

# Sur la représentation des phénomènes dans la nouvelle physique <sup>(1)</sup>

PAR

LOUIS DE BROGLIE

Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne.

---

Il y a dans le cours du développement d'une science des périodes souvent longues où les progrès accomplis n'intéressent guère que les spécialistes. Découvertes expérimentales ou développements théoriques y sont d'un caractère si technique, si spécifique, qu'ils ne peuvent être appréciés à leur juste valeur que par ceux dont toute la vie, ou tout au moins une partie importante de l'activité intellectuelle, a été consacrée à l'étude de cette science. Mais il est d'autres périodes, périodes exceptionnelles, périodes glorieuses peut-on dire, où une science, poussant soudain des prolongements inattendus, brise le cadre où jusqu'alors elle était enfermée et entreprend une révision complète de ses principes et de ses conceptions fondamentales. Alors bien souvent, ce n'est plus seulement les spécialistes que cette mutation brusque intéresse, c'est toute personne cultivée, tout esprit soucieux de philosophie naturelle. Deux fois au cours de ces trente dernières années, la Physique théorique a traversé une telle crise de transformation. Ce fut d'abord la « crise relativiste » de la Physique lors de l'introduction des idées si hardies et si profondes d'Albert Einstein sur l'espace et le temps. Puis, ce fut, il y a peu d'années seulement, la « crise quantique » quand on a vraiment commencé à comprendre les répercussions profondes que l'existence du quantum d'Action découverte par Planck dans une géniale intuition, il y a plus de trente années déjà, apportait nécessairement à toute notre conception de la science physique.

---

(1) Conférence faite à l'Institut des Hautes Etudes de Belgique, le samedi 3 février 1934.

Si radicalement nouvelles qu'aient été les révélations qu'Einstein nous a apportées dans sa célèbre théorie, si révolutionnaires qu'aient pu paraître ces conceptions, on peut dire aujourd'hui, je crois, que la révolution quantique a été en Physique beaucoup plus profonde encore que la révolution relativiste. Bien davantage encore, elle a modifié notre conception des représentations que la théorie physique peut nous fournir des phénomènes, du rapport des choses observables avec les moyens d'observations, de la portée et du caractère des lois de la Nature. Si les idées nouvelles que cette révolution a fait jaillir, se maintiennent et se confirment, notre temps aura vraiment marqué une étape essentielle de la pensée scientifique : il aura été pour la Physique une de ces périodes glorieuses dont je vous parlais tout à l'heure, où l'évolution d'une science n'intéresse plus seulement les spécialistes, mais où, par les conceptions nouvelles qu'elle introduit et les horizons inattendus qu'elle découvre à l'esprit, elle est digne de retenir l'attention non seulement des philosophes, mais aussi de tout homme cultivé, de tous ceux qui aiment à suivre les progrès de la pensée humaine. Ce sont les conceptions originales qu'a fait naître la théorie des quanta que je vais chercher aujourd'hui à mettre en lumière devant vous. Vous m'excuserez si par moment, mon exposé vous paraît un peu obscur ou un peu elliptique : il y a en ces matières bien des choses qu'on ne peut vraiment préciser qu'avec l'aide de l'analyse mathématique ; il y a aussi, il faut le dire, bien des points délicats ou insuffisamment éclaircis. Le terrain parfois est glissant, il faut passer vite de peur de tomber.

Etendus près de leurs troupeaux pendant les nuits sereines, les pâtres de Chaldée furent, dit-on, les premiers à suivre le mouvement des astres sur la voute étoilée. Ils constatèrent ainsi que ces mouvements n'ont pas lieu au hasard, mais obéissent à des règles immuables et peut-être, en présence du spectacle grandiose de l'immense horloge céleste, une idée plus générale germa-t-elle dans leurs cerveaux obscurs et entrevirent-ils que la Nature obéit à des lois.

Dire qu'il y a des lois de la nature, c'est dire que les phénomènes s'enchaînent dans un ordre invariable et qu'un ensemble de conditions se trouvant réalisées, tel phénomène s'ensuit nécessairement.

Au fur et à mesure que l'homme dépassant le stade du pâtre Chaldéen a mieux su observer l'univers qui l'entoure, il est parvenu à discerner dans le monde physique un nombre croissant de lois toujours vérifiées et sa confiance dans l'existence et l'immutabilité des lois physiques a été en se développant. Peu à peu s'est ainsi installée dans l'esprit de la plupart de ceux qui se consacrent à l'étude des sciences la croyance que le monde physique est une immense machine dont l'évolution est inexorablement déterminée de telle sorte qu'une connaissance exacte de son état actuel devrait permettre la prévision de tous ses états futurs. Cette doctrine du déterminisme rigoureux et universel a été en particulier résumée par Laplace dans son « Essai sur le Calcul des Probabilités » où l'illustre géomètre a écrit cette phrase très justement célèbre par la précision de l'idée et l'élégance de la forme : « Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule le mouvement des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome ; rien ne serait incertain pour elle et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux ».

Pour le mathématicien, le déterminisme des phénomènes naturels s'exprime par le fait que ces phénomènes sont régis par des équations dont les solutions sont entièrement déterminées pour toutes les valeurs du temps quand on connaît les valeurs de certaines grandeurs à un instant initial donné.

Dans la pratique, la croyance au déterminisme a rendu un grand service aux savants en les préservant de la paresse. Quand en effet le savant découvre une nouvelle classe de phénomènes qui lui paraissent embrouillés et d'allure irrégulière, il est tenté de se laisser aller à la nonchalance et au découragement et de se dire : « Ces phénomènes n'ont pas de lois, on ne peut rien tirer de leur étude ». Mais alors intervient sa croyance au déterminisme qui lui affirme pour les nouveaux phénomènes observés l'existence de lois encore cachées dont la connaissance permettra de débrouiller l'écheveau des faits : le savant se remet au travail et souvent fait d'utiles découvertes.

Mais la doctrine déterministe n'a pas seulement une utilité pratique ; elle contient certainement une part de vérité car, si elle était radicalement fausse, il n'y aurait dans les phénomènes physiques ni ordre, ni régularité et toute science de ces phénomènes serait impossible. Or la physique existe, c'est un fait, et elle a montré sa valeur par ses progrès et ses nombreuses applications.

Néanmoins l'idée d'un déterminisme rigoureux et universel ne va pas sans soulever bien des objections. Laisse-t-elle en particulier sa place légitime à cette activité orientée vers des buts qui se manifestent dans la nature vivante ? Fait-elle à l'esprit et à ses manifestations sa part dans l'ensemble du monde réel ? Je ne m'aventurerai pas ici dans la discussion de ces hautes questions. Mon but est plus modeste : je veux simplement exposer la crise que l'idée déterministe a subi en Physique depuis quelques années. La Physique, c'est-à-dire la science de la matière inerte, paraissait jusque-là la citadelle du déterminisme et même les adversaires de cette doctrine semblaient disposés à lui abandonner complètement ce domaine. Et cependant les théories les plus récentes que les physiciens ont dû adopter, presque contre leur gré, pour expliquer les faits expérimentaux, tendent non pas à renoncer entièrement au déterminisme en Physique (j'ai déjà dit que l'existence même d'une science physique ne le permettait pas), mais à ne plus le regarder comme rigoureux et universel, à lui imposer des limites. Pourquoi et comment s'est produite cette évolution inattendue de la pensée scientifique, voilà ce que je voudrais tenter d'expliquer ici.

\*  
\*\*

Le cadre de nos perceptions est l'espace à trois dimensions et nous avons une tendance à admettre que toute la nature physique doit pouvoir se représenter exactement dans ce cadre. Mais nos perceptions ne sont pas immuables, elles se modifient au cours du temps. La tendance naturelle de ceux qui ont cherché à construire des théories physiques a donc été de considérer le monde comme formé par des éléments qui à chaque instant ont une certaine disposition dans l'espace, cette disposition se modifiant d'ailleurs au cours du temps puisque le monde physique se transforme. L'état

de l'univers matériel à un instant donné serait alors entièrement défini par la répartition de ses éléments c'est-à-dire par une certaine configuration, une certaine figure comme on eut dit au XVII<sup>e</sup> siècle ; l'évolution de l'univers matériel correspondrait aux variations progressives de cette configuration. Voilà pourquoi Descartes voulant tracer en quelque sorte par avance le programme de la science moderne écrivait qu'on doit s'efforcer d'expliquer les faits physiques « par figures et par mouvements ». Une telle conception sera en parfait accord avec la doctrine déterministe si la connaissance à un instant donné de la position et de la vitesse des éléments du monde physique suffit pour déterminer entièrement tous leurs mouvements ultérieurs.

Le type le plus parfait d'explications répondant à l'idéal de Descartes est fourni par les théories corpusculaires. Dans ces théories, on suppose la matière constituée par des corpuscules ou points matériels, c'est-à-dire par de petits éléments simples et indivisibles occupant une étendue si petite qu'on peut les confondre avec des points. La répartition de ces corpuscules dans l'espace et leurs déplacements au cours du temps devront rendre compte des propriétés de la matière. La première question qui se pose alors est de savoir quelle est la nature de ces corpuscules et combien d'espèces différentes il faudra en imaginer pour parvenir à rendre compte de la réalité. Les chimistes nous ont appris au cours du siècle dernier que tous les corps de la Chimie dérivent par combinaison d'un certain nombre de « corps simples », nombre assez grand d'ailleurs puisqu'il s'élève à 92. Ils ont été ainsi amenés à admettre que chaque corps simple est formé d'atomes tous identiques entre eux ; il existe donc 92 espèces différentes d'atomes et tous les corps de la Chimie sont constitués par des assemblages de ces 92 genres d'atomes. Les Physiciens se sont emparés de cette notion d'atome et ils ont construit des théories (la plus connue est la théorie cinétique des gaz) dans lesquelles les atomes jouent le rôle de corpuscules élémentaires. Mais on ne pouvait guère s'en tenir là ; l'esprit des savants qui vise à la simplicité, ne pouvait pas en effet être satisfait d'avoir à invoquer 92 espèces différentes de corpuscules élémentaires. La découverte expérimentale d'une constitution granulaire de l'électricité est venue simplifier les cho-

ses. L'expérience a en effet prouvé que l'électricité négative est constituée par des corpuscules tous identiques de masse et de charge électrique extrêmement faibles, les électrons. Une constitution granulaire analogue de l'électricité positive est devenue ensuite très probable et l'on désigne aujourd'hui sous le nom de proton le corpuscule élémentaire d'électricité positive (1). Les physiciens ont alors aperçu que les atomes des corps simples ne devaient pas être considérés comme des corpuscules élémentaires mais que c'étaient des édifices compliqués formés de protons et d'électrons; il existe 92 types différents de ces édifices qui sont les 92 espèces d'atomes différents. Un grand pas se trouvait ainsi fait dans le sens d'une théorie corpusculaire simple de la matière : à l'aide de deux sortes seulement de corpuscules, on allait pouvoir rendre compte des propriétés de la matière et réduire tout l'univers matériel à un vaste ensemble de protons et d'électrons. Si, de plus, on parvenait à trouver des lois rigoureuses régissant les mouvements de ces corpuscules, on aurait ainsi à la fois rempli le programme Cartésien de la description du monde physique par figures et par mouvements et satisfait aux exigences de la doctrine du déterminisme universel. Les physiciens paraissaient bien près d'atteindre un idéal depuis longtemps poursuivi.

\*  
\*\*

Placons-nous donc dans l'état d'esprit d'un théoricien de la Physique d'il y a une vingtaine d'années. La matière se réduit pour lui à un ensemble de protons et d'électrons. Le problème essentiel, on peut même presque dire l'unique problème, c'est alors de savoir quelles lois de mouvement on doit appliquer à ces corpuscules. Il était tout naturel d'adopter comme lois de mouvement pour les corpuscules les lois de la Mécanique classique de Newton. Cette Mécanique en effet s'était admirablement vérifiée dans l'étude du mouvement des astres et dans celle du mouve-

---

(1) Récemment s'est révélée l'existence d'un autre corpuscule d'électricité positive, l'électron positif ou positron. Peut-être même est-ce lui et non le proton qui est le vrai corpuscule élémentaire d'électricité positive. Nous ne pouvons entrer ici dans la discussion de ces faits encore très nouveaux.

ment des corps matériels qui nous entourent à la surface de la terre ; il semblait donc légitime de l'appliquer par extrapolation aux éléments ultimes dont la matière paraissait constituée. Or une des caractéristiques essentielles de la Mécanique de Newton appliquée aux corpuscules, c'est d'être conforme au déterminisme. Dans la conception classique, le corpuscule est un simple point matériel de dimensions négligeables : à chaque instant il a dans l'espace une position bien déterminée et au cours du temps, il décrit une certaine courbe, sa trajectoire. Les équations de la Mécanique classique nous permettent, étant connues la position et la vitesse d'un corpuscule à un instant donné, de prévoir rigoureusement tout le mouvement ultérieur du corpuscule. Si la Mécanique classique était réellement applicable aux corpuscules de la matière et si nous pouvions connaître exactement à un instant donné les positions et les vitesses de tous les corpuscules dont l'immense ensemble constitue le monde matériel, toute l'évolution future de ce monde matériel se trouverait fixée d'une façon inéluctable ; l'idéal décrit par Laplace dans la phrase que j'ai citée plus haut serait donc, au moins en principe, atteint. Mais je dois ici insister sur un point : la détermination rigoureuse du mouvement d'un corpuscule repose essentiellement sur l'hypothèse admise sans discussion dans la science classique qu'il est possible de connaître, c'est-à-dire de mesurer, avec précision à un même instant, à la fois la position du corpuscule et son état de mouvement défini par sa vitesse :

La doctrine déterministe triomphait dans les théories corpusculaires, il y a quelques années, mais depuis elle a éprouvé, elle aussi, que la roche Tarpéienne est près du Capitole. L'application des lois et des conceptions mécaniques classiques aux éléments ultimes de la matière, après avoir fourni au début des résultats encourageants, s'est en effet révélée en dernière analyse comme impuissante à rendre compte de la réalité expérimentale. La raison de cet échec a été la découverte d'une classe de phénomènes nouveaux, les phénomènes de Quanta, dