

**LA RÉINTERPRÉTATION
DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE**

Tome 1

PRINCIPES GÉNÉRAUX

Louis de BROGLIE
et J. L. ANDRADE e SILVA

LA RÉINTERPRÉTATION
DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE

Tome 1
PRINCIPES GÉNÉRAUX

Par M. Louis de BROGLIE

ISBN :
N° CLASSEMENT :

GAUTHIER-VILLARS Éditeur
55, quai des Grands-Augustins, Paris-6^e
1971

© Gauthier-Villars, 1971.

La Loi du 11 Mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'Article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants-droit ou ayants-cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'Article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les Articles 425 et suivants du Code Pénal.

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage est divisé en deux tomes. Le présent premier tome, rédigé par moi-même, comprend un exposé de l'interprétation de la Mécanique ondulatoire par la Théorie de la double solution et par la Thermodynamique cachée des particules ainsi qu'un grand nombre d'applications de ces conceptions générales.

Le second tome, qui paraîtra ultérieurement, sera rédigé par M. Andrade e Silva et comprendra l'examen détaillé de questions qui n'ont pas été étudiées ou qui n'ont été qu'effleurées dans le présent volume.

Louis de BROGLIE.

CHAPITRE I

LES DÉBUTS DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE

1. **Naissance de la Mécanique ondulatoire.** — Je crois nécessaire de rappeler quelles sont les idées qui m'ont guidé à l'époque où j'ai posé les premiers principes de la Mécanique ondulatoire en 1923-1924 [1]. Je le crois nécessaire parce que ces idées ne sont jamais rappelées dans les exposés actuels de la Mécanique quantique.

Dans ma première jeunesse, entre 1911 et 1919, j'avais étudié avec un grand enthousiasme tous les récents résultats de la Physique théorique de cette époque. Les travaux de Poincaré, de Lorentz, de Langevin, ... sur la théorie électromagnétique m'étaient familiers ainsi que ceux de Boltzmann et de Gibbs sur la Mécanique statistique. Mais mon attention avait été particulièrement retenue par les travaux de Planck, d'Einstein et de Bohr sur les quanta et je voyais dans la coexistence des ondes et des particules dans les rayonnements découverte par Einstein en 1905 dans sa théorie des quanta de lumière un fait fondamental dont il importait de préciser la véritable nature.

Ayant suivi les travaux que mon frère Maurice poursuivait sur les spectres de rayons X, je voyais toute l'importance dans ce domaine du double aspect des radiations électromagnétiques et, ayant étudié en Mécanique la théorie d'Hamilton-Jacobi, j'y voyais une sorte de préfiguration d'une théorie synthétique de l'union des ondes et des particules. Enfin, j'avais aussi beaucoup étudié la théorie de la Relativité et j'étais persuadé qu'elle devait être à la base de toutes les tentatives théoriques nouvelles.

Tel était mon état d'esprit quand en 1919, libéré des obligations militaires que m'avait imposées la guerre de 1914-1918, je me suis remis à faire des recherches personnelles. Ayant une conception très « réaliste » de la nature du monde physique et peu porté aux considérations purement abstraites, je voulais me représenter l'union des ondes et des particules d'une façon concrète, la particule étant un petit objet localisé incorporé dans la structure d'une onde en propagation. Naturellement j'avais commencé par étudier le cas de la lumière et des autres rayonnements électromagnétiques où je cherchais à me représenter la particule que l'on appelle aujourd'hui « photon » comme transportée par l'onde électromagnétique. Puis soudain me vint, en 1923, l'idée que la coexistence des ondes et des particules n'existait pas seulement dans le cas étudié par Einstein et qu'elle devait être généralisée pour toutes les particules. Appliquée à l'électron, elle me paraissait devoir expliquer les propriétés étranges des mouvements d'un électron dans un atome décou-

vertes par Bohr dans sa théorie des états stationnaires des atomes. Dans la théorie atomique de Bohr, on voit en effet apparaître des nombres entiers, ce qui est courant dans la théorie des ondes quand on étudie les phénomènes de résonance ou d'interférences.

