

TRAITÉ DE PHYSIQUE THÉORIQUE ET DE PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

OUVRAGES RÉUNIS PAR JEAN-LOUIS DESTOUCHES

- I. DESTOUCHES (JEAN-LOUIS), Professeur à la Sorbonne. — *Méthodologie. Notions géométriques*. XIV-228 pages; 1953.
- II. DESTOUCHES (JEAN-LOUIS), Professeur à la Sorbonne. — *Mécanique newtonienne (sous presse)*.
- III. BROGLIE (LOUIS DE), Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, Professeur à la Sorbonne. — *Éléments de théorie des quanta et de Mécanique ondulatoire*. 302 pages, 31 figures; 1959.
- IV. DEQUOY (N.), Ancienne élève de l'École Normale Supérieure de jeunes filles de Sèvres. — *Mécanique à l'usage des classes de Mathématiques élémentaires*. XII-195 pages; 1954.
- V. MERCIER (A.), Professeur à l'Université de Berne. — *Principes de Mécanique analytique*. XI-151 pages, 6 figures; 1955.
- VI. DAUDEL (RAYMOND), Secrétaire général du Centre de Chimie Théorique de France, Chargé de cours à la Sorbonne. — *Les Fondements de la Chimie Théorique, Mécanique ondulatoire appliquée à l'étude des atomes et des molécules*. Préface de M. Louis de Broglie. X-236 pages, 40 figures; 1956.
- VII. MERCIER (J.), Doyen honoraire et Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux. — *Thermodynamique à l'usage de l'Enseignement supérieur et des Écoles d'Ingénieurs*. VIII-618 pages; 1957.
- VIII. PARODI (MAURICE), Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'École Centrale des Arts et Manufactures. — *Introduction à l'étude de l'Analyse symbolique*, 248 pages, 49 figures; 1957.
- IX. CAZIN (M.), Professeur à l'École Centrale et DEQUOY (N.). — *Cours de Mécanique pour les classes de préparation aux Grandes Écoles* (nouveau programme). Préface de J. L. Destouches. XI-200 pages, 25 figures; 1958.
- X. CAZIN (M.). — *Exercices de Mécanique pour les classes de préparation aux Grandes Écoles* (nouveau programme). 70 pages, 28 figures; 1959.
- XI. TONNELAT (M. A.). — *Les théories unitaires et leurs applications à la Physique (sous presse)*.
- XII. PARODI (MAURICE). — Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'École Centrale des Arts et Manufactures. — *La localisation des valeurs caractéristiques des matrices et ses applications*. Préface de M. H. Villat. 172 pages, 15 figures; 1959.
- XIII. JANCEL (R.). — *Les fondements de la Mécanique statistique classique et quantique*. Préface de M. L. de Broglie. XXVI-304 pages, 3 figures; 1962.

TRAITÉ DE PHYSIQUE THÉORIQUE ET DE PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

OUVRAGES RÉUNIS PAR JEAN-LOUIS DESTOUCHES

(suite)

- XIV. DAUDEL (RAYMOND), Secrétaire général du Centre de Chimie Théorique de France, Chargé de cours à la Sorbonne. — *Structure électronique des molécules*. 283 pages, nombreuses figures; 1962.
- XV. PARODI (MAURICE), Professeur au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'École des Arts et Manufactures. — *Application de l'algèbre moderne à quelques problèmes de Physique classique*. VIII-350 pages, 90 figures; 1962.
- XVI. VISCONTI (A). — Professeur à l'Université d'Aix-Marseille. — *Théorie quantique des Champs (Traité de Physique Théorique et de Physique mathématique)*.
TOME I : *Formalisme hamiltonien. Champs libres*; XIX - 299 pages, 16 figures; 1961.
- XVII. TOME II : (sous presse).
- XVIII. DESTOUCHES (JEAN-LOUIS), Professeur à la Sorbonne. — *Qu'est-ce que la Physique mathématique (sous presse)*.
- XIX. DESTOUCHES (J.-L.) - AESCHLIMANN, *Problèmes de Physique mathématique moderne (sous presse)*.
- XX. BODIOU (G.) *Théorie des probabilités englobant leurs calculs classique et quantique (sous presse)*.
- XXI. BROGLIE (LOUIS DE), Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences. — *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique ondulatoire (sous presse)*.
-

