 1926, a complété et étendu de diverses façons mes conceptions, montrant en particulier comment on devait écrire dans le cas général les équations de propagation de l'onde associée et comment on devait calculer rigoureusement à l'aide de ces équations les états stationnaires des électrons dans les systèmes de l'échelle atomique, états qui correspondent à des formes stationnaires de l'onde associée. Il montra aussi que la Mécanique quantique développée en 1925 par M. Heisenberg n'est qu'une transposition mathématique de la Mécanique ondulatoire.

Puis vinrent les non moins admirables expériences de Davidson et Germer qui, aux États-Unis, dans le courant du printemps de 1927, découvrirent le phénomène de la diffraction des électrons par les cristaux, tout à fait analogue au phénomène de la diffraction des rayons X par les cristaux. Ces belles expériences, répétées bientôt par de nombreux physiciens et aujourd'hui entrées dans la pratique courante des laboratoires, apportèrent une preuve expérimentale décisive des conceptions de la Mécanique ondulatoire, ainsi qu'une vérification quantitative de ses formules. Le mouvement de l'électron est donc bien associé à la propagation d'une onde et nous savons aujourd'hui qu'il en est de même pour les autres constituants de la matière (proton, neutron, noyaux d'atomes, etc.) qui, eux aussi, peuvent donner lieu à des phénomènes de diffraction quantitativement conformes aux prévisions de la Mécanique ondulatoire.



Dans cette période qui va de la soutenance de ma thèse en novembre 1924 à la réunion du 5<sup>e</sup> Conseil de Physique Solvay en octobre 1927, j'ai naturellement suivi avec un intérêt passionné toutes ces étapes successives du développement de la Mécanique ondulatoire. Mais j'ai été continuellement tracassé par la question de l'interprétation physique du formalisme de la nouvelle théorie, et du sens réel du dualisme onde-corpuscule. Trois interprétations possibles de ce dualisme ont été, à ma connaissance, envisagées. Une interprétation qui paraît avoir toujours la préférence de M. Schrödinger consiste à nier la réalité du dualisme en contestant l'existence des corpuscules. Seules les ondes auraient une signification physique analogue à celle des ondes des théories classiques. Dans certains cas, la propagation des ondes donnerait lieu à des apparences corpusculaires, mais ce ne serait là que des apparences. Au début, pour préciser cette idée, M. Schrödinger avait voulu assimiler le corpuscule à un petit train d'ondes, mais cette interprétation ne peut se soutenir, ne serait-ce que parce qu'un train d'ondes a toujours une tendance à s'étaler rapidement et sans cesse davantage dans l'espace et ne saurait par suite représenter un corpuscule doué d'une stabilité prolongée. Bien que M. Schrödinger paraisse encore s'attacher à des interprétations de ce type, je ne crois pas pour ma part qu'elles soient acceptables et je pense qu'il faut admettre comme un fait physique cette dualité onde-corpuscule. Or, précisément, les deux autres interprétations auxquelles j'ai fait allusion admettent cette dualité comme réelle, mais elles l'envisagent à des points de vue très différents.

La première, celle à laquelle je suis resté attaché jusqu'en 1928, consiste à donner à la dualité onde-corpuscule une signification concrète, conforme aux idées traditionnelles de la Physique et pour cela, à l'interpréter en considérant le corpuscule comme une sorte de singularité au sein d'un phénomène ondulatoire étendu dont il serait le centre. La difficulté est alors de comprendre pourquoi la Mécanique ondulatoire fait usage avec succès d'ondes *continues* sans singularités du type des ondes continues de la théorie classique de la lumière. Je dirai tout à l'heure sous quelle forme j'avais essayé de développer cette manière de voir.

La seconde interprétation du dualisme onde-corpuscule consiste à ne considérer que les idées de corpuscule et d'onde continue et à les regarder comme des «faces complémentaires de la réalité» au sens que Bohr donne à cette expression. Je résumerai également tout à l'heure cette doctrine subtile, tout à fait différente des idées

de la Physique classique, qui constitue depuis vingt-cinq ans l'interprétation «orthodoxe» de la Mécanique ondulatoire.

Pour l'instant je reviens à mon exposé historique. En 1924, au lendemain de la soutenance de ma thèse, j'étais tout imprégné des conceptions de la physique classique et c'est dans le cadre de ces conceptions, c'est-à-dire dans le cadre de la représentation cartésienne des phénomènes «par figures et par mouvements», que je cherchais à interpréter les idées nouvelles que j'avais introduites. Il me paraissait certain que le corpuscule devait avoir à chaque instant une position dans l'espace et une vitesse, par suite qu'il décrivait au cours du temps une trajectoire. Mais j'étais aussi convaincu qu'il était lié à un phénomène périodique et ondulatoire permettant de définir une fréquence et une longueur d'onde associées. Je m'imaginai donc tout naturellement le corpuscule comme une sorte de singularité au sein d'un phénomène ondulatoire étendu, le tout ne formant qu'une seule réalité physique. Le mouvement de la singularité étant lié à l'évolution du phénomène ondulatoire dont elle était le centre se trouverait dépendre de toutes les circonstances que ce phénomène ondulatoire rencontrerait dans sa propagation dans l'espace. Pour cette raison le mouvement du corpuscule ne suivrait point les lois de la Mécanique classique, qui est une Mécanique purement ponctuelle où le corpuscule subit seulement l'action des forces qui s'exercent sur lui le long de sa trajectoire sans subir aucune répercussion de l'existence des obstacles qui peuvent se trouver au loin en dehors de sa trajectoire : dans ma conception, au contraire, le mouvement de la singularité subirait l'influence de tous les obstacles qui influeraient sur la propagation du phénomène ondulatoire dont elle est solidaire et ainsi s'expliquerait l'existence des interférences et de la diffraction.

Mais la difficulté était alors de comprendre pourquoi la Mécanique ondulatoire s'était développée en envisageant uniquement des solutions continues, sans singularités, des équations de propagation, solutions qu'il est d'usage de désigner par la lettre grecque *Psi*. Déjà, je l'ai dit, lorsque j'avais associé au mouvement rectiligne et uniforme du corpuscule la propagation d'une onde, d'une onde *Psi* plane et monochromatique, je m'étais heurté à cette difficulté : la phase de l'onde qui me permettait de définir la fréquence et la longueur d'ondes associées au corpuscule me paraissait bien avoir un sens physique direct, tandis que l'amplitude constante de l'onde ne pouvait être, à mes yeux, qu'une représentation statistique des positions possibles du corpuscule. Il y

avait là un mélange de l'individuel et de la statistique qui m'intriguait et qu'il me paraissait urgent d'éclaircir.

Si l'on se reporte aux Notes que j'ai publiées de 1924 à 1927 sur ce sujet, on voit ma pensée s'orienter peu à peu vers ce que j'ai appelé alors «la théorie de la double solution». J'en ai fait un exposé d'ensemble dans un article paru en mai 1927 dans le *Journal de Physique* (t. VIII, 1927, p. 225), qui reste le seul document complet sur la question.

Dans ce Mémoire je postulais hardiment que toute solution continue des équations de la Mécanique ondulatoire était en quelque sorte doublée par une solution à singularité  $u$  comportant une singularité en général mobile (le corpuscule !) et ayant la même phase que la solution  $Psi$ . Les deux solutions  $u$  et  $Psi$  auraient donc toutes deux la forme d'une onde, la phase étant la même fonction de  $x, y, z, t$ , mais l'amplitude étant tout à fait différente, puisque celle de  $u$  comporterait une singularité et que celle de  $Psi$  serait continue. Partant de l'équation de propagation supposée la même pour  $u$  et pour  $Psi$ , je démontrais alors un théorème fondamental : la singularité mobile de  $u$  devait au cours du temps décrire une trajectoire telle qu'en chaque point la vitesse soit proportionnelle au gradient de la phase. Ainsi se traduirait, pouvait-on dire, la réaction de la propagation du phénomène ondulatoire sur la singularité qui en formait le centre. Je montrais aussi que cette réaction pouvait s'exprimer en considérant le corpuscule-singularité comme soumis à un «potentiel quantique» qui était précisément l'expression mathématique de la réaction de onde sur lui. Je rejoignais ainsi une idée des protagonistes de l'ancienne théorie corpusculaire de la lumière qui disaient que, dans la diffraction de la lumière par le bord d'un écran, le corpuscule de lumière subit une action de ce bord d'écran et est par suite dévié de sa route rectiligne.

L'onde  $u$  avec sa singularité mobile constituant ainsi le corpuscule et le phénomène ondulatoire qui l'entoure, quel était le sens de l'onde  $Psi$  ? Pour moi, elle n'avait aucune signification physique réelle, la réalité physique étant décrite par l'onde  $u$ . Mais comme l'onde  $u$  était supposée avoir la même phase que l'onde  $Psi$  et que le corpuscule-singularité se déplaçait toujours en suivant le gradient de la phase, les trajectoires possibles du corpuscule coïncidaient avec les courbes orthogonales aux surfaces d'égale phase de  $Psi$  et je montrais alors aisément que cela conduisait à considérer la probabilité de trouver le corpuscule en un point comme égale au carré de l'amplitude, à l'intensité de l'onde  $Psi$ . Or,

c'était bien là la première caractéristique essentielle que l'on avait été amené à attribuer à l'onde  $\Psi$  : le carré de son amplitude  $|\Psi|^2$  en un point devait donner la probabilité de présence du corpuscule associé en ce point. Ce principe, admis dès le début de la Mécanique ondulatoire, et nécessaire pour donner la théorie de la diffraction des électrons, n'était d'ailleurs qu'une transposition directe de ce qui était admis depuis longtemps en Optique. Un des principes essentiels de la théorie ondulatoire de la lumière était, en effet, que la densité de l'énergie radiante est donnée par le carré de l'amplitude de l'onde lumineuse et, si l'on introduit alors l'idée de photon, ceci ne peut signifier qu'une chose, comme Einstein l'avait très bien vu dès ses premiers travaux de 1905 : la probabilité pour qu'un photon soit présent en un point de l'espace est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde lumineuse qui lui est associée.

