PHYSIQUE THÉORIQUE. — *Sur les véritables idées de base de la Mécanique ondulatoire.* Note (*) de M. Louis de Broglie, Membre de l'Académie.

A l'occasion du cinquantième anniversaire de la découverte de la Mécanique ondulatoire, l'auteur rappelle les idées qui l'avaient guidé à cette époque et expose les raisons pour lesquelles il lui paraît aujourd'hui nécessaire de reprendre ces idées bien oubliées dans l'enseignement de l'actuelle Mécanique quantique.

J'ai exposé les premiers principes de la Mécanique ondulatoire dans trois Notes aux *Comptes rendus* en septembre-octobre 1923, puis d'une façon plus développée dans ma Thèse de Doctorat soutenue le 25 novembre 1924. Mon idée essentielle était d'étendre à toutes les particules la coexistence des ondes et des particules découverte par Einstein en 1905 dans le cas de la lumière et des photons. Conformément aux idées claires de la Physique classique, je cherchais à me représenter une onde physique réelle transportant de très petits objets localisés dans l'espace au cours du temps. Deux manières de le faire se sont alors présentées à mon esprit. La première, tout à fait oubliée aujourd'hui dans l'enseignement usuel et que je considère maintenant comme de beaucoup la plus profonde, se trouve esquissée dans une de mes Notes de 1923 et développée dans le premier chapitre de ma Thèse. Elle consistait à partir de la différence des transformations relativistes de la fréquence d'une onde et de la fréquence d'une horloge. Admettant que la particule possède une vibration interne qui permet de l'assimiler à une petite horloge, je supposais que cette horloge se déplaçait dans son onde de façon que sa vibration interne reste constamment en phase avec celle de l'onde : c'est le postulat de « l'accord des phases ». Ces hypothèses me paraissaient être rendues nécessaires par le fait que la relation $W = h\nu$, appliquée à la particule implique l'existence d'une fréquence ν intérieure à la particule, tandis que l'on sait depuis les travaux de Planck et d'Einstein que ν est aussi la fréquence de l'onde qui transporte la particule. Celle-ci apparaît alors comme incorporée dans l'onde où elle constitue une très petite région où l'amplitude est très grande. On peut en déduire la formule bien connue $p = h/\lambda$. Dans le second chapitre de ma Thèse, j'avais ensuite montré que, dans le cas où la propagation de l'onde s'effectue à l'approximation de l'optique géométrique, on est ainsi conduit à identifier le principe de Fermat avec le principe de moindre action de Maupertuis et à retrouver la formule $p = h/\lambda$.

Il convient de souligner les différences qui existent entre les deux modes de raisonnements que je viens de rappeler. Le premier, le postulat de la concordance des phases, est de nature essentiellement relativiste puisqu'il repose sur la différence entre deux formules de transformation relativiste, tandis que le second, l'identification des principes de Fermat et de Maupertuis n'a rien d'essentiellement relativiste puisque ces deux principes sont valables aussi bien en théorie classique et en théorie relativiste. La seconde différence entre les deux méthodes est que la première est valable pour toutes les propagations d'ondes tandis que la seconde n'a de sens que pour les propagations s'effectuant à l'approximation de l'optique géométrique.

Après ma Thèse, on a souvent interprété faussement mes idées en disant que, d'après moi, l'électron *était* une onde, ce qui escamotait la particule. C'est, semble-t-il, en adoptant cette idée que Schrödinger, en 1926, dans de très beaux travaux, a écrit le premier pour l'électron, mais seulement à l'approximation newtonienne et sans tenir compte du spin, l'équation de propagation d'une onde qu'il a nommée l'onde Ψ . Il a pu ainsi calculer exactement les processus ondulatoires qui correspondent aux états quantifiés d'un système atomique conçu à la manière classique depuis les travaux de Bohr et de ses continuateurs. Certainement Schrödinger pensait alors que son onde Ψ était une onde physique, mais il abandonnait toute idée de localisation de la particule dans l'onde de sorte qu'en réalité dans l'image qu'il se formait de l'atome et plus généralement des ondes Ψ il n'y avait plus de particules localisées. Ceci était très grave et rendait paradoxal l'emploi qu'il faisait de l'espace de configuration dans le cas des systèmes de particules. Peu après, Born a introduit la normalisation de l'onde Ψ qui, en modifiant arbitrairement l'amplitude de l'onde, lui enlève toute réalité physique. L'onde Ψ normalisée est ainsi transformée en une simple représentation de probabilités qui conduit à un très grand nombre de prévisions exactes, mais ne fournit aucune représentation compréhensible de la coexistence des ondes et des particules.