ÉTUDE CRITIQUE
DES BASES DE L'INTERPRÉTATION ACTUELLE
DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

- La Physique quantique restera-t-elle indéterministe ?** suivi d'une contribution de M. Jean-Pierre Vigiér. (*Les Grands Problèmes des Sciences*, Fasc. I.) In-8 (16-25), VII-113 pages, 4 figures; 1953.
- Mécanique ondulatoire du photon et Théorie quantique des champs.** 2^e édition revue et corrigée. In-8 (16-25), 208 pages; 1957.
- Éléments de théorie des Quanta et de Mécanique ondulatoire.** (*Traité de Physique théorique et de Physique mathématique*. Fascicule III.) 2^e édition revue et corrigée. In-8 (16-25), 302 pages, 31 figures; 1959.
- La Mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules.** (*Collection de Physique mathématique*, Fascicule V.) 2^e édition. In-8 (16-25), VI-224 pages; 1950.
- Théorie générale des particules à spin. Méthode de fusion.** 2^e édition revue et corrigée. In-8 (16-25), VI-210 pages, 7 figures; 1954.
- La théorie des particules de spin 1/2 (Électrons de Dirac).** In-8 (16-25), 164 pages; 1952.
- Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la Mécanique ondulatoire.** (*La théorie de la double solution.*) In-8 (16-25), VII-297 pages, 20 figures; 1956.
- La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire.** (*Interprétation usuelle et Interprétation causale.*) (*Les grands problèmes des Sciences*, Fascicule VII.) In-8 (16-25), VI-130 pages, 7 figures; 1957.
- Problèmes de propagations guidées des ondes électromagnétiques.** 2^e édition. In-8 (16-25), VIII-120 pages, 14 figures; 1951.
- Introduction à la nouvelle théorie des particules** de M. J.-P. Vigiér et ses collaborateurs. In-8 (16-25), 108 pages; 1961.
-

TRAITÉ DE PHYSIQUE THÉORIQUE ET DE PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

OUVRAGES RÉUNIS PAR JEAN-LOUIS DESTOUCHES

XXI

ÉTUDE CRITIQUE

DES BASES DE L'INTERPRÉTATION ACTUELLE

DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE

PAR

Louis de BROGLIE

de l'Académie française

Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences.



PARIS

GAUTHIER-VILLARS & C^o, ÉDITEUR-IMPRIMEUR-LIBRAIRE

55, Quai des Grands-Augustins, 55

—
1963

© 1963 by Gauthier-Villars & C^{ie}.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

PRÉFACE

Depuis plus de trente ans, les physiciens théoriciens se sont, en grande majorité, ralliés à une interprétation de la Physique quantique et de la Mécanique ondulatoire qui dérive des idées introduites naguère par M. Bohr et ceux qui l'ont suivi (École de Copenhague). Cette interprétation paraît s'adapter d'une manière parfaite aux formalismes élégants et précis actuellement utilisés en Mécanique quantique, formalismes dont les prévisions sont généralement très exactement vérifiées par l'expérience.

Bien qu'après mes premiers travaux sur la Mécanique ondulatoire j'aie formulé au sujet du dualisme des ondes et des corpuscules des idées tout à fait différentes de celles que l'École de Copenhague commençait à répandre, j'ai été bientôt arrêté dans cette voie par de grandes difficultés et j'ai finalement admis l'interprétation devenue aujourd'hui orthodoxe que j'ai ensuite longtemps enseignée. Mais depuis une dizaine d'années, revenant à mes conceptions primitives, je suis arrivé à la conviction que les formalismes usuels, bien qu'en apparence rigoureux et conduisant généralement à des conclusions exactes, ne donnent pas une vue profonde et véritablement explicative de la réalité physique aux très petites échelles.

Parmi les questions que ce revirement m'a conduit à me poser, il y a naturellement celle-ci : si les conceptions actuellement orthodoxes sont insuffisantes, comment se fait-il que des esprits éminents aient été amenés à les adopter et que, moi-même, je m'y sois résigné pendant de longues années? La réponse est évidemment la suivante : dans le cadre des formalismes, si satisfaisants à tant d'égards, de la Mécanique quantique, des raisonnements qui se présentent naturellement à l'esprit paraissent conduire à ces conceptions orthodoxes. Ayant pendant longtemps enseigné l'interprétation actuellement admise, j'étais en mesure d'en faire une

critique approfondie et, en faisant cette critique, j'ai cru déceler dans des raisonnements qui paraissent décisifs des analyses insuffisantes, des points faibles et de nombreuses obscurités. En particulier, la localisation corpusculaire étant en dernière analyse la seule chose que nous puissions indirectement observer au niveau microphysique, il m'est apparu particulièrement paradoxal d'en être arrivé à faire disparaître de la théorie l'image du corpuscule localisé et j'ai donné dans ce qui suit des exemples de paradoxes auxquels on est ainsi amené. Parfois même, en y réfléchissant, je me suis aperçu que certains raisonnements considérés par leurs auteurs comme des preuves décisives en faveur des conceptions actuelles peuvent, au contraire, être regardés comme plutôt favorables à mes propres conceptions : on en trouvera plusieurs exemples dans le présent Ouvrage.