Ainsi l'onde  $\Psi$  couramment utilisée en Mécanique ondulatoire m'apparaissait comme une onde purement fictive, simple représentation de probabilités et par suite brusquement modifiée par tout renseignement qui modifie nos connaissances sur l'état du corpuscule. C'était bien là le caractère de l'onde  $\Psi$  tel qu'il se dégageait de plus en plus des progrès de la Mécanique ondulatoire. Mais pour moi, il existait, cachée pour ainsi dire derrière l'onde continue  $\Psi$ , l'onde  $u$  à singularité qui décrivait réellement le corpuscule centre d'un phénomène ondulatoire étendu. Si l'on pouvait avoir l'impression que l'onde  $\Psi$  suffisait pour décrire entièrement le comportement du corpuscule tel qu'on pouvait l'observer expérimentalement, c'était en raison de cette coïncidence des phases qui était la clef de ma théorie.

Telle était la subtile et curieuse interprétation de la Mécanique ondulatoire que j'essayais de développer en 1927. Je ne tardais pas à me rendre compte que sa justification se heurtait à de très grandes difficultés mathématiques. Il fallait en effet démontrer que, dans un problème de Mécanique ondulatoire bien posé avec ses conditions aux limites et où l'on connaît la solution du type  $\Psi$ , il existe également des solutions du type  $u$  à singularité mobile. Il fallait aussi refaire la théorie des phénomènes d'interférences, par exemple les trous de Young, en utilisant *uniquement* l'onde  $u$  à singularité, seule réalité physique, sans faire appel aux ondes continues  $\Psi$  considérées comme fictives. Il fallait interpréter à l'aide des ondes  $u$  la Mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules développée dans le cadre de l'espace de configuration par M. Schrödinger, etc. Mais je ne me sentais pas capable de résoudre ces difficiles

problèmes mathématiques comportant toujours l'étude ardue de relations à singularité.

À l'heure actuelle, le nouvel examen que j'ai fait depuis quelques mois de mes idées de 1927 m'a amené à proposer une modification de la définition de l'onde  $u$ . En 1927, je la considérais comme une solution avec singularité des équations *linéaires* admises par la Mécanique ondulatoire pour l'onde  $\Psi$ . Diverses considérations, et en particulier le rapprochement avec la théorie de la Relativité généralisée dont je parlerai plus loin, m'ont fait penser que la véritable équation de propagation de l'onde  $u$  pourrait être *non linéaire* comme celles que l'on rencontre dans la théorie de la gravitation d'Einstein, équation non linéaire qui admettrait comme forme approximative l'équation de la Mécanique ondulatoire quand les valeurs de  $u$  seraient assez faibles. Si ce point de vue était exact, on pourrait même admettre que l'onde  $u$  ne comporte pas une singularité mobile au sens strict du mot singularité, mais simplement une très petite région singulière mobile (de dimensions sans doute de l'ordre de  $10^{-13}$  cm) à l'intérieur de laquelle les valeurs de  $u$  seraient assez grandes pour que l'approximation linéaire ne soit plus valable, bien qu'elle soit valable dans tout l'espace en dehors de cette très petite région. Malheureusement ce changement de point de vue ne facilite pas la résolution des problèmes mathématiques qui se posent, car, si l'étude des solutions à singularités des équations linéaires est souvent difficile, celle des solutions des équations non linéaires est plus difficile encore.

Revenons à 1927. Lorentz m'avait demandé au printemps de préparer un rapport sur la Mécanique ondulatoire pour le 5<sup>e</sup> Conseil de Physique Solvay qui devait se tenir à Bruxelles au mois d'octobre suivant. Conscient des difficultés que j'aurais eu à surmonter pour faire un exposé, à peu près satisfaisant du point de vue de la rigueur mathématique, de mes idées sur la double solution, je me résolus à adopter un point de vue simple dont j'avais indiqué la possibilité à la fin de mon article au *Journal de Physique*. Comme avec mes idées d'alors le mouvement du corpuscule est défini par le gradient de la phase qui est commune aux solutions  $u$  et  $\Psi$ , tout se passe en apparence comme si le corpuscule était «guidé» par l'onde continue  $\Psi$ . On pouvait donc, me semblait-il, se placer au point de vue suivant : postuler l'existence du corpuscule comme une réalité indépendante et admettre que le corpuscule est guidé dans son mouvement par l'onde  $\Psi$  suivant la formule «vitesse proportionnelle au gradient

de la phase». Cette manière de présenter les choses, je l'avais désignée par le nom expressif de «théorie de l'onde-pilote» et ce fut celle que je développai dans mon rapport qui a figuré dans les comptes rendus du 5<sup>e</sup> Conseil de Physique Solvay<sup>2</sup>. Je ne me suis pas aperçu à ce moment qu'en adoptant cette sorte de ligne de repli, j'affaiblissais beaucoup ma position. En effet, si l'hypothèse de la double solution est difficile à justifier mathématiquement, elle est cependant susceptible, en cas de succès, d'offrir une vue très profonde de la constitution de la matière et de la dualité des ondes et des corpuscules et même peut-être, nous le verrons, de permettre un rapprochement des conceptions quantiques et des conceptions relativistes. La théorie simplifiée de l'onde-pilote, bien qu'elle soit en quelque sorte une conséquence de la théorie de la double solution, n'a aucun de ces avantages. Comme le caractère statistique et purement fictif de l'onde *Psi* est quelque chose de bien établi et admis, semble-t-il, par tout le monde, la théorie de l'onde-pilote aboutit à ce résultat inacceptable de faire déterminer le mouvement du corpuscule par une grandeur, l'onde continue *Psi*, qui n'a aucune signification physique réelle, qui dépend de l'état des connaissances de celui qui l'emploie et qui doit varier brusquement lorsqu'une information vient modifier ces connaissances. Si les conceptions que j'ai énoncées en 1927 devaient un jour ressusciter de leurs cendres, ce ne pourrait être que sous la forme subtile de la double solution et non sous la forme tronquée et inacceptable de l'onde-pilote.

Au Conseil Solvay d'octobre 1927, mon exposé sur l'onde-pilote trouva peu d'audience. M. Pauli fit à mes conceptions de sérieuses objections auxquelles j'entrevois une réponse possible, mais sans pouvoir la préciser entièrement<sup>3</sup>. M. Schrödinger, ne croyant pas à l'existence des corpuscules, ne pouvait me suivre. MM. Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac, etc., développaient l'interprétation purement probabiliste que j'ai déjà désignée plus haut sous le nom d'interprétation actuellement orthodoxe. Lorentz, président du Conseil, ne pouvait admettre une semblable interprétation et réaffirmait avec force sa conviction que la Physique théorique devait rester déterministe et continuer à employer des images claires dans le cadre classique de l'espace et du temps. Einstein critiquait l'interprétation probabiliste et lui opposait des objections

<sup>2</sup>. Ces comptes rendus ont été publiés sous le titre : *Électrons et Photons* (Gauthier-Villars, 1928).

<sup>3</sup>. Voir *Électrons et Photons*, pp. 280-283.

un peu troublantes : il m'encourageait dans la voie où je m'étais engagé, mais sans cependant approuver nettement ma tentative.

Je revins à Paris très troublé par ces discussions et, en méditant sur ce sujet, j'arrivai à la conviction que, pour la raison que j'ai exposée plus haut et quelques autres encore, la théorie de l'onde-pilote était indéfendable. N'osant pas en revenir à la double solution à cause de ses difficultés mathématiques, je me décourageai et me ralliai à l'interprétation purement probabiliste de Bohr et Heisenberg<sup>4</sup>. Depuis vingt-cinq ans, je l'ai adoptée comme base de mon enseignement et exposée dans mes livres et mes conférences. J'ai cherché à en préciser clairement les divers aspects et je puis affirmer par expérience que ce n'est pas toujours là une tâche facile. Je vais à nouveau essayer d'en donner un bref résumé.

Dans la conception de Bohr et Heisenberg, il n'y a que le corpuscule et l'onde continue  $\Psi$ , mais ni l'un ni l'autre ne peuvent se représenter à la manière classique. On ne peut en général attribuer au corpuscule ni position, ni vitesse, ni trajectoire bien déterminées : il peut seulement se révéler, au moment où l'on fait une observation ou une mesure, comme ayant telle position ou telle vitesse. Il possède pour ainsi dire à chaque instant toute une série de positions ou d'états de mouvement possibles, ces diverses potentialités pouvant s'actualiser au moment de la mesure avec certaines probabilités. C'est ici qu'intervient l'onde  $\Psi$  associée : elle est une sorte de représentation de l'ensemble des potentialités du corpuscule avec leurs probabilités respectives. C'est ainsi que l'extension de l'onde  $\Psi$  dans l'espace représente l'indétermination de la position du corpuscule qui peut se révéler présent en un point quelconque de la région occupée par l'onde avec une probabilité proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde en ce point. De même pour les états de mouvement : l'onde  $\Psi$  a une décomposition «spectrale» en série ou intégrale de Fourier et cette décomposition représente tous les résultats possibles d'une mesure de la quantité de mouvement, la probabilité de chaque résultat possible d'une telle mesure étant donnée par le carré du coefficient correspondant de la décomposition de Fourier. Et l'interprétation se développe sous une forme très générale applicable à toute grandeur mesurable ; elle prend une forme mathématiquement très élégante, faisant intervenir toutes les ressources de l'analyse linéaire : la théorie des fonctions et valeurs propres, les développements en série de fonctions propres, les matrices, l'espace de Hilbert, etc. Et

---

<sup>4</sup>. La première idée de cette interprétation paraît due à M. Born.

l'on montre que ce formalisme a pour conséquence inéluctable les «incertitudes d'Heisenberg», suivant lesquelles nous ne pouvons jamais connaître exactement et simultanément la position et l'état de mouvement d'un corpuscule, toute observation ou expérience qui augmente notre connaissance de la position ayant comme contrepartie une diminution de notre connaissance de la quantité de mouvement et inversement.