Mais je dois insister tout particulièrement ici sur une idée qui m'a constamment guidé à cette époque et qui n'est jamais rappelée aujourd'hui. Comme je l'ai dit, j'étais convaincu qu'il fallait prendre constamment comme base des développements théoriques les idées de la théorie de la Relativité. Guidé par les beaux exposés de Paul Langevin au Collège de France, j'ai donc bien étudié les propriétés de la représentation relativiste d'une onde en propagation. D'autre part, m'inspirant d'une des idées fondamentales de la théorie des quanta, j'ai été amené à définir une fréquence propre interne ν_0 de la particule reliée à l'énergie de masse propre $m_0 c^2$ par la relation $h\nu_0 = m_0 c^2$. Cela m'amenait donc à considérer la particule comme une petite horloge en mouvement. Je fus alors très frappé du fait que la formule de transformation d'une onde

lors d'une transformation de Lorentz est $\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

alors que la formule de transformation de la fréquence d'une horloge, traduisant le célèbre « ralentissement » des horloges en mouvement, est $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$. Intrigué par cette différence, je me suis demandé comment une particule assimilée à une petite horloge devait se déplacer dans son onde de façon à rester en quelque sorte incorporée à l'onde, c'est-à-dire de

façon que sa phase interne reste constamment égale à celle de l'onde. Appliquant cette image au cas simple, bien qu'un peu trop schématique, d'une onde plane monochromatique se propageant le long de l'axe des x , j'étais amené à écrire pour la variation $d\varphi$ de la phase de cette onde

$$(1) \quad d\varphi = 2\pi \left(\nu dt - \frac{dx}{\lambda} \right) = 2\pi \left(\frac{\nu_0}{\sqrt{1-\beta^2}} dt - \frac{dx}{\lambda} \right) \\ = \frac{2\pi}{h} \left(\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} dt - h \frac{dx}{\lambda} \right)$$

et pour la variation dans l'intervalle de temps dt de la phase interne de la particule se déplaçant le long de l'axe des x avec la vitesse ν

$$(2) \quad d\varphi_i = 2\pi \nu_0 \sqrt{1-\beta^2} dt = \frac{2\pi}{h} m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2} dt.$$

En écrivant que $d\varphi = d\varphi_i$ avec $dx = \nu dt$, on obtient

$$(3) \quad \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2} = \frac{m_0 \nu^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{h\nu}{\lambda},$$

d'où pour la quantité de mouvement p de la particule

$$(4) \quad p = \frac{m_0 \nu}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{h}{\lambda}.$$

On a ainsi trouvé les deux relations fondamentales de la Mécanique ondulatoire $W = h\nu$, $p = \frac{h}{\lambda}$ en leur

associant l'image d'un corpuscule localisé qui se déplace dans l'onde le long d'un de ses rayons en restant constamment en phase avec elle. Telle était l'image concrète que j'avais dans l'esprit quand j'ai eu la première idée de la Mécanique ondulatoire. Peut-être ne l'ai-je pas assez explicitée dans ma Thèse, mais je puis affirmer que c'est elle qui me guidait.

Dans mes Notes de l'automne 1923 et dans ma Thèse de 1924, j'ai pu donner une première interprétation des conditions de quanta utilisées dans la théorie de l'atome de Bohr en admettant que la propagation de l'onde dans l'atome se fait à l'approximation de l'Optique géométrique, ce qui n'est pas exact, mais qui fournit cependant une première et très frappante interprétation de ces conditions de quanta.

Beaucoup d'autres considérations intéressantes se trouvaient esquissées dans ma thèse, notamment en ce qui concerne l'identité résultant de mes conceptions entre le principe de Fermat et le principe de moindre action de Maupertuis. J'y donnais aussi une première esquisse de ce qu'on nomme aujourd'hui la statistique de Bose-Einstein et j'introduisais, pour faire rentrer la théorie du photon dans le cadre de la Mécanique ondulatoire générale des particules, l'hypothèse que la masse propre du photon, bien que certainement extraordinairement petite, n'est pas rigoureusement nulle. C'est là une hypothèse que j'ai constamment introduite ensuite dans tous mes travaux sur la théorie quantique de la lumière.