Les travaux de Schrödinger avaient eu le mérite de bien faire voir que la Mécanique ondulatoire, quand on l'applique aux systèmes atomiques, conduit à des problèmes où l'approximation de l'optique géométrique n'est plus valable. Il en résulte que le principe de Fermat n'est plus applicable et ne permet plus de définir un « rayon » assimilable à la trajectoire d'une particule. Si donc on se refuse à faire intervenir le postulat de l'accord des phases, l'on est amené à dire qu'il est impossible d'attribuer une trajectoire à la particule dans son onde et à affirmer qu'elle ne peut avoir que des localisations isolées *sans positions intermédiaires*. Mais une telle conception soulève de grandes difficultés et notamment celle qui fut signalée par Einstein au Conseil de Physique Solvay de 1927. On peut la résumer de la façon suivante : soit une source qui émet une onde sphérique transportant une particule. Un instant après, la particule manifeste sa présence en un point de l'onde sphérique par un effet localisé sur un détecteur. Il est évidemment certain que l'émission de la particule par la source est la *cause* de son arrivée sur le détecteur. Or, le lieu causal entre les deux phénomènes ne peut être établi que par l'existence d'une trajectoire et nier cette existence, c'est renoncer à la causalité, c'est se condamner à ne pas comprendre.

Faisons maintenant une remarque importante. Comme la normalisation, qui modifie arbitrairement l'amplitude de l'onde, ne modifie pas sa phase, la Mécanique quantique usuelle peut définir la même fréquence ν et la même longueur d'onde λ que ma théorie et c'est là ce qui lui permet d'être une théorie puissante conduisant à un très grand nombre de résultats exacts. Mais, contrairement à ce que l'on admet d'habitude, la Mécanique quantique n'a pas le droit de poser $W = h\nu$ et $p = h/\lambda$ parce que l'énergie W et la quantité de mouvement p d'une particule sont des grandeurs liées à la conception d'un objet localisé qui se déplace dans l'espace le long d'une trajectoire. Si j'ai pu autrefois établir ces formules, c'est que j'admettais que la particule est localisée dans son onde.

Appelé en 1928 à des fonctions d'enseignement, j'ai exposé les idées qui avaient prévalu en Mécanique quantique et pendant de longues années j'ai renoncé à développer mes idées primitives.

Mais depuis environ 20 ans j'ai été de nouveau convaincu qu'il fallait revenir à l'idée que la particule est un très petit objet localisé décrivant une trajectoire. Comme je l'ai montré dans toute une série de travaux de plus en plus approfondis ⁽¹⁾, c'est ce que permet de faire, tout en conservant la signification statistique de l'onde Ψ normée, ma conception du guidage de la particule par son onde quand on la complète par une Thermodynamique cachée dont le développement ouvre des perspectives très nouvelles. Une conséquence de cette thermodynamique me paraît très importante : le principe de moindre action ne serait qu'un aspect du second principe de la Thermodynamique ⁽²⁾.

Il est important de remarquer combien il est étonnant qu'en optique de la lumière et des particules, on puisse prévoir, avec une extrême précision, un nombre énorme de phénomènes en partant de propagations d'ondes sans faire nullement intervenir la structure corpusculaire, cependant certaine, de l'énergie qu'elles transportent. Dans le cas des phénomènes d'interférences et de diffraction, le postulat statistique de Born suffit à expliquer les phénomènes. Mais en théorie quantique usuelle, on admet arbitrairement ce postulat, tandis que je puis en donner une justification. Mais là où le postulat de l'accord des phases me semble fournir une explication que la théorie usuelle ne paraît pas pouvoir donner, c'est quand on considère l'action d'une onde hertzienne de fréquence ν sur un circuit oscillant ou un dispositif analogue accordé sur cette fréquence. Il est, en effet, naturel de penser que certains des photons apportés par l'onde cèdent leur énergie au circuit oscillant sous forme d'une brusque impulsion qui compense l'amortissement. Mais l'énergie ainsi apportée au circuit oscillant ne peut entretenir son oscillation régulière que si ces impulsions sont rythmées à la fréquence du circuit qui est celle de l'onde. Ceci me semble prouver que les photons incidents possèdent une fréquence d'oscillation interne égale à celle de l'onde et c'est bien ce qu'affirme le postulat de l'accord des phases, alors que la théorie usuelle ne peut introduire aucune idée analogue.

En conclusion, je pense que mes idées primitives, telles que je les ai reprises et développées dans ces dernières années, permettent de comprendre la véritable nature de la coexistence des ondes et des particules dont la Mécanique quantique usuelle et ses prolongements ne nous donnent qu'une vue statistique exacte sans nous en révéler la véritable nature. Le postulat de l'accord des phases nous apprend, en effet, qu'il existe une Dynamique corpusculaire ayant le caractère d'une Dynamique à *masse propre variable* qui est sous-jacente à toute propagation d'ondes, même quand celle-ci s'effectue en dehors de l'approximation de l'optique géométrique. Et je crois que c'est là ce que la Mécanique quantique actuelle n'a pas su voir.

Parvenu à un âge qui ne me permet plus d'espérer pouvoir continuer longtemps mes travaux personnels, je dois exprimer l'espoir que de jeunes chercheurs se consacrent à développer, dans le sens que j'ai indiqué dans ces dernières années, les idées qui ont permis, il y a un demi-siècle, la naissance en France de la Mécanique ondulatoire.

(*) Séance du 25 juin 1973.

⁽¹⁾ *La réinterprétation de la Mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris, 1971.

⁽²⁾ *La Thermodynamique de la particule isolée*, Gauthier-Villars, Paris, 1964.