En rédigeant ce petit livre, j'ai été naturellement amené à refaire un exposé sommaire de l'interprétation de la Mécanique ondulatoire que j'avais autrefois proposée sous le nom de « théorie de la double solution » et que j'ai reprise depuis quelques années. J'ai fait cet exposé en tenant compte de l'évolution la plus récente de ma pensée sur ce problème : en particulier, j'ai insisté sur l'introduction dans la théorie de l'élément aléatoire qui correspond à l'hypothèse du « milieu subquantique » de MM. Bohm et Vigier. Cette hypothèse conduit à considérer tout corpuscule, même en apparence isolé, comme en contact permanent avec un « thermostat caché » dont ce que nous appelons le « vide » serait le siège. Je me suis, en effet, de plus en plus rendu compte que la forme primitive que j'avais donnée à la théorie de la double solution devait être complétée par l'adjonction de cet élément aléatoire. La Dynamique du corpuscule exprimée par ce que j'ai appelé la « formule du guidage » doit donc être complétée par une Thermodynamique du corpuscule dont je crois que je commence à entrevoir les grandes lignes. Je me rapproche ainsi d'une idée d'Einstein qui, avec son remarquable flair de physicien, présentait dans le comportement aléatoire du corpuscule de la Physique quantique l'intervention de quelque chose d'analogue à un mouvement brownien, c'est-à-dire de fluctuations du genre de celles qu'on étudie en Thermodynamique statistique.

Toutefois, si j'ai cru devoir rappeler dans les pages qui suivent les principes de la nouvelle interprétation du dualisme des corpuscules et des ondes telle que je la vois se dessiner peu à peu, ce

n'est pas là le but principal de cet Ouvrage. Ce but principal est d'essayer de faire partager au lecteur ma conviction croissante que les raisonnements sur lesquels s'appuie l'interprétation actuelle de la Physique quantique ne sont pas aussi décisifs qu'ils le paraissent et contiennent beaucoup de petites fêlures. J'ai, pour ma part, l'impression que la plupart des théoriciens actuels, cédant à des tendances exagérément abstraites, ont trop facilement renoncé à se faire une image intelligible des phénomènes de la Physique quantique.

Pour compléter le texte du présent Ouvrage, M. João Luis Andrade e Silva a bien voulu écrire un chapitre complémentaire intitulé *Remarques sur les systèmes de particules identiques*. Je tiens à le remercier bien vivement de sa précieuse collaboration.

1^{er} juillet 1962.

LOUIS DE BROGLIE.

ÉTUDE CRITIQUE DES BASES DE L'INTERPRÉTATION ACTUELLE DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE

CHAPITRE I.

RÉFLEXIONS SUR LA NATURE DES PHÉNOMÈNES CORPUSCULAIRES ET ONDULATOIRES.

1. **Observation du monde microphysique.** — Le monde microphysique, c'est-à-dire la réalité physique à l'échelle des atomes et des corpuscules, échappe à nos observations directes. Comment le connaissons-nous? Il semble qu'on doive répondre à cette question en disant : nous le connaissons *uniquement* par l'intermédiaire de « localisations corpusculaires observables », c'est-à-dire de phénomènes où un corpuscule, agissant à l'échelle microphysique, déclenche par une réaction en chaîne un effet observable. Prenons un exemple pour bien préciser ceci. Soit un photon qui arrive dans l'émulsion d'une plaque photographique : il produit dans un atome de l'émulsion un effet photoélectrique et il en résulte l'émission par cet atome d'un électron rapide qui va ioniser les atomes environnants et provoquer ainsi l'émission d'autres électrons qui iront à leur tour ioniser d'autres atomes. Par ce processus de « boule de neige », de réactions en chaîne, des réactions chimiques sont déclenchées dans un domaine de *dimensions macroscopiques* de l'émulsion photographique et ces réactions chimiques ont pour résultat qu'après le développement, il apparaît sur la plaque une tache noire de dimensions macroscopiques directement observable par l'homme. Si le corpuscule, au lieu d'être un photon comme dans l'exemple précédent, est un électron ou une autre particule de l'échelle microphysique, c'est toujours un processus analogue de réaction en chaîne qui permettra de déceler sa présence, par exemple son arrivée dans une plaque, sur un écran, etc. C'est toujours

et, me semble-t-il, *uniquement* ce processus de « localisation corpusculaire observable » qui nous permet de connaître ce qui se passe à l'échelle microphysique. La réaction en chaîne déclenchée par l'arrivée du corpuscule est une sorte de processus amplificateur, réalisant une amplification en étendue, qui nous permet d'*observer* quelque chose qui s'est passé à une échelle inaccessible à nos sens.