2. **Les travaux de Schrödinger. La découverte de la diffraction des électrons.** — Je réfléchissais à la manière de préciser et de généraliser mes conceptions quand j'ai eu connaissance, au début de 1926, des beaux mémoires publiés par Erwin Schrödinger dans les *Annalen der Physik*. Schrödinger, s'inspirant des résultats de ma thèse et de la théorie d'Hamilton-Jacobi, écrivait sous une forme correcte, mais non relativiste (newtonienne), l'équation des ondes de la Mécanique ondulatoire qu'il désignait par le symbole Ψ qui a fait fortune. Reprenant d'une façon rigoureuse, c'est-à-dire sans supposer valable l'approximation de l'optique géométrique, le calcul de la propagation de l'onde dans l'atome de Bohr, il retrouvait en les rectifiant les résultats de ma thèse. Puis, grâce à une transposition vraiment remarquable, il montrait que la détermination des énergies quantifiées par sa méthode de calcul des valeurs propres de l'équation d'ondes donnait exactement les mêmes résultats numériques que la méthode beaucoup plus abstraite développée un an auparavant par Werner Heisenberg dans sa Mécanique des Matrices.

Enfin Schrödinger abordait le problème de la Mécanique ondulatoire des ensembles de particules en interaction en écrivant une équation d'ondes dans l'espace de configuration formée par les coordonnées de toutes les particules du système. Le caractère abstrait de cette méthode de calcul est évident car l'onde Ψ de l'espace de configuration ne peut pas être considérée comme une onde réelle se propageant dans l'espace physique.

Et cependant cette méthode abstraite se montrait rapidement très puissante et donnait bientôt des résultats très exacts et d'un très haut intérêt.

J'ai lu à cette époque les mémoires de Schrödinger avec la plus vive admiration en réfléchissant beaucoup sur leur contenu. Sur trois points cependant, je ne me sentais pas d'accord avec l'éminent physicien autrichien. D'abord l'équation d'ondes qu'il attribuait à l'onde Ψ n'était pas relativiste et j'étais trop convaincu de la liaison étroite existant entre la théorie de la Relativité et la Mécanique ondulatoire pour pouvoir me contenter d'une équation d'ondes non relativiste; mais cette difficulté fut vite levée car, dès juillet 1926, plusieurs auteurs, dont moi-même, ont trouvé une forme de l'équation d'ondes, connue aujourd'hui sous le nom d'équation de Klein-Gordon, dont l'équation de Schrödinger est la forme dégénérée à l'approximation newtonienne. Un autre point où mes vues ne s'accordaient pas avec celles de Schrödinger était que celui-ci, tout en conservant l'idée que l'onde Ψ dans l'espace physique est une onde réelle, semblait abandonner complètement l'idée de la localisation de la particule dans l'onde, ce qui ne concordait pas avec mes conceptions primitives. Enfin, tout en reconnaissant que la considération d'une onde Ψ dans l'espace de configuration constituait un formalisme très utile pour la prévision des propriétés d'un ensemble de particules en interaction, je considérais comme certain que le mouvement des diverses particules et la propagation de leurs ondes s'opéraient dans l'espace physique au cours du temps.

Tandis que je réfléchissais à la manière de développer mes propres conceptions en tenant compte de ce qu'il y avait d'indiscutable dans les résultats de Schrödinger, j'eus connaissance au printemps de 1927 de la sensationnelle découverte des phénomènes de diffraction des électrons faite aux États-Unis par Davisson et Germer. Bientôt répétées sous des formes diverses par G. P. Thomson en Angleterre, par Maurice Ponte en France, par d'autres encore dans divers pays, ces expériences ont permis de vérifier la formule que j'avais donnée pour relier la longueur d'onde de l'onde d'un électron à la valeur de sa quantité de mouvement et ont ainsi apporté aux idées de base de la Mécanique ondulatoire une complète confirmation. L'on a pu ensuite observer la diffraction d'autres particules telles que neutrons et protons, puis répéter avec des électrons toutes les expériences depuis longtemps classiques pour la lumière.

3. La théorie de la double solution et le Conseil Solvay de 1927. — Au printemps de 1927, les travaux de Schrödinger et la découverte de la diffraction des électrons paraissaient donc avoir apporté une confirmation complète des idées contenues dans ma thèse et cependant la plupart des théoriciens commençaient à s'orienter vers des conceptions tout à fait différentes de celles qui m'avaient dirigé. Schrödinger abandonnait l'idée de corpuscule localisé et ne maintenait que partiellement le caractère de réalité physique de l'onde. Allant plus loin, Max Born dans un important mémoire où il

traitait le problème des collisions dans la nouvelle Mécanique ne considérait plus l'onde Ψ que comme une représentation de probabilités et admettait qu'elle pouvait être arbitrairement « normée » : cela enlevait à l'onde Ψ le caractère essentiel d'une onde physique qui est d'avoir une amplitude bien déterminée.