L'interprétation de la Mécanique ondulatoire de Bohr et Heisenberg a de nombreuses conséquences qui ouvrent des perspectives philosophiques nouvelles. Le corpuscule n'est plus un objet bien défini dans le cadre de l'espace et du temps ; il n'est plus qu'un ensemble de potentialités affectées de probabilités, il n'est plus qu'une entité qui se manifeste à nous d'une façon fugitive, tantôt sous un aspect, tantôt sous un autre.

M. Bohr, qui est l'un des plus grands savants de notre époque, mais qui est un peu le Rembrandt de la Physique contemporaine, car il manifeste parfois un certain goût pour le «clair obscur», a dit des corpuscules qu'ils sont «unsharply defined individuals within finite space-time limits». Quant à l'onde, elle perd aussi, plus totalement encore que le corpuscule, sa signification physique ancienne : elle n'est plus qu'une représentation de probabilités (un élément de prévision, dit M. Destouches) dépendant des connaissances acquises par celui qui l'emploie. Elle est personnelle et subjective comme le sont les répartitions de probabilité et, comme elles, elle se modifie brusquement quand l'utilisateur acquiert de nouvelles informations : c'est là ce que M. Heisenberg a appelé la «réduction du paquet d'ondes par la mesure», réduction qui suffirait à elle seule à démontrer le caractère non physique de l'onde *Psi*.

Du même coup disparaît le déterminisme des phénomènes admis par l'ancienne Physique et qui était lié à la possibilité de se faire une image précise de la réalité physique dans le cadre de l'espace et du temps. On ne peut plus en général prévoir avec certitude les phénomènes qui vont avoir lieu : seules les probabilités des divers phénomènes possibles sont accessibles à nos calculs. Il est vrai qu'entre chaque mesure les probabilités ont une évolution rigoureuse réglée par l'équation d'ondes, mais chaque mesure ou observation nouvelle, par les informations qu'elle nous apporte, rompt le cours de ce déterminisme des probabilités.

L'interprétation de Bohr et Heisenberg non seulement ramène toute la Physique à la probabilité, mais elle donne à cette notion un



sens qui est tout nouveau dans la Science. Tandis que tous les grands maîtres de l'époque classique, depuis Laplace jusqu'à Henri Poincaré, ont toujours proclamé que les phénomènes naturels étaient déterminés et que la probabilité, quand elle s'introduit dans les théories scientifiques, résultait de notre ignorance ou de notre incapacité à suivre un déterminisme trop compliqué, dans l'interprétation actuellement admise de la Physique quantique, nous avons affaire à de la «probabilité pure» qui ne résulterait pas d'un déterminisme caché. Dans des théories classiques comme la théorie cinétique des gaz, les lois de probabilités étaient considérées comme résultant de notre ignorance des mouvements entièrement déterminés, mais désordonnés et complexes, des innombrables molécules du gaz : la connaissance des positions et des vitesses des molécules nous aurait en principe permis de calculer rigoureusement toute l'évolution du gaz, mais en pratique les probabilités s'introduisent par suite de notre ignorance de la valeur de ces paramètres cachés. Or, l'interprétation purement probabiliste de la Mécanique ondulatoire rejette une telle interprétation des lois de probabilités qu'elle fournit : ces lois ne résulteraient pas de notre ignorance des paramètres cachés qui seraient les coordonnées et la vitesse du corpuscule, car ces paramètres cachés n'existeraient pas, le corpuscule ne pouvant se manifester avec une position *ou* avec une vitesse bien définie que fugitivement au moment d'une observation ou d'une mesure. La probabilité en Physique quantique ne résulterait plus d'une ignorance : elle serait de la contingence pure.

Par un raisonnement célèbre, M. von Neumann a démontré, il y a une vingtaine d'années, que la forme des lois de probabilité de la Mécanique ondulatoire vérifiées par l'expérience est incompatible avec l'existence de paramètres cachés. Ainsi les ponts seraient définitivement coupés : il serait impossible de revenir en arrière et, en rendant au corpuscule sa définition classique, d'interpréter à l'aide de paramètres cachés le formalisme de la Mécanique quantique. La démonstration de von Neumann, abstraite et élégante, est très impressionnante. Je l'ai crue longtemps irréfutable. Je dirai tout à l'heure pourquoi j'ai aujourd'hui des doutes sur sa validité.

Depuis vingt-cinq ans, la presque totalité des physiciens s'est ralliée à l'interprétation purement probabiliste de Bohr et Heisenberg. Il y a eu cependant quelques exceptions très notables, des savants aussi éminents que MM. Einstein et Schrödinger ayant

toujours refusé de l'accepter et lui ayant opposé des objections troublantes. Dès le Conseil Solvay de 1927, Einstein avait développé l'objection suivante<sup>5</sup> : considérons un écran plan percé d'un trou sur lequel tombe normalement un corpuscule avec son onde *Psi* associée. L'onde *Psi* est diffractée lors de son passage à travers le trou et prend derrière l'écran la forme d'une onde sphérique divergente. Si l'on dispose derrière l'écran un film ayant la forme d'un hémisphère, on pourra enregistrer par une impression photographique la localisation du corpuscule en un point P de cet hémisphère. La Mécanique ondulatoire nous apprend (tout le monde est d'accord sur ce point) que la probabilité d'une localisation en P est donnée par le carré de l'amplitude de l'onde *Psi* en P. S'il existe à chaque instant une localisation du corpuscule permettant de définir une trajectoire (à l'aide de variables cachées), on conçoit très bien que notre ignorance de la trajectoire du corpuscule nous permette seulement de définir une probabilité pour que la trajectoire passe par tel ou tel point de l'écran ; le fait que le corpuscule produise une action photographique en P nous apprend que la trajectoire de ce corpuscule passait par P et, dès que nous avons ce renseignement, les probabilités pour que la trajectoire passe par les autres points du film s'évanouissent. Cette explication est très claire, mais ce n'est pas du tout celle que donne l'interprétation purement probabiliste. Suivant celle-ci, avant l'impression photographique, le corpuscule est potentiellement présent en tous points de la région postérieure à l'écran, avec une probabilité égale au carré de l'amplitude de l'onde *Psi*. Dès que l'impression photographique se produit en P, le corpuscule se localise, se condense pourrait-on dire, au point P et *instantanément* la probabilité de sa présence en tout autre point du film tombe à zéro. Or, disait Einstein, une telle interprétation est incompatible avec toutes nos idées sur l'espace et sur le temps (même présentées sous la forme de l'espace-temps relativiste) et avec l'idée d'une propagation de proche en proche à vitesse finie des actions physiques dans l'espace. Et il ne suffirait pas de dire que nos concepts d'espace et de temps tirés de l'expérience macroscopique peuvent fort bien être en défaut à l'échelle atomique : en effet, le film a des dimensions macroscopiques (il peut avoir une surface de 1 m<sup>2</sup>) et il s'agirait bien ici d'une insuffisance des notions d'espace et de temps, même à l'échelle macroscopique, ce qui paraît vraiment difficile à accepter. À cette objection d'Einstein à laquelle,

---

<sup>5</sup>. Voir *Électrons et Photons*, pp. 253-256.

à ma connaissance, on n'a pas fait de réponse satisfaisante, s'en sont ajoutées d'autres, faites ensuite par Schrödinger et encore par Einstein, et portant sur les phénomènes d'interactions et les états «corrélés» qui en résultent. Je ne puis exposer ici ces arguments, je dirai seulement que, comme celui d'Einstein en 1927, ils conduisent à des conclusions paradoxales, en particulier à mettre en doute, même à l'échelle macroscopique, nos notions anciennes d'espace et de temps. Évidemment, M. Bohr a répondu aux critiques qu'on a adressées à sa manière de voir par des considérations qui sont très fines et très intéressantes à étudier ; mais ses réponses sont un peu entourées de ce clair-obscur dont je parlais tout à l'heure et pour cette raison elles peuvent ne pas paraître à tous entièrement convaincantes.

La situation en était là, à peu près stabilisée depuis un quart de siècle, quand a paru, il y a quelques mois, l'article de M. Bohm dont j'ai parlé au début. Cet article ne contient rien d'essentiellement nouveau, puisqu'il ne fait que reprendre la théorie de l'onde-pilote que j'avais exposée au Conseil Solvay, théorie qui, ne faisant intervenir que l'onde de probabilité  $\Psi$  et non l'onde à singularité  $u$  introduite par l'hypothèse de la double solution, me paraît toujours se heurter à d'insurmontables difficultés. Néanmoins, en dehors du mérite d'avoir ramené l'attention sur ces questions, M. Bohm a eu aussi celui de faire un certain nombre de remarques intéressantes et, en particulier, de faire une analyse des processus de mesure envisagés du point de vue de l'onde-pilote qui paraît permettre d'écarter les objections opposées à mes idées par M. Pauli en 1927. Dès que j'ai eu connaissance du Mémoire de M. Bohm et des idées de M. Vigier dont je vais parler dans un instant, j'ai résumé mes observations à leur sujet dans deux Notes aux *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* parues en septembre 1951 et en janvier 1952. L'un des points qui ont attiré mon attention est le suivant : la démonstration de M. von Neumann prétend interdire toute interprétation des distributions de probabilités de la Mécanique ondulatoire par une théorie causale à paramètres cachés ; or, les théories de la double solution et de l'onde-pilote, si elles ne peuvent être considérées comme prouvées, *existent* cependant et l'on peut se demander comment leur existence est conciliable avec le théorème de von Neumann. Cette remarque m'a conduit à examiner de nouveau la démonstration de ce théorème et je me suis alors aperçu que cette démonstration reposait essentiellement sur le postulat suivant : toutes les répartitions de probabilités admises par la