La trace laissée par le passage d'une particule dans une chambre de Wilson constitue un exemple de localisations corpusculaires observables se produisant successivement tout le long d'une trajectoire. Dans le gaz sursaturé de vapeur de la chambre de Wilson, l'électron entre successivement en interaction de proximité avec une série d'atomes du gaz en les ionisant et chacune de ces ionisations déclenche un processus en chaîne qui aboutit à la formation d'une petite gouttelette d'eau. Le chapelet des gouttelettes d'eau ainsi formées dessine dans le gaz la forme de la trajectoire. On obtient ainsi une interprétation immédiate et intuitive du phénomène observé. Une explication analogue s'applique à ce qui se passe dans une émulsion photographique ou dans une chambre à bulle quand elles permettent de déceler le passage d'une particule.

Cette idée fondamentale étant reconnue, il convient d'y ajouter des commentaires importants.

Une première remarque est la suivante. Le résultat observable de la réaction en chaîne (tache noire sur une plaque photographique, etc.) a finalement toujours des dimensions de l'ordre d'une fraction de millimètre puisqu'il est observable, mais l'acte individuel qui est à l'origine de cette réaction en chaîne a lieu à l'échelle microphysique dans un domaine infiniment plus petit dont les dimensions sont, au plus, de l'ordre du rayon des atomes (10^{-8} à 10^{-9} cm) et peuvent descendre à l'ordre des rayons nucléaires ou corpusculaires (10^{-12} à 10^{-13} cm). Nous devons en conclure que, quand un corpuscule déclenche un phénomène observable par une réaction en chaîne, il le fait toujours en agissant à très courte distance, distance de l'ordre microphysique, sur un autre corpuscule ou sur un système de l'échelle atomique. Qu'on représente cette action par une fonction potentielle ou par le procédé assez artificiel de l'échange de photons virtuels, il faut toujours aboutir à lui attribuer une portée, un rayon d'action, très petite ($\leq 10^{-8}$ cm). J'ajouterai, sans développer entièrement ce point, que même dans l'action d'un photon sur une particule, on doit considérer cette action comme extrêmement localisée (¹). Cette idée que la localisation corpusculaire observable, seule

(¹) Dans les théories actuelles de l'interaction entre le rayonnement électromagnétique et un corpuscule électrisé, le terme d'interaction contient toujours, sous une forme plus ou moins dissimulée, un facteur de la forme $\frac{1}{R-r}$, où R et r définissent les positions du photon et du corpuscule : ceci revient à admettre implicitement que le photon n'agit sur le corpuscule que si sa position coïncide presque exactement avec celle du corpuscule.

fenêtre qui soit pour nous ouverte sur le monde microphysique, est liée à une très grande *proximité* entre le corpuscule déclenchant le phénomène observable et une autre unité du monde microphysique me paraît essentielle. Toute théorie acceptable doit la faire intervenir et nous en verrons un exemple à la fin de ce volume en étudiant un curieux Mémoire de M. Darwin sur la représentation des phénomènes de choc dans l'espace de configuration.

Une deuxième remarque importante est relative à la mesure des grandeurs dynamiques d'un corpuscule, notamment de son énergie et de sa quantité de mouvement. Contrairement à ce qu'on a parfois écrit, il ne nous semble pas qu'on puisse jamais mesurer l'énergie ou la quantité de mouvement d'un corpuscule en lui faisant subir une interaction avec un corps macroscopique et en étudiant le recul subi par ce corps : ce recul, en raison de sa petitesse, échapperait en effet à toute observation. En réalité, pour mesurer l'énergie ou la quantité de mouvement d'un corpuscule, il est toujours nécessaire d'utiliser l'interaction de ce corpuscule avec une autre particule de l'échelle atomique et d'observer le recul subi par cette particule à l'aide d'une ou de plusieurs localisations observables du type décrit précédemment : alors la corrélation établie après le choc entre le mouvement des deux unités microphysiques par la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement nous fournira l'état de mouvement du corpuscule étudié.

Comme exemple, nous pouvons prendre le cas bien connu d'un effet Compton dans une chambre de Wilson. Un photon de rayons X de fréquence ν_0 connue (donc d'énergie $h\nu_0$ et de quantité de mouvement $\frac{h\nu_0}{c}$ également connues) arrive sur un électron immobile en un point O. Après

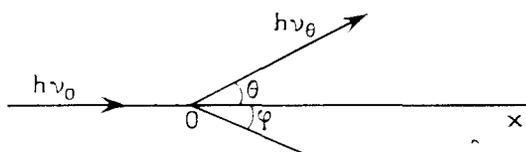


Fig. 1.

l'interaction entre le photon et l'électron, le photon s'éloigne du point O avec une énergie $h\nu_\theta$ et une quantité de mouvement $\frac{h\nu_\theta}{c}$ dans une direction faisant un angle θ avec la direction d'incidence Ox. Mais ni θ , ni ν_θ ne sont observables parce que le photon X est trop pénétrant pour produire des effets observables dans le gaz de la chambre. L'électron mis en mouvement de recul subit des chocs sur les atomes du gaz, chocs qui déclenchent des condensations de gouttelettes d'eau dessinant le trajet de

l'électron de recul : ce trajet est zigzaguant à cause des chocs entre l'électron et les atomes du gaz, mais la tangente à l'origine de cette trajectoire donne l'angle φ de la vitesse initiale de recul de l'électron avec l'axe Ox .

Les angles θ et φ sont dans un même plan par raison de symétrie et la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement dans le choc fournit par un calcul bien connu les deux relations suivantes :

$$(1) \quad \nu_{\theta} = \frac{\nu_0}{1 + \alpha(1 + \cos \theta)} = \frac{\nu_0}{1 + 2\alpha \sin \frac{\theta}{2}},$$

$$(2) \quad 1 - \cos \theta = \frac{2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi (1 + \alpha)^2} \quad \text{ou} \quad \operatorname{cotg} \varphi = (1 + \alpha) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2},$$

avec $\alpha = \frac{h\nu_0}{mc^2}$, où m est la masse de l'électron. L'angle φ étant observable, l'équation (2) donne la valeur de l'angle θ qui, portée dans l'équation (1), permet de calculer ν_{θ} . Ainsi les localisations observables de l'électron dans la chambre de Wilson permettent finalement de calculer l'angle θ qui est inobservable et les valeurs inconnues $h\nu_0$ et $\frac{h\nu_0}{c}$ de l'énergie et de la quantité de mouvement du photon après le processus qui permet la mesure de ces grandeurs.

De tout ce qui précède, nous pouvons conclure que dans tout processus physique permettant de mesurer certaines grandeurs dynamiques caractérisant un corpuscule, intervient toujours une localisation corpusculaire observable du type que nous avons décrit plus haut (ou une suite de localisations de ce genre) avec éventuellement conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Nous croyons pouvoir en conclure que tout processus de mesure d'une grandeur dynamique, telle qu'énergie et quantité de mouvement d'un corpuscule, est un processus complexe et indirect qui utilise nécessairement l'observation indirecte de localisations corpusculaires. Ceci nous permettra, quand nous ferons l'étude critique de la « théorie des transformations », de mettre en doute l'équivalence absolue qu'elle postule entre les représentations q et les représentations p .

Insistons encore sur un point important. Au moment où se déclenche une localisation corpusculaire observable, le corpuscule doit se trouver dans une très grande proximité (à une distance inférieure à 10^{-8} cm) du système microphysique sur lequel il agit. D'ailleurs, ce qu'on peut appeler les « dimensions » d'un corpuscule sont certainement inférieures à 10^{-12} cm. Ceci correspond à une localisation extrêmement stricte du corpuscule dans le train d'ondes qui lui est associé. Pour un photon de la lumière, l'expérience indique que les trains d'ondes ont une longueur de quelques millions de longueurs d'onde, c'est-à-dire de quelques mètres; nous sommes bien loin de l'ordre de grandeur de 10^{-12} ou même 10^{-8} cm. Pour les électrons, des expériences récentes (Möllensted en Allemagne, Faget et

Fert à Toulouse) ont montré que les trains d'ondes ont aussi une longueur qui est égale à un très grand nombre de fois la longueur d'onde (qui est ici de l'ordre de 10^{-9} cm) et cette longueur du train d'ondes est, par suite, très supérieure à 10^{-12} et même à 10^{-8} cm. C'est cette extrême localisation du corpuscule dans son train d'ondes, brusquement révélée par la localisation observable, qui constitue, nous le verrons, l'une des principales difficultés de l'interprétation du dualisme onde-corpuscule.

Voici maintenant un autre point important. Dans beaucoup d'exposés, on cherche à définir la localisation du corpuscule par son passage à travers un trou percé dans un écran. Plus le trou est petit, dit-on, plus la localisation du corpuscule dans le plan de l'écran est précise. Mais, en réalité, il n'y a pas là une véritable localisation puisqu'il n'y a rien d'observable dans ce passage par le trou. D'ailleurs si le train d'ondes est long, on ne sait pas à quel moment le corpuscule a passé par le trou. A vrai dire, le passage par le trou est seulement une « condition aux limites » imposée à la propagation de l'onde associée au corpuscule et non une véritable localisation de ce corpuscule. L'effet photoélectrique que produit un photon agissant sur un atome ou l'ionisation d'un atome par un électron, qui sont de véritables localisations corpusculaires observables, n'ont rien à voir avec le passage à travers un trou.

Un autre point de vue, qu'on trouve souvent dans les exposés et qui intervient, nous le verrons, dans la théorie des transformations, consiste à assimiler la localisation du corpuscule à une réduction du train d'ondes associé à des dimensions extrêmement petites représentées approximativement par une fonction de Dirac $\delta(\vec{R} - \vec{R}_0)$. Mais une telle réduction d'un train d'ondes n'est pas réalisable expérimentalement et la seule véritable localisation observable, qui implique une action de proximité du corpuscule sur une autre unité microphysique, n'a rien à voir avec l'image abstraite de la réduction d'un train d'ondes à des dimensions infiniment faibles.

Enfin, je voudrais encore insister sur le rôle certainement exagéré qu'on fait souvent jouer, dans l'analyse de l'observation des unités microphysiques, à l'appareil de mesure. Très souvent il n'y a pas d'appareils de mesure au sens propre du mot qui interviennent. Quand l'arrivée d'un photon ou d'un électron sur une plaque photographique produit un noircissement local et qu'on examine ce noircissement à l'œil, où est l'appareil de mesure? Quand un physicien voit la trajectoire d'un électron sous forme d'alignement de gouttelettes liquides dans une chambre de Wilson, où est l'appareil de mesure? Assurément, dans ces deux cas et dans des cas analogues, il y a toujours un dispositif expérimental : on met une plaque photographique sur le trajet du photon, on envoie un électron dans une chambre de Wilson, etc. Mais il n'y a pas d'appareils de mesure à proprement parler. On peut néanmoins dans certains cas faire

intervenir un appareil de mesure : par exemple, on mesure le noircissement de la plaque photographique à l'aide d'un appareil mesurant l'opacité locale de la plaque, ou bien, pour mettre en évidence un effet photoélectrique, on s'arrangera pour que le photoélectron parvienne dans un multiplicateur d'électrons qui donnera à sa sortie un courant électronique assez intense pour être mesuré par un galvanomètre, etc. Mais, dans tous ces cas, l'appareil de mesure n'interviendra qu'à la fin du processus de localisation observable, quand la réaction en chaîne aura suffisamment amplifié le phénomène pour qu'il soit devenu mesurable par un appareil de mesure au sens ordinaire du mot.

Les analyses que nous venons de faire des phénomènes de localisation des corpuscules sont, croyons-nous, très importantes et mériteraient d'être approfondies. Elles devraient être toujours faites sans l'introduction d'aucun formalisme mathématique abstrait qui risquerait de masquer le sens véritable des faits et d'en fausser l'interprétation.

2. Nature statistique des apparences ondulatoires. Examen de la notion de complémentarité. — Nous avons parlé du corpuscule et de ses localisations observables. Il nous faut maintenant parler de l'onde associée. Les apparences expérimentales qui obligent à introduire l'idée de cette onde sont les phénomènes d'interférences et de diffraction. Pour bien nous rendre compte de la nature de ces apparences, rappelons d'abord que, quand des photons ou des électrons arrivent sur une plaque photographique et y produisent une impression, ils le font par le processus de la localisation corpusculaire observable décrit au paragraphe précédent. Ceci est démontré expérimentalement : pour la lumière par exemple, on sait depuis longtemps que chaque photon arrivant sur l'émulsion produit un effet photoélectrique qui déclenche une petite réaction chimique locale aboutissant à la réduction du bromure d'argent et à une petite tache noire sur le négatif (Silberstein, Vavilov).

Considérons alors une plaque photographique sur laquelle l'arrivée de photons ou d'électrons a provoqué l'apparition de franges d'interférences ou d'un diagramme de diffraction. L'arrivée de chaque corpuscule n'a donné qu'un petit point noir sur la plaque, mais, en arrivant successivement sur la plaque, les corpuscules se sont répartis de façon à dessiner les franges d'interférences ou le diagramme de diffraction. Les apparences ondulatoires sont donc de nature essentiellement statistique puisque leur apparition exige l'arrivée sur la plaque d'un grand nombre de corpuscules qui se répartissent proportionnellement à l'intensité de l'onde.