Inquiet de voir ainsi disparaître entièrement l'image physique claire et concrète qui avait guidé mes premières recherches, j'ai fait alors un effort pour préciser mon point de vue et j'ai publié en mai 1927 un article dans le *Journal de Physique* sous le titre : *La Mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement* [2]. Dans cet article, intéressant à relire aujourd'hui, je commençais par définir très clairement le but que je poursuivais, puis j'introduisais, sous le nom de « théorie de la double solution », l'idée qu'il fallait distinguer *deux* solutions distinctes, mais intimement reliées de l'équation des ondes, l'une que j'appelais l'onde u étant une onde physique réelle et non normable comportant un accident local définissant la particule et représenté par une singularité, l'autre, l'onde Ψ de Schrödinger, normable et dépourvue de singularité, qui ne serait qu'une représentation de probabilités. Cela m'amenait à généraliser les formules que j'avais données dans ma thèse pour l'onde plane monochromatique au cas d'une solution quelconque de l'équation des ondes et à exprimer le mouvement de la particule dans son onde à l'aide d'une « formule du guidage » précisant la façon dont ce mouvement est guidé par la propagation de l'onde. J'étais ainsi

amené à envisager que le mouvement de la particule dans son onde s'effectue sous l'action d'une force dérivant d'un « potentiel quantique » proportionnel au carré de la constante de Planck, potentiel quantique qui dépend des dérivées secondes de l'amplitude de l'onde et qui est nul dans le cas de l'onde plane monochromatique. Je remarquais que le potentiel quantique peut s'exprimer par les variations de la masse propre de la particule, résultat dont j'ai mieux compris récemment toute l'importance, et qu'il apparaissait notamment dans ce que j'appelais les « états contraints » où la libre propagation de l'onde se trouve entravée par l'existence de conditions aux limites. J'esquissais aussi, d'ailleurs d'une façon très incomplète, la manière dont on pouvait chercher à justifier l'emploi par Schrödinger d'une onde statistique Ψ définie dans l'espace de configuration d'un ensemble de particules.

J'étais très satisfait des résultats que j'avais ainsi obtenus car ils me paraissaient ouvrir la voie qui devait conduire à la véritable interprétation de la Mécanique ondulatoire, compte tenu des résultats de Schrödinger et du succès de l'interprétation statistique de l'onde Ψ . Et aujourd'hui je crois à nouveau que j'avais raison. Je me rendais bien compte d'ailleurs que mon article ne constituait qu'une première esquisse destinée à subir bien des modifications et des améliorations, mais j'espérais qu'on m'aiderait dans cette tâche.

Au début de l'été 1927, je fus invité par Lorentz à prendre part au Conseil de Physique Solvay qui se

tint à Bruxelles en octobre 1927. J'y ai fait un exposé de ma théorie de la double solution, malheureusement sous la forme un peu trop simplifiée de « l'onde pilote ». Elle ne retint guère l'attention. Les physiciens habitués aux anciennes méthodes comme Planck, Lorentz, Langevin souhaitaient une interprétation de la Mécanique ondulatoire voisine des conceptions classiques, mais ne se prononçaient par sur sa nature. Schrödinger restait fidèle à une interprétation purement ondulatoire. Seul Einstein m'encourageait un peu dans la voie où je voulais m'engager [3]. Mais je trouvais en face de moi des adversaires redoutables. C'était Niels Bohr et Max Born, savants déjà illustres, c'était aussi le groupe de jeunes chercheurs qui formaient l'École de Copenhague parmi lesquels se trouvaient notamment Pauli, Heisenberg et Dirac, déjà auteurs de travaux remarquables. Ils interprétaient la dualité des apparences corpusculaires et ondulatoires par la théorie de la complémentarité récemment proposée par Bohr et, n'attribuant plus à l'onde Ψ arbitrairement normée de Schrödinger que le rôle d'une représentation de probabilité permettant de prévoir le résultat de certaines observations, ils en arrivaient à abandonner toute image claire de l'onde et de la particule. J'étais assez décontenancé. Je trouvais la complémentarité de Bohr assez obscure et je ne pouvais me résoudre à abandonner les images physiques qui m'avaient guidé depuis plusieurs années. Mais, développée par de nombreux chercheurs jeunes et ardents qui possédaient une grande habileté dans les calculs

mathématiques, l'interprétation probabiliste de la « Mécanique quantique » prit rapidement la forme de formalismes mathématiques élégants et rigoureux.