Mécanique ondulatoire ont une existence physique *avant même que l'on ait fait l'expérience qui fait entrer en jeu l'une de ces répartitions*. Ainsi les répartitions de probabilités, déduites de la connaissance de l'onde *Psi* et relatives à la position et à l'état de mouvement, existeraient avant les expériences de mesure qui peuvent permettre de connaître exactement la position ou l'état de mouvement. Or, on peut très bien admettre au contraire (et ceci est même tout à fait en accord avec le rôle essentiel que tous les physiciens quantistes attribuent aujourd'hui aux actes de mesure) que ces distributions de probabilités, ou du moins certaines d'entre elles, peuvent être créées par l'exécution de la mesure et n'exister que quand la mesure a été effectuée, mais qu'on n'a pas encore eu connaissance de son résultat. Dans les théories de la double solution et de l'onde-pilote, qui sur ce point ne sont pas distinctes, on admet que la distribution de probabilité relative à la position, donnée par le carré de l'amplitude de l'onde continue *Psi*, existe avant toute mesure, mais d'autres répartitions de probabilités (par exemple celle relative aux quantités de mouvement) seraient créées par la mesure ; le postulat qui est à la base du raisonnement de von Neumann ne leur est donc pas applicable et ceci fait tomber la conclusion de ce raisonnement. L'interprétation purement probabiliste admet l'équivalence absolue de toutes les répartitions de probabilités et c'est pourquoi M. von Neumann a admis cette équivalence comme postulat, mais ce faisant, il a simplement montré que, si l'on admet les conceptions de base de l'interprétation purement probabiliste, on ne peut plus échapper à cette interprétation. Il y a donc là une sorte de cercle vicieux et le théorème de M. von Neumann ne me paraît plus avoir la portée que je lui attribuais moi-même dans ces dernières années.

À la suite de la tentative de M. Bohm, M. Jean-Pierre Vigié, qui travaille à l'Institut Henri Poincaré, a eu l'idée très intéressante d'établir un rapprochement entre la théorie de la double solution et un théorème démontré par Einstein<sup>6</sup> (également en 1927, mais tout à fait indépendamment de mes recherches, car je faisais alors des travaux sur les quanta sans m'occuper de Relativité généralisée, tandis qu'Einstein concentrait son attention sur la Relativité généralisée sans s'occuper des quanta). Pour comprendre l'intérêt de

---

<sup>6</sup>. Il convient de noter qu'un résultat tout à fait analogue avait été obtenu dès 1926 par M. Georges Darmon [voir G. Darmon, *Les équations de la Cravitation einsteinienne (Mémoires des Sciences mathématiques, Gauthier-Villars, 1927)*].

ce rapprochement, il faut savoir que les physiciens théoriciens sont actuellement répartis entre deux tendances qui paraissent inconciliables. D'une part, Einstein et ses élèves forment un petit groupe qui poursuit le développement des idées relativistes en cherchant à développer les conceptions de la Relativité généralisée. D'autre part, la grande majorité des théoriciens attirés par l'intérêt des problèmes atomiques font des efforts pour faire progresser la Physique quantique sans se préoccuper aucunement des idées de la Relativité généralisée. Assurément la Mécanique ondulatoire a tenu compte des conceptions de la Relativité restreinte et a cherché à les englober : la théorie de l'électron à spin de Dirac et plus récemment les belles théories de Tomonaga, Schwinger, Feynman et Dyson ont utilisé les idées de covariance relativiste. Mais c'est toujours de Relativité restreinte qu'il s'agit. Or, on sait que la Relativité restreinte ne se suffit pas à elle-même et qu'il est nécessaire de la généraliser comme l'avait fait Einstein en 1916. Il est dès lors paradoxal que les deux grandes théories de la Physique contemporaine, la théorie de la Relativité générale et celle des Quanta, soient aujourd'hui sans aucun contact et s'ignorent mutuellement. Il faudra bien qu'un jour on parvienne à en faire une synthèse.

Après avoir développé les grandes lignes de la Relativité généralisée, Einstein s'était préoccupé de la façon dont on pourrait représenter la structure atomique de la matière par des singularités du champ de gravitation; D'autre part, il s'était aussi préoccupé du point suivant : en Relativité généralisée, on admet que le mouvement d'un corps est représenté dans l'espace-temps courbe par une géodésique de cet espace-temps et ce postulat avait permis à Einstein de retrouver le mouvement des planètes autour du Soleil en interprétant, en outre, le déplacement séculaire du périhélie de Mercure. Mais si l'on veut définir les particules élémentaires de la matière par l'existence de singularités dans le champ de gravitation, il devrait être possible de démontrer, *à partir des seules équations du champ de gravitation*, que le mouvement des singularités a lieu suivant les géodésiques de l'espace-temps, sans avoir à introduire ce résultat comme postulat indépendant. Cette question a longtemps préoccupé Einstein qui a réussi, en 1927, dans un travail en collaboration avec Grommer<sup>7</sup>, à démontrer le théorème qu'il avait en vue. Cette démonstration a été ensuite reprise et étendue de

---

<sup>7</sup>. *Sitz Preuss. Akad. Wiss.*, t. I, 1929.

diverses façons par Einstein lui-même et ses collaborateurs Infeld<sup>8</sup> et Hoffmann. Il est certain que la démonstration du théorème d'Einstein présente une certaine analogie avec celle que j'ai donnée en 1927 pour prouver qu'un corpuscule doit toujours avoir sa vitesse dirigée suivant le gradient de la phase de l'onde  $u$  dont il constitue une singularité. M. Vigier poursuit avec beaucoup d'ardeur des tentatives pour préciser cette analogie en cherchant à introduire les fonctions d'onde  $u$  dans la définition de la métrique de l'espace-temps. Bien que ces tentatives ne soient pas parvenues à leur plein achèvement, il est certain que la voie dans laquelle il s'est engagé est très intéressante, car elle pourrait conduire à une unification des idées de la Relativité généralisée et de la Mécanique ondulatoire. En se représentant les corpuscules matériels (et également les photons) comme des régions singulières 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.

Une chose me paraît certaine, c'est que dans une telle synthèse on devra retrouver et justifier tous les résultats, tous les modes de calcul employés par la Mécanique ondulatoire dans son interprétation actuelle, y compris l'impossibilité de prévoir en général le résultat exact d'une mesure microphysique, les incertitudes d'Heisenberg, la quantification des systèmes atomiques, etc. mais alors, dira-t-on, pourquoi modifier l'interprétation actuelle si elle suffit à rendre compte de tous les phénomènes observables, pourquoi introduire toutes les complications inutiles de double solution, de solutions à singularité, etc., en s'exposant ainsi à se fourvoyer dans des impasses ? À cela, on peut d'abord répondre que le retour à des conceptions claires, cartésiennes, respectant la validité du cadre de l'espace et du temps, satisferait certainement beaucoup d'esprits et permettrait non seulement de lever les objections troublantes d'Einstein et de Schrödinger, mais aussi d'éviter certaines conséquences étranges de l'interprétation actuelle. En effet, cette interprétation, en cherchant à décrire les phénomènes quantiques uniquement à l'aide de la fonction continue  $\Psi$  dont le caractère statistique est certain, aboutit logiquement à une sorte de «subjectivisme» apparenté à

---

<sup>8</sup>. *Rev Mod. Phys.*, t.xxiv, 1949, p. 408.

l'idéalisme au sens des philosophes et elle tend à nier l'existence d'une réalité physique indépendante de l'observateur. Or, le physicien reste instinctivement, comme Meyerson l'a naguère fortement souligné, un «réaliste» et il a pour cela quelques bonnes raisons : les interprétations subjectivistes lui causeront toujours une impression de malaise et je crois que finalement il serait heureux de s'en affranchir.

Mais on peut aussi penser avec M. Bohm que, si l'interprétation actuelle suffit à la prévision des phénomènes à l'échelle atomique ( $10^{-8}$  à  $10^{-11}$  cm), il pourrait ne pas en être de même à l'échelle nucléaire ( $10^{-13}$  cm), car alors les zones singulières des divers corpuscules pourraient empiéter et ne plus pouvoir être considérées comme isolées. Il faut bien avouer qu'à l'heure actuelle, la théorie des phénomènes nucléaires et en particulier des forces qui maintiennent la stabilité du noyau est dans un état très peu satisfaisant. De plus, une théorie des corpuscules de matière nous fait en ce moment d'autant plus cruellement défaut qu'on découvre presque chaque mois de nouveaux types de mésons. Il semble que la Physique ait un besoin urgent de pouvoir définir une structure des particules et notamment de pouvoir introduire un «rayon» de l'électron comme dans l'ancienne théorie de Lorentz. Or elle se trouve fort empêchée de le faire par l'emploi exclusif, pour la description des particules, de l'onde statistique *Psi* qui lui interdit d'employer aucune image structurale de ces particules. Il est permis de croire qu'un changement de point de vue comportant un retour aux images spatio-temporelles améliorerait la situation ; évidemment ce n'est là qu'une espérance, un chèque en blanc dirait M. Pauli, mais cette possibilité ne doit pas, pensons-nous, être *a priori* complètement exclue et il faut éviter le danger qu'une foi trop grande dans l'interprétation purement probabiliste de la Physique quantique ne finisse par la rendre stérile.

La question qui se pose est finalement de savoir, Einstein l'a souvent souligné, si l'interprétation actuelle qui utilise uniquement l'onde *Psi* à caractère statistique est une description «complète» de la réalité, auquel cas il faut admettre l'indéterminisme et l'impossibilité de représenter les réalités de l'échelle atomique d'une façon précise dans le cadre de l'espace et du temps, ou si, au contraire, cette interprétation est «incomplète» et cache derrière elle, comme les anciennes théories statistiques de la Physique classique, 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. Si cette seconde hypothèse devait se montrer fructueuse, c'est, me semble-t-il, sous la forme d'une théorie à double solution, plus ou moins amendée et sans doute mise en relation avec la Relativité généralisée, qu'il faudrait l'expliciter. Mais je n'ignore pas (et une révision récente de toute la question me l'a encore prouvé) à quelles difficultés très grandes, peut-être même insurmontables, une telle tentative va se heurter et quelles difficiles justifications mathématiques seraient nécessaires pour l'établir solidement. Si l'entreprise se montrait inexécutable, il faudrait alors en revenir à l'interprétation purement probabiliste, mais à l'heure actuelle un nouvel examen de la question ne me paraît pas superflu.

Sans doute, après m'avoir vu abandonner mes premières tentatives et exposer dans tous mes écrits depuis vingt-cinq ans l'interprétation de Bohr et Heisenberg, certains m'accuseront peut-être d'inconstance en me voyant éprouver quelques nouveaux doutes à son sujet et me demander si ma première orientation après tout n'était pas la bonne. À cela, si je voulais badiner, je pourrais répondre avec Voltaire : «L'homme stupide est celui qui ne change pas.» Mais une réponse plus sérieuse est possible. L'histoire des sciences montre que les progrès de la Science ont été constamment entravés par l'influence tyrannique de certaines conceptions que l'on avait fini par considérer comme des dogmes. Pour cette raison, il convient de soumettre périodiquement à un examen très approfondi les principes que l'on a fini par admettre sans plus les discuter. L'interprétation purement probabiliste de la Mécanique ondulatoire a certainement depuis un quart de siècle rendu des services aux physiciens, parce qu'elle les a empêchés de s'enliser dans l'étude de problèmes très ardues et difficilement solubles comme ceux que pose la conception des doubles solutions et leur a ainsi permis de marcher résolument dans la voie des applications qui ont été nombreuses et fructueuses. Mais aujourd'hui le pouvoir explicatif de la Mécanique ondulatoire, telle qu'elle est enseignée, paraît en grande partie épuisé. Tout le monde le reconnaît et les partisans de l'interprétation probabiliste eux-mêmes cherchent, sans beaucoup de succès, semble-t-il, à introduire des conceptions nouvelles encore plus abstraites et plus éloignées des images classiques telles que matrices  $S$ , longueur minimum, champs non localisés, etc. Sans nier l'intérêt de ces tentatives, on peut se demander si ce n'est pas plutôt vers un retour à la clarté des représentations spatio-temporelles qu'il faudrait s'orienter. En tout



cas, il est certainement utile de reprendre le problème très difficile de l'interprétation de la Mécanique ondulatoire afin de voir si celle qui est actuellement orthodoxe est vraiment la seule que l'on puisse adopter.

**M. Bachelard.** – Je participe à l'enthousiasme avec lequel vous avez recueilli ce rappel de la langue épopée de la physique théorique. Les victoires se succèdent d'année en année, de décade en décade, et nous sommes, on le voit bien, à l'orée d'une nouvelle victoire. Par conséquent, j'espère que la discussion que nous allons commencer va être tout de suite au niveau des idées qui vous ont été développées. En philosophe modeste, je n'ai que mon admiration à donner à M. Louis de Broglie ; je n'ai pas de question à lui poser ; je sors de cette conférence avec des objets de méditation, mais bien entendu nous allons suivre les règles, et je demanderai, par conséquent, à l'assistance, non pas des contradicteurs, mais des questionneurs. Qui veut maintenant prendre la parole ?

**M. Salzi.** – M. Louis de Broglie, l'opposition entre l'orientation nouvelle de vos recherches et le probabilisme professé par Bohr et Heisenberg en mécanique quantique est beaucoup plus que l'opposition entre une théorie et une autre. Vous êtes dans la ligne de la science, tandis que ce genre de probabilisme en dévie. C'est pourquoi la philosophie a là-dessus son mot à dire.

Après avoir indiqué une différence d'essence, au sens que Husserl donnerait à ce dernier mot, entre mathématique et physique, je partirai d'un exemple très simple de sociologie et, de plus, je le schématiserai. Par une analogie facilement transposable en physique, je montrerai les deux points par lesquels Bohr et Heisenberg me semblent s'écarter de la recherche scientifique. On verra qu'ils sont retombés dans une double erreur où Platon s'était enlisé, mais ils n'ont pas son excuse, car ils n'auraient pas dû oublier la leçon de Descartes.

La spéculation mathématique est-elle autonome ? Oui, quand elle se borne, ainsi que disait Bouasse et comme le prône l'École de Nancy, à élaborer de nouveaux concepts pour eux-mêmes. Ainsi furent édifiées l'arithmétique non pythagoricienne, les géométries non-euclidiennes, la mécanique non-galiléenne. Mais le mathématicien n'est plus autonome s'il veut que les concepts

possibles soient déclarés compossibles, en l'acceptation de Leibniz, c'est-à-dire à même de révéler davantage la matière.

Le calcul ordinaire des probabilités appliqué à des faits réels reste dans l'orbe du déterminisme et même en connivence avec les exigences de la causalité.

Soit des statistiques qui permettent d'établir la moyenne mensuelle des accidents d'automobiles survenus en France en 1952. Avec les mêmes statistiques je puis serrer de plus près les particularités de ces accidents. par exemple, je prends les chiffres département de la Seine et je cherche pourquoi la moyenne y est plus élevée qu'ailleurs. Je ferai l'hypothèse que les usagers se servent peut-être plus souvent de leur voiture que dans les autres départements. Je serai conduit à demander d'autres statistiques sur ce point et elles serreront de plus près la loi des accidents. Et ainsi indéfiniment.

Par conséquent, le calcul des probabilités contrôlé par l'expérience, que les statistiques expriment, a, lui aussi, une marche progressive comme la spéculation à la façon de Newton, de Fresnel et d'Einstein. Pour autant il est à même de fonder des prévisions toujours plus proches des événements.

Il ne renie pas la causalité. Au contraire, il aide à la découvrir davantage. Un ingénieur, par exemple, se demandera comment à tels endroits les accidents sont plus fréquents. Il note le relèvement insuffisant du dos de la courbe au tournant ou bien le caractère glissant de la chaussée. Par suite, il pourra agir sur ces défauts pour rétablir des conditions moins défavorables aux usagers. Qu'est-ce à dire sinon que ce probabilisme reste si bien en accord avec le déterminisme qu'il favorise l'analyse causale, laquelle est la plus forte exigence de ce déterminisme ?

En bref, il tâche, malgré ses limites, de garder les deux avantages des calculs classiques : le perfectionnement de l'analyse de la réalité en jeu et par conséquence l'amélioration des prévisions et de l'action. Voilà qui est parfaitement conforme à l'essence de la science.

Par quoi en diffère donc le probabilisme tel que les équations de Bohr et de Heisenberg le présentent ? Il suffit de rappeler deux de leurs aboutissements. D'abord le fameux dilemme des relations d'incertitude. Si à une échelle assez petite de la microphysique, on veut serrer de plus près la position d'un corpuscule, on doit consentir à relâcher d'autant l'étau des chiffres qui expriment la vitesse de ce corpuscule. Et inversement. La marge de l'incertitude

serait définitive, comme si l'on avait à faire à une zone de contingence.

En second lieu, d'une manière générale, les chiffres amenés par le jeu des équations ne recevraient pas des données de l'expérience la confirmation, mais ce seraient eux qui leur donneraient tout leur sens, comme si la spéculation mathématique était ici nécessaire et suffisante.

Cependant, au point de vue de la science, ces deux propositions sont tout à fait inadmissibles.

Pour la première, c'est évident. Où il n'y a plus déterminisme, le savant cesse d'avoir prise. Sa recherche s'effondre telle une automobile quittant la route où elle surplombait le précipice. Au reste, la contingence est toujours affirmée d'une manière gratuite, parce qu'elle n'est ni démontrable, ni prouvable. Elle contrevient au principe de non-contradiction, puisqu'elle suppose que la même réalité peut aussi bien être ceci ou cela : or, toute démonstration repose sur ce principe. D'autre part, on ne peut non plus prouver qu'une expérience échappe à déterminisme ; si une formule n'en rend pas compte, on a toujours le droit d'admettre qu'une autre l'expliquera, donc la soumettra à une loi.

La seconde proposition n'est pas moins indéfendable. Sans doute la spéculation du physicien est de la réflexion. Le savant le plus génial ne peut s'évader de sa pensée, pas plus qu'on ne peut sauter hors des muscles. Sa conscience pénètre plus profondément le réel que le commun des mortels ne l'a fait jusqu'à lui ; pour autant, elle ne se confond pas avec ce réel, sinon elle atteindrait l'absolu, et il n'y aurait plus de science à poursuivre ; en même temps, d'ailleurs, elle cesserait d'être consciente.

Et surtout la réflexion du physicien se différencie de la spéculation purement mathématique qui échafaude des systèmes possibles à la seule condition de respecter le principe de non-contradiction. Elle, elle ne repart jamais de zéro, car elle est lestée du monde déjà connu. Il lui est demandé seulement d'en accuser l'analyse, d'en obtenir une discrimination qui le découvre davantage. «L'invariant d'univers» d'Einstein ne supprime pas l'équation de Newton, comme l'éponge efface une figure sur le tableau noir. En quoi qu'il la dépasse, et même s'il représente tout autrement les mouvements des astres, il en implique les révélations. La physique est bien, certes, une création, mais une création continuée, en un autre sens d'ailleurs que celui que Descartes donne à cette expression.

Les preuves expérimentales l'arrachent encore à l'ambiance exclusivement mathématique en ce qu'elles exigent des instruments. Certes, l'hypothèse proposée peut fonder une nouvelle explication de ces instruments eux-mêmes ; et sans doute est-ce à cela que Bohr et Heisenberg se réfèrent quand ils assurent que c'est aux résultats du calcul de conférer un sens aux données des expériences. Mais les équations utilisées pour le calcul n'en doivent pas moins être lestées d'avance de la matérialité des facteurs mis en jeu, y compris les instruments. Elles viennent les éclairer davantage, et non pas les faire passer du néant à l'être.