Cette interprétation statistique des apparences ondulatoires conduit à une image « probabiliste » de l'onde. On a pu, en effet, obtenir des phénomènes d'interférences de la lumière du type usuel en employant pendant un temps très long une lumière d'intensité extrêmement faible, si faible qu'on ne pouvait avoir à la fois plus d'un photon dans le dispositif

d'interférences. Ce sont les expériences de Taylor (1909) confirmées par celles de Dempster et Batho (1927). Le même résultat a été obtenu plus récemment (1949) en U. R. S. S. par Souchkine et Fabrikant pour les figures de diffraction obtenues avec des électrons et l'on peut penser que c'est là un fait général pour tous les corpuscules. La seule interprétation qu'on puisse donner de ce résultat est la suivante : chaque corpuscule arrive sur le dispositif d'interférences ou de diffraction avec son train d'ondes qui y subit les interférences prévues par la théorie ondulatoire et, au bout d'un temps très long, quand il est arrivé les uns après les autres un grand nombre de corpuscules, ceux qui ont été captés par la plaque photographique et y ont produit des localisations corpusculaires observables se sont finalement répartis sur la plaque proportionnellement à l'intensité de l'onde. On est ainsi amené à dire que l'intensité de l'onde mesure la probabilité pour que le corpuscule subisse en un point de l'espace une localisation observable et, par suite, à considérer l'onde que la Mécanique ondulatoire associe au corpuscule comme une représentation de localisations possibles. Nous allons bientôt examiner les difficultés soulevées par une telle interprétation de la signification de l'onde, mais pour l'instant, nous allons exposer la notion de complémentarité introduite par M. Bohr.

D'après M. Bohr, l'onde et le corpuscule seraient des « aspects complémentaires » de la réalité physique qui apparaîtraient tour à tour dans des expériences différentes de telle manière que, quand l'un des aspects se manifeste, l'autre disparaît et que les deux aspects complémentaires inconciliables n'entrent jamais en conflit l'un avec l'autre. Cette notion de complémentarité a eu un grand succès et l'on a même tenté de l'extrapoler de la façon la plus hasardeuse en dehors du domaine de la Physique, en Biologie, en Sociologie, en Psychologie, etc. Dans le domaine de la Physique quantique, j'ai longtemps adopté cette idée de complémentarité tout en me rendant compte qu'elle était assez imprécise et n'avait aucun caractère réellement explicatif. Dans ces dernières années, l'évolution de ma pensée m'a conduit à envisager la notion de complémentarité avec de plus en plus de réserve.

Beaucoup d'auteurs ont présenté la notion de complémentarité en disant que les unités fondamentales de la lumière et de la matière sont protéiformes et qu'elles se présentent à nous tantôt sous l'aspect d'ondes, tantôt sous l'aspect de corpuscules. Un tel énoncé me paraît aujourd'hui tout à fait inexact. Considérons une plaque photographique sur laquelle sont inscrites des franges d'interférences : l'aspect ondulatoire des corpuscules se manifeste évidemment sur cette plaque, mais l'aspect corpusculaire y est aussi présent puisque nous savons que les franges ont été dessinées sur la plaque par une succession de localisations corpusculaires individuelles. En d'autres termes, sur la plaque il y a l'ensemble des franges qui manifeste l'aspect ondulatoire, mais chaque frange noire est

formée d'un ensemble de petits points noirs qui manifestent l'aspect corpusculaire. Donc sur une même plaque, sont présents l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire, seulement le premier est dû à des effets *individuels* et le second à un effet *statistique*. Mais où est là-dedans l'entité unique qui prendrait tour à tour l'aspect corpusculaire et l'aspect ondulatoire?

Nous reviendrons plus tard (au chapitre V) sur l'impossibilité d'observer les phénomènes d'interférences et de suivre en même temps la trajectoire du corpuscule, mais dès maintenant nous pouvons, me semble-t-il, conclure de la façon suivante. La notion de complémentarité ne peut être conservée que si l'on se contente de lui attribuer la signification suivante : pour rendre compte complètement des propriétés des corpuscules, il faut faire intervenir à la fois l'image du corpuscule localisé et celle de l'onde étendue en propagation. Sous cette forme prudente la notion de complémentarité est acceptable, mais elle est assez banale et n'a aucune vertu explicative. Elle n'apporte aucune explication du mystère de l'union des ondes et des corpuscules et elle me semble bien loin d'avoir la portée philosophique profonde que beaucoup d'auteurs lui attribuent.

Arrivons maintenant à l'une des questions les plus importantes, à l'une des énigmes les plus étranges, que pose l'interprétation de la Mécanique ondulatoire.

3. L'onde la Mécanique ondulatoire est-elle objective ou subjective? — Dans ce qui précède, nous venons d'être amenés à considérer l'onde associée au corpuscule comme une représentation de probabilité donnant par son intensité (carré de son amplitude) la probabilité de localisation observable du corpuscule. Or, ceci semble nous obliger à attribuer à l'onde un caractère subjectif.

Une représentation de probabilité implique, à mon avis, une ignorance partielle de celui qui l'emploie et elle a de ce fait nécessairement un caractère subjectif. J'ai dit une ignorance partielle car une ignorance totale ne permettrait de construire aucune représentation de probabilité : il faut, pour construire une telle représentation, posséder certaines informations à caractère objectif.

Pour bien faire comprendre ma pensée, je vais prendre un exemple très simple. Soit une table ayant deux tiroirs l'un à droite, l'autre à gauche. Nous savons que l'un des tiroirs contient une bille : c'est déjà une information objective, mais elle ne nous permet pas de construire une loi de probabilité pour la présence de la bille dans l'un ou l'autre tiroir. Mais supposons que nous apprenions que la bille a été déposée par celui qui l'a mise dans l'un des tiroirs en procédant de la manière suivante : cet homme a lancé la bille sur le disque en rotation d'une roulette (de Monaco) portant un nombre égal de cases rouges et de cases noires et il a décidé de placer la bille dans le tiroir de droite si elle s'arrête sur une case

rouge et dans le tiroir de gauche si elle s'arrête sur une case noire. C'est là tout ce que nous savons, mais cette information a un caractère objectif et elle nous permet de construire une répartition de probabilité pour la présence de la bille dans l'un ou l'autre tiroir, cette probabilité étant $\frac{1}{2}$ pour chacun des deux tiroirs. Cette probabilité représente bien ce qui subsiste de notre ignorance sur la position de la bille avec l'ensemble des informations que nous possédons : elle a ainsi un caractère essentiellement subjectif. Si nous ouvrons le tiroir de droite et si nous y trouvons la bille, la répartition de probabilité est brusquement modifiée : elle devient 1 à droite et 0 à gauche et cette brusque modification montre bien que, sauf dans le cas de la certitude, une répartition de probabilité est la représentation de notre ignorance partielle à caractère essentiellement subjectif.

Il semble donc que, puisque nous avons été amenés à attribuer à l'onde le caractère d'une représentation de probabilité, nous devons la considérer comme subjective. Mais ce point de vue qui d'une part paraît s'imposer soulève d'autre part des difficultés considérables. Il est, en effet, bien difficile de nier tout caractère objectif à une onde qui se propage dans l'espace au cours du temps suivant certaines lois, qui se réfléchit sur les miroirs, qui interfère et se diffracte quand elle rencontre des obstacles. Comment dans les phénomènes d'interférences et de diffraction cette onde pourrait-elle imposer au corpuscule des positions privilégiées si elle n'existe que dans notre esprit? Dans la détermination de l'énergie des états stationnaires qui dépendent des conditions de propagation de l'onde dans tout un domaine d'espace et des conditions aux limites de ce domaine peut-on admettre que la forme de l'onde stationnaire correspondant à une fréquence propre (valeur propre) impose au corpuscule une valeur quantifiée de son énergie si cette onde est purement subjective?

Nous voici au cœur du problème : comme représentation de probabilité, il faut que l'onde soit subjective et, parce qu'elle détermine des phénomènes physiques, il faut qu'elle soit objective. Perpétuellement les auteurs qui traitent de cette question oscillent entre les deux points de vue contradictoires, sentant bien qu'on ne peut en rejeter aucun.

En 1926-1927, j'avais aperçu une solution de cette énigme qui de nouveau, depuis quelques années, m'est apparue comme étant probablement la seule raisonnable : il y aurait deux ondes différentes, l'une qui serait objective et représenterait une réalité physique, ce qui lui permettrait parce qu'elle est intimement liée au corpuscule d'en déterminer le comportement, et l'autre qui serait une construction de notre esprit calquée sur les informations que nous possédons sur l'onde objective, de façon à nous fournir une représentation des probabilités relatives au corpuscule. On voit bien pourquoi j'avais donné à cette interprétation de la Mécanique ondulatoire le nom de « théorie de la double solution »

puisqu'elle me conduisait à envisager deux solutions différentes, mais étroitement reliées de l'équation d'ondes, l'une à caractère objectif de réalité physique, l'autre à caractère subjectif.

Nous aurons plus loin à rappeler les principes de la théorie de la double solution, mais nous voulons d'abord résumer l'interprétation usuelle de la Mécanique ondulatoire pour pouvoir en aborder la critique.