Revenu à Paris après le Conseil Solvay, je suis resté plusieurs mois hésitant entre la poursuite de mes idées primitives et le ralliement aux conceptions de l'École de Copenhague. Mais nommé à la fin de 1928 Professeur de Physique théorique à la Faculté des Sciences de Paris, poste que j'ai ensuite occupé pendant 34 ans, et ne pouvant enseigner une interprétation théorique qui n'avait pas encore pris une forme vraiment satisfaisante, je me décidais à exposer à mes élèves ce qui commençait à être enseigné partout ailleurs et je renonçais à progresser davantage dans la voie difficile où j'avais voulu m'engager. Cela m'a permis de faire pendant plus de vingt ans des exposés très étendus et des travaux approfondis sur l'ensemble de la Physique quantique comme on l'exposait alors. Je n'ai cependant jamais perdu entièrement de vue mes conceptions primitives et l'on en retrouve toujours des traces dans la façon dont j'introduisais les bases de la Mécanique ondulatoire en évitant de leur donner une forme trop abstraite et axiomatique.

4. Retour à des idées primitives depuis 1951. — A partir de 1951, un revirement complet s'est opéré dans mon esprit en ce qui concerne l'interprétation de la Mécanique ondulatoire et je suis revenu aux idées qui avaient orienté mes travaux à l'époque où j'avais

cherché à obtenir une image claire de la coexistence des ondes et des particules.

Ce revirement imprévu a eu certainement pour origine des études que j'ai poursuivies dans la période 1948-1952. J'avais d'abord fait des cours sur l'interprétation statistique de la Thermodynamique en insistant sur l'introduction dans cette théorie des conceptions relativistes. Je me suis alors aperçu qu'il existait une curieuse analogie entre la formule de transformation relativiste de la chaleur et la formule de transformation relativiste de la fréquence d'une horloge qui avait joué un si grand rôle dans mes réflexions au moment de ma Thèse de Doctorat. Et je fus aussi très frappé par l'analogie, déjà vaguement pressentie autrefois par Eddington, entre les deux invariants relativistes que sont l'action et l'entropie. J'étais ainsi ramené aux idées qui m'avaient guidé lors de la découverte de la Mécanique ondulatoire et l'on verra plus loin le rôle important qu'ont joué ces analogies thermodynamiques dans mes récents travaux.

Dans les années suivantes, j'ai consacré deux cours à exposer l'interprétation de la Mécanique quantique par l'École de Copenhague et les controverses qui avaient eu lieu à ce sujet, une quinzaine d'années auparavant, entre Niels Bohr d'une part, Einstein et Schrödinger d'autre part. Au fur et à mesure que j'avançais dans la rédaction de ces cours, je sentais mes idées se modifier. Ma confiance dans l'interprétation généralement adoptée était ébranlée et je me demandais si je ne devais pas reprendre mon ancienne

tentative d'interprétation de la Mécanique ondulatoire par la théorie de la double solution. C'est alors que j'ai eu connaissance d'un article de M. David Bohm dans la *Physical Review* où il reprenait la plupart des idées contenues dans mon article du *Journal de Physique* de 1927. Je me décidai alors à reprendre le développement de mon ancienne tentative.

Ayant à cette époque beaucoup d'obligations universitaires ou autres et n'ayant pu trouver qu'un très petit nombre de jeunes chercheurs pour m'aider, j'ai d'abord progressé très lentement dans l'œuvre de critique et de réinterprétation dans laquelle je m'engageais. Mais depuis quelques années, il m'a été possible de donner à la théorie de la double solution une forme plus élaborée et de la compléter par une Thermodynamique cachée des particules qui m'apparaît aujourd'hui comme ouvrant de vastes perspectives nouvelles.

Après ce premier chapitre qui constitue une sorte d'introduction, je vais dans les chapitres suivants de cette première partie du livre exposer les principes généraux de ma théorie dans son état actuel. La seconde partie de l'ouvrage, rédigée par mon principal collaborateur, M. Andrade e Silva, sera consacrée à l'examen d'un certain nombre de problèmes particuliers qui ont une grande importance dans le cadre de la tentative que nous poursuivons.