On peut maintenant élever le débat. En somme, Bohr et Heisenberg ont repris une double erreur de Platon. Lui aussi admettait que la matière de ce monde sublunaire ne se plie pas complètement aux Formes Idéales, c'est-à-dire, comme l'a vu Natorp, aux constantes du déterminisme. Et il lui attribuait une part de non-être, autrement dit de contingence. Comme eux, il stoppait à cette échelle la recherche scientifique.

Combien Descartes avait plus raison quand il posait que la matière est intelligible jusqu'en son tréfonds ! Son seul tort fut d'admettre des «natures simples», de minimiser sur ce point la capacité créatrice de l'intelligence. Mais il avait, d'autre part, forgé une géométrie analytique, employé ainsi l'algèbre d'une manière qui permit à des Riemann, à des Einstein de rompre avec ces notions prétendument innées pour en concevoir d'autres susceptibles d'analyser toujours davantage le réel.

Telles sont, M. Louis de Broglie, quelques-unes des raisons pour lesquelles les philosophes, non moins que les savants, se réjouissent d'apprendre que vous avez fermé les oreilles au chant des sirènes du probabilisme contingentiste. Vos recherches ont repris la fécondité dont vous avez déjà si glorieusement illustré le pays de Descartes.

**M. Bachelard.** – Vous prenez des exemples qui engagent le problème de la probabilité. le problème de la probabilité est entré maintenant dans une voie extraordinairement difficile, et je crois que M. Bauer, qui demande la parole, pourra rester précisément dans le sujet qui a été développé. Il faut naturellement que les philosophes écoutent ici la philosophie telle que la Science la présente; et non pas prendre les problèmes depuis leur origine. M. Bauer, à vous de parler.

**M. Bauer.** – Je voudrais d'abord dire que je suis avec beaucoup d'intérêt depuis deux ans les travaux de M. Louis de Broglie et de ses élèves, en particulier Vigier. D'ailleurs, comme beaucoup de physiciens, j'ai éprouvé les mêmes inquiétudes que lui depuis vingt-cinq ou trente ans, et nous avons tous cherché. Peut-être qu'une des raisons pour lesquelles la théorie des quanta a été un peu en retard en France dans les premières années, jusqu'aux travaux de Louis de Broglie, c'est qu'elle était trop peu logique pour notre goût cartésien. Cependant, je voudrais faire quelques observations et poser une question à Louis de Broglie. Il y a d'abord un mot que vous employez souvent, en particulier quand vous parlez de vos ondes  $u$  : vous parlez de réalité physique ; le mot de réalité physique doit avoir, ici, un sens particulier. Si vous voulez, c'est un problème philosophique, que je ne résoudrai pas, mais je vous pose la question : que faut-il entendre par réalité physique ?

**M. de Broglie.** – Je vous dirai que l'onde  $u$  est quelque chose qui est indépendant de l'observateur, elle n'est pas comme l'onde  $\psi$ , qui varie avec une information. L'onde  $u$  serait un élément physique qui, en chaque point de l'espace-temps, serait représentée par une fonction de  $x, y, z, t$  peut-être complexe, mais bien déterminée.

**M. Bauer.** – Oui, mais alors, c'est une réalité physique d'une nature un peu spéciale. Vous avez dit, à un moment donné : cette réalité physique dépend de paramètres cachés, qui seront toujours inaccessibles à l'expérience. Or, une réalité physique qui est indépendante de l'expérience, ne peut tout de même pas être qualifiée de réalité physique... C'est là une différence de point de vue.

**M. de Broglie.** – On peut espérer qu'elle permettrait d'interpréter des phénomènes qui ne s'interpréteraient pas autrement.

**M. Bauer.** – Alors j'arrive à ma deuxième observation ; votre théorie est extrêmement intéressante, seulement nous ne pourrions y croire que lorsqu'elle nous apportera l'explication de phénomènes inexplicables, et surtout, comme votre hypothèse de la Mécanique ondulatoire qui a permis de prévoir la diffraction des ondes matérielles, la diffraction de l'électron, lorsqu'elle nous permettra

de prévoir des phénomènes nouveaux qui n'ont encore jamais été observés. Avant cela, il faut que nous soyons très prudents.

**M. de Broglie.** – Oui, naturellement ; seulement il reste, tout de même, la satisfaction de revenir à des conceptions respectant la validité du cadre de l'espace et du temps cartésiens, ce qui me paraît un progrès.

**M. Bauer.** – Si vous voulez, mais je suis peut-être un peu moins optimiste que vous, et je ferai ici une comparaison que je fais assez souvent et qui date d'il y a longtemps : lorsque Newton a développé sa théorie de la gravitation, les Cartésiens comme Huygens ont été très mécontents et n'y ont pas cru, ils ont cherché autre chose et, pendant deux siècles, on a cherché autre chose, mais sans résultat positif. Finalement, la théorie de Newton, qui était très peu satisfaisante à certains points de vue – son action instantanée à distance avait choqué les Cartésiens comme elle nous choque encore aujourd'hui – cette théorie a tenu, bien que le problème n'ait été résolu que vers 1915, lorsque Einstein a donné sa théorie de la gravitation. Mais alors, je pose la question suivante : si on avait proposé à Huygens le choix entre la théorie de Newton et la théorie d'Einstein qui suppose des concepts tellement nouveaux, comme l'espace-temps, je me demande si Huygens n'aurait pas préféré la théorie de Newton. Ce que je veux entendre par là, c'est que les concepts qui nous seront nécessaires pour résoudre les difficultés actuelles et pour calmer nos inquiétudes ne sont actuellement tellement étrangers, que nous ne pouvons même pas les imaginer, et que si on nous les proposait, nous ne les comprendrions même pas. C'est une simple comparaison que je fais, peut-être pour calmer l'enthousiasme de Vigier.

**M. de Broglie.** – Je comprends très bien que l'on puisse penser que nous ignorons énormément de choses. Je comprends très bien que des choses essentielles même nous échappent. Mais l'interprétation dont on s'est contenté jusqu'ici choque tellement notre conception de l'espace !

**M. Bauer.** – Cependant, il y a une différence essentielle entre le point de vue de la Mécanique ondulatoire et, par exemple, le point de vue d'Ostwald, qui niait l'existence des atomes. Ostwald disait : je ne crois pas aux atomes parce qu'on ne les a jamais vus et qu'on

ne les verra jamais. Pourquoi est qu'on ne les verrait jamais ? Il n'en savait rien. Actuellement, on les voit, on peut dire qu'on les voit. Mais dans la Mécanique ondulatoire actuelle, en ce qui concerne les paramètres cachés, il y a quelque chose tout de même un peu différent ; en particulier, pour la question de la position et de la vitesse des particules, c'est pour des raisons de principe que les deux grandeurs ne peuvent pas être mesurées simultanément. Par conséquent, l'opinion d'Ostwald était fondée sur des impressions vagues et des impossibilités analogues aux impossibilités dont avait parlé Auguste Comte autrefois, et qui n'étaient, au fond, fondées sur rien, tandis que les impossibilités de la Mécanique ondulatoire actuelle sont fondées sur les principes de la Mécanique ondulatoire elle-même. Par conséquent, il faudra modifier les principes. Si vous voulez, je crois que si vous poussez à bout votre théorie des ondes  $u$ , vous arriverez à des principes qui seront nécessairement différents du principe de la Mécanique ondulatoire.

**M. de Broglie.** – Je pense qu'à l'échelle atomique, la théorie des ondes  $u$  ne donnera rien de plus que la Mécanique ondulatoire habituelle. Mais il pourrait en être autrement à une échelle beaucoup plus petite, à l'échelle nucléaire, où les régions singulières des ondes  $u$  pourraient empiéter les unes sur les autres, et également dans le cas des particules d'énergies extrêmement grandes, car alors la correspondance entre l'onde  $u$  et l'onde  $\psi$  pourrait cesser d'être exacte. Dans ces cas, on pourrait peut-être observer des phénomènes non prévus par l'interprétation actuelle.

**M. Bauer.** – Il faut attendre pour être tout à fait sûr qu'on puisse les observer...

Une dernière question que je voudrais vous poser : une des difficultés de la théorie même de l'onde  $\psi$ , est l'expérience des trous de Young. Comment la résoudre ?

**M. de Broglie.** – J'ai trouvé récemment des raisons de penser que l'onde  $u$  a la structure suivante. Elle aurait, dans une très petite région de dimensions au plus égales à  $10^{-13}$  cm, des valeurs très élevées, mais en dehors de cette région, elle serait représentée par une fonction régulière qui serait simplement proportionnelle à l'onde  $\psi$  de la Mécanique ondulatoire usuelle. Ainsi, l'onde  $u$  serait pour ainsi dire formée d'une aiguille très haute, très étroite et en général mobile qui serait « greffée » sur une base semblable à

l'onde *psi* usuelle. Dans le cas des trous de Young, cette base serait l'onde lumineuse classique de Fresnel, mais en un point mobile se trouverait greffée sur l'onde cette aiguille qui est le «photon». la théorie montre alors que le mouvement du photon est bien tel qu'il explique l'apparition des franges d'interférences classiques dans l'expérience des trous de Young.

**M. Bauer.** – Par conséquent, il n'y a pas une déformation instantanée dans toute l'onde *u* ? Ce qu'il y a de très difficile dans ces ondes, c'est qu'elles se propagent avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. Est-ce qu'il n'y a pas des informations ?

**M. de Broglie.** – La singularité ne se déplacera avec une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide qu'en des régions très limitées de certains champs d'interférences. le mouvement local ne serait pas observable et ne pourrait pas servir de signal transportant de l'information.

**M. Ullmo.** – Si je me permets de prendre la parole dans un débat qui se place à un niveau si élevé, c'est en somme pour dire que l'objection que vient de faire M. Bauer me paraît, au contraire, être un encouragement à persévérer dans cette voie. Si vraiment Huygens n'a pas été capable à son époque de concilier sa théorie avec celle de Newton, le développement de la science a permis d'aboutir ultérieurement à cette conciliation. Justement, l'inconvénient de l'interprétation orthodoxe, c'est que, si l'affirmation d'une structure profonde sous-jacente à la fonction d'onde quantique constitue un chèque en blanc, selon l'expression de M. Pauli, tant que cette structure n'est pas découverte, on pourrait répondre en plaisanterie que l'interprétation orthodoxe constitue un chèque barré. Elle interrompt, en somme, les progrès de la science, puisqu'elle présente la mécanique quantique comme une théorie limite, au delà de laquelle il est impossible et inutile de chercher, et j'ai beaucoup aimé que vous insistiez sur la sorte de contradiction dans l'interprétation orthodoxe qui résultait de la démonstration de von Neumann, puisque, d'une part, cette démonstration voulait être strictement positiviste, conforme aux idées de Bohr, pour lesquelles la mesure joue un rôle fondamental, et, d'autre part, elle ne faisait pas intervenir les paramètres propres à l'instrument de mesure dans son raisonnement, et, sous ce rapport-là, je crois que l'apport le plus important de Bohm est justement



d'avoir montré de façon explicite qu'en introduisant ces paramètres nouveaux de l'instrument de mesure, on retrouve toutes les prévisions en probabilités de la mécanique quantique, tout en rejetant l'interprétation «purement probabiliste» orthodoxe : il a fourni ainsi un véritable *contre-exemple* pour le théorème de von Neumann.

**M. Bénézé.** – Je n'ai que deux mots à dire. L'un pour remercier M. de Broglie de son lumineux exposé sur les difficultés d'interprétation de la Mécanique ondulatoire, sur l'opposition qui le sépare à ce sujet de MM. Bohr et Heisenberg ; sous l'accord physique et mathématique, le conflit philosophique est patent. Le second propos est pour dire que ce conflit ne peut être arbitré dorénavant que par une critique philosophique de la connaissance. Comme l'a dit M. Bauer, la question est de savoir ce qu'on entend par réalité. Comme de l'aveu de tous, le noyau du réel est d'abord ce qui est perçu, une analyse préalable de la perception est indispensable pour accueillir et placer toutes les thèses scientifiques sur le réel. La claire et décisive conférence que nous venons d'entendre est, à cet égard, un très sérieux encouragement.

**M. Raymond Lenoir.** – Je me permets d'intervenir, si tout philosophe, nanti d'une formation historique et scientifique, exerce bien une fonction critique. À ce titre, je ne puis qu'exprimer mon accord avec M. Louis de Broglie. La double hypothèse évite à l'époque contemporaine les discussions et les polémiques empêchant de tenir d'emblée pour complémentaires tourbillons et attraction, analyse infinitésimale et calcul des fluxions.

Mais la considération que nous avons pour votre œuvre a été dite par notre Président, se faisant notre interprète à tous, d'une manière captieuse. Il nous enferme dans le labyrinthe du continu. Là réside le problème philosophique. Ce fut ma réponse à Langevin présentant, au Centre de Synthèse, les conclusions d'une semaine consacrée à la Relativité. Et vous-même précisiez, dès 1922, dans une note à l'Académie des Sciences, de manière simple et brève, comment les énergies lumineuses plaçaient le physicien devant le continu et le discontinu avec la seule ressource de l'hydrodynamique.

Or, dans le cours de ces dernières années, en milieux savants, au Centre de Synthèse, ici même, il a été discuté du déterminisme et de l'indétermination des faits microphysiques. Le titre même de

vosre communication le rappelle. Une confusion de termes s'est produite, sanctionnée par l'usage. Elle est condamnée d'avance de manière expresse, par Leibniz. Les *Essais de Théodicée* formulent : le raisonnement se fonde sur le principe de contradiction et sur le principe de *raison déterminante*. La détermination n'est pas la nécessité. «*Les lois de la nature qui règlent les mouvements ne sont ni tout à fait nécessaires, ni tout à fait arbitraires.*» La loi de continuité est le seul moyen d'obvier à cette lacune. Après Leibniz, Lagrange, Laplace, vous-même en avez fait un judicieux emploi.

Tous les membres de la Société française de Philosophie connaissent ces pages de Leibniz. Il devrait donc y avoir à semblable glissement de sens une raison historique. *L'Essai sur les fondements de nos connaissances* le provoque. Là où Leibniz se contente d'une science des possibles, Cournot entend obtenir, à défaut d'une science des existences, divine et visionnaire, une science des probables. Pour ce, en des pages qui évitent l'emploi des termes détermination et nécessité, Cournot, mathématicien et inspecteur général, substitue à raison déterminante le terme de *raison suffisante*, d'ailleurs leibnizien comme raison prévalente. Il reproche à Leibniz «d'avoir donné une forme négative à l'énoncé du principe de l'ordre et de la raison des choses». Et d'unir aussitôt ordre et hasard.

Cette rectification faite, il est exact que le développement formel, paramètres, matrices, confère au symbolisme physique un caractère concret. Et celui-ci est sans doute susceptible de comprendre les paramètres pythagoriciens développés par M. Raoul Ferrier dans *De Descartes à Ampère*.

Mais du clair-obscur surgit le partage des lumières et des ombres. Il concentre l'attention sur Planck. Il laisse dans l'obscurité Nernst. Entre 1941 et 1944, au cours de travaux sur les symbolisme de la table de Mendeleef, j'avais été frappé par le rapport numérique existant entre la constante de chaleur atomique de Dulong et Petit et la constante de Planck. Je vous en ai fait part. Vous m'avez fait l'honneur de me répondre en maintenant à chacun de ces résultats son orientation propre. par la suite, j'ai pu établir par quels travaux de quels physiciens une filiation existe entre des résultats dont Regnault va étendre la signification et le premier *Mémoire* de Planck qu'il ne m'a pas été possible de consulter. Il reste de cela que l'intérêt des physiciens s'est porté sur le mode lumineux de l'énergie et qu'il a été remis d'approfondir le mode thermique de l'énergie. Ce que Nernst a pu écrire sur la chimie, sur une

conception nouvelle de la thermodynamique, paralysée par des discussions stériles sur la dégradation de l'énergie, demeure fondamental si le passage de  $+1^\circ$  à  $-1^\circ$  Réaumur constitue bien, pour le théoricien du zéro absolu, un renversement des conditions électromagnétiques autorisant, si je puis dire, une psychodynamique.

Enfin, je serais heureux de tenir de vous si vous poursuiviez bien vos recherches et vos résultats dans la même direction qu'Einstein. Il présente aujourd'hui la théorie du  $G^\mu$ . En octobre 1949, au Congrès international de Philosophie scientifique à Paris, vous proposiez une «Conception nouvelle de l'interaction entre les particules chargées et le champ électromagnétique». L'hypothèse du champ soustractif corrélative de la singularité du champ gravitationnel restitue-t-elle leur cohérence, figurée par les réseaux, à l'onde *Psi* et à l'onde *u* ?

**M. Bachelard.** – M. Wahl a une question de philosophe ?

**M. Wahl.** – C'est plutôt une question de curieux. J'ai assisté à Genève à des controverses entre Bohr et Schrödinger qui m'ont très vivement intéressé, et je crois que sur plusieurs points vous seriez d'accord avec Schrödinger, mais vous avez vous-même noté que Schrödinger veut abandonner les particules et vous ne pensez pas qu'on puisse les abandonner. Pourrais-je vous demander de nous expliquer pourquoi vous refusez l'idée de Schrödinger qu'il faut abandonner les particules et que seules les ondes sont identifiables et non pas les particules ?

**M. de Broglie.** – Je crois que la vérité physique essentielle, ce sont les particules. C'est très difficile de supposer que ces particules n'aient pas de réalité. Les textes qui ont été publiés par Schrödinger à ce sujet, soit autrefois, soit plus récemment, je les ai étudiés avec soin et ils ne me donnent pas satisfaction. Je ne vois pas, là-dedans, la base d'une théorie interprétative. La théorie de l'onde *u* peut être attaquée de plusieurs façons ; elle soulève les difficultés mathématiques, mais enfin on voit comment elle pourrait arriver à rendre compte de tout ce qui est bien établi actuellement en Mécanique ondulatoire, tandis qu'avec les ondes toutes seules, je ne vois pas comment on arriverait à le faire.

**M. Destouches.** – M. Louis de Broglie, à la fin de sa conférence, a énoncé la question d'Einstein : une théorie quantique est-elle complète ou est-ce une théorie incomplète ? Cette question conduit à un premier problème : qu'entendons-nous par «réalité physique» ? C'est le point soulevé tout à l'heure par M. Bauer. Pour la plupart des physiciens, la réalité physique est ce qui est accessible à l'expérience, ce que nous obtenons par l'expérience ; cette conception est au fond la conception positiviste. Alors, avec ce sens donné au mot réalité, une théorie quantique est essentiellement incomplétable. Nous pourrions toujours ajouter des paramètres nouveaux, mais nous aurons toujours des complémentarités et l'indéterminisme, et nous n'arriverons pas à changer la structure de la théorie.

D'autre part, on constate qu'un certain nombre de phénomènes observables échappent aux théories quantiques actuelles. On est alors conduit à rechercher une théorie meilleure. Cette future théorie devra se raccorder avec les précédentes, par suite, en première approximation, elle sera équivalente à une théorie quantique actuelle et elle contiendra donc nécessairement des grandeurs non simultanément observables. Certains couples de grandeurs non simultanément mesurables dans les théories actuelles pourront éventuellement devenir mesurables dans certaines circonstances, mais il restera toujours des paramètres non simultanément observables si la théorie future se raccorde avec les théories actuelles ; par suite cette théorie aura encore même structure que les théories quantiques : indéterminisme et complémentarité.

On peut adopter un autre point de vue et dire : ce que j'appelle «réalité physique» n'est pas seulement ce qui est directement accessible à l'expérience, c'est une réalité physique comme celle du cartésien ou celle du philosophe réaliste ; une réalité qui existe indépendamment de nous, qui est là indépendamment de nos moyens d'expérience, et que nous découvrons peu à peu avec nos processus expérimentaux. Une telle réalité physique ne sera pour un positiviste qu'une réalité métaphysique, mais, à la suite de M. Louis de Broglie, nous pouvons admettre une telle conception. Alors, dans ce cas, j'ai montré qu'on peut transformer toute théorie mise sous forme quantique orthodoxe habituelle en une théorie réaliste déterministe en droit, mais ceci à une condition : ajouter des paramètres qui sont inaccessibles à l'expérience. Nous ne nous trouvons pas dans la même situation dans laquelle autrefois se

trouvait Ostwald qu'invoquait tout à l'heure M. Bauer ; il est nécessaire pour que la théorie soit cohérente qu'on ait introduit des paramètres inaccessibles à l'expérience, paramètres tels que si on les supposait mesurables ou ayant été mesurés, il en résulterait une contradiction au sein de la théorie ; cette conception comporte donc une espèce de désaccord entre l'observable et le rationnel. Inversement, comme M<sup>me</sup> Février l'a montré, si nous avons une théorie adéquate de cette forme réaliste, nous pouvons, en éliminant les éléments inaccessibles à l'expérience, la transformer en une théorie possédant la structure quantique habituelle. Ainsi, tout résultat physique obtenu avec l'une des conceptions pourra aussi bien être décrit avec l'autre conception. La description phénoméniste exclut les éléments métaphysiques, mais elle est indéterministe et contient des complémentarités ; la description réaliste est déterministe en droit, elle ne contient pas de complémentarités, mais elle contient des éléments inaccessibles en droit à l'expérience. On peut passer d'une description à l'autre, mais la notion de système physique n'est pas la même dans l'une et l'autre forme et c'est ce changement de la notion de système physique qui permet la traduction de l'une des descriptions dans l'autre.

De cette situation nouvelle de la physique théorique, il résulte, au point de vue philosophique, que nous nous trouvons ramenés à peu près à la situation d'autrefois, au temps de la physique classique : les conceptions physiques peuvent s'accorder avec la plupart des conceptions philosophiques. Au contraire, dans la situation où l'on accepte que le point de vue quantique orthodoxe, la conception philosophique réaliste est inacceptable de même que toute philosophie strictement déterministe, et l'on est conduit à bâtir une philosophie nouvelle. Ainsi, c que démontrent les dernières études, c'est que notre physique théorique peut être rendue indépendante des conceptions philosophiques de base ; que nous soyons réalistes, subjectivistes, idéalistes, positivistes, dans ces divers cas nous pouvons faire une théorie microphysique adéquate ; seulement les expressions de cette théorie varieront suivant la conception adoptée, mais on pourra les transformer l'une dans l'autre.

Ceci pourrait être rapproché d'un exemple qui se trouve dans Poincaré à propos du fondement de l'hydrodynamique : nous pouvons partir de l'hypothèse que la matière est continue et nous sommes conduits d'une certaine façon aux équations de l'hydrodynamique ; nous pouvons aussi partir de l'hypothèse

atomique et alors nous arriverons, en faisant des moyennes, aux mêmes équations. Poincaré en conclut à peu près ceci : il est métaphysique de dire que la matière est continue ou qu'elle est atomique, puisque les deux conceptions nous conduisent finalement aux mêmes équations. Cet exemple est différent de la situation actuelle, car on peut invoquer des faits prouvant le caractère atomique de la matière. Nous nous trouvons maintenant dans une situation qui, si elle est un peu analogue à celle de l'exemple précédent, présente la différence qu'il ne peut pas y avoir de fait invoqué pour rejeter l'une des conceptions en présence : si finalement, quelle que soit la conception philosophique de départ, nous avons le même contenu théorique, la forme théorique ne sera pas la même, la formulation sera différente selon la conception adoptée. Mais le résultat de physique théorique obtenu est indépendant de la conception métaphysique de départ. Par exemple, nous pourrions exprimer la Mécanique ondulatoire sous deux formes : la mécanique ondulatoire orthodoxe avec interprétation probabiliste, d'une part, la théorie de l'onde-pilote (réaliste), d'autre part.

Mais le but poursuivi par les physiciens n'est pas d'avoir une satisfaction métaphysique, c'est de fabriquer une nouvelle théorie physique qui donne plus de résultats que la théorie actuelle. La question est : pourrions-nous construire une théorie future meilleure ? Eh bien, cette théorie future, nous pourrions l'exprimer à notre choix, soit sous la forme réaliste, soit sous la forme orthodoxe quantique, et ces formes pourront être transformées l'une dans l'autre. Maintenant, il est possible que l'une des deux formes permette d'avoir plus facilement les équations fondamentales., que l'une des conceptions ait une plus grande valeur heuristique que l'autre. L'opinion de M. de Broglie est que nous trouverons plus facilement ces équations par la méthode réaliste, mais il faut attendre de les avoir obtenues pour savoir laquelle des deux méthodes se montrera fructueuse. Quelqu'un ayant une structure de pensée s'accordant mieux avec la forme phénoméniste pourrait aussi bien peut-être trouver ces équations.

**M. de Broglie.** – La conception subjectiviste, j'ai beaucoup de mal à l'admettre, parce qu'il me semble qu'elle voudrait dire que l'électron n'a pas de spin avant que l'homme n'apparaisse à la surface de la Terre ou même qu'il ait été capable de faire

de la microphysique. D'après Bohr, en effet, c'est uniquement l'observation qui crée la grandeur.

**M. Bauer.** – Je voudrais juste dire encore un mot à propos de ce qu'a dit M. Destouches. Il y a une différence tout de même. M. Destouches a rappelé les deux déductions possibles de l'hydrodynamique, l'une par des conceptions atomiques et l'autre en supposant les fluides continus. Mais il y a un phénomène que prévoit la conception atomique et que ne prévoient pas les fluides continus, ce sont les fluctuations, ces mouvements browniens que tout le monde observe maintenant au microscope, et alors ce sera exactement le cas pour les nouvelles théories. Les nouvelles théories, si elles sont fécondes, seront valables quand elles nous donneront des phénomènes nouveaux qui seront observables comme le mouvement brownien, et que ne prévoit pas la théorie orthodoxe.

**M. de Broglie.** – Je suis entièrement d'accord avec M. Bauer. Ce que dit Henri Poincaré est faux : la théorie a tranché en faveur de la théorie atomique.

**M. Destouches.** – Elle a tranché à condition de dépasser le stade de l'hydrodynamique.

**M. de Broglie.** – Oh ! bien sûr... après avoir dépassé l'état expérimental qui existait au moment où il écrivait.

**M. Destouches.** – Si nous avons une nouvelle théorie, celle-ci dépassera la théorie quantique actuelle, mais il n'est pas nécessaire qu'elle soit formulée d'une manière réaliste ; et je dis que si l'on parvient à formuler cette théorie d'une manière réaliste, on peut aussi formuler la même théorie en éliminant les éléments inaccessibles à l'expérience ; elle aura alors la même structure que la théorie quantique. Je ne veux pas du tout dire qu'au point de vue physique la conception réaliste n'ait aucun intérêt, mais dans la conception réaliste on admet l'existence d'une réalité objective, réalité profonde qui n'est pas accessible à la mesure en vertu des lois quantiques actuellement connues ; une telle intervention d'éléments inaccessibles à l'expérience est en opposition complète avec l'évolution de la physique depuis un siècle, où l'on a cherché sans cesse à écarter les éléments métaphysiques pour ne conserver

que les éléments positifs en relation avec l'expérience. Dans la conception phénoméniste qui est celle des théories quantiques usuelles on satisfait à cette exigence de positivité, on ne fait pas intervenir les propriétés d'une réalité, et l'on considère seulement les connaissances acquises par un observateur. Au point de vue philosophique, la différence entre les deux conceptions est très grande, mais au point de vue physique, elle est beaucoup plus faible, puisqu'une théorie construite suivant l'une de ces deux conceptions peut être transformée en une théorie construite suivant l'autre conception avec même contenu physique.

**M. André Metz.** – Je voudrais que les philosophes tirent une leçon du dernier revirement de la physique : il est vain pour le philosophe d'essayer de suivre et même de s'essouffler à suivre la Science. Depuis une vingtaine d'années, beaucoup de philosophes ont été tentés de la suivre de près, en disant : «Autrefois la Science était réaliste, elle était conforme aux schémas de Meyerson, mais nous avons changé tout cela...» Eh bien, je crois qu'il faut voir les choses d'un peu plus haut et dire, par exemple : le savant *recherche* l'explication, il *recherche* le déterminisme. Il est *heureux*, comme vous l'avez souligné, quand les progrès de la Science lui permettent de préciser un peu le déterminisme ; s'il n'y arrive pas, il est obligé de se contenter d'une théorie indéterministe, mais c'est toujours avec gêne qu'il y arrive, et je crois que le rôle du philosophe est de dire : la *tendance* de l'esprit est dans tel sens, c'est cela qui est intéressant.

En ce qui concerne la physique des quanta elle-même, je crois qu'il y a un malentendu dans les discussions entre l'indéterminisme et le déterminisme ; du côté indéterministe, en effet, on attache aux théories statistiques un caractère «adéquat» ; or, il est certain qu'avant la théorie des quanta, jamais on n'a considéré une théorie statistique comme «adéquate». Une théorie statistique était congénitalement, de par son essence, quelque chose de faux, mais qui pouvait donner une certaine approximation de la réalité à une certaine échelle. maintenant on nous affirme : «Voici une théorie statistique et elle est adéquate» ; eh bien, elle est adéquate jusqu'à une échelle, celle où nous constatons que l'expérience la vérifie, mais à l'échelle au-dessous, ce n'est pas vrai, car toute théorie statistique est fautive à partir d'une certaine limite.

**M. de Broglie.** – Je suis entièrement d'accord.



**M. Bachelard.** – Il me semble que nous avons déjà abusé de M. de Broglie. Alors, quelqu'un a-t-il quelque chose de décisif à lui demander ? Personne... Nous pouvons lever la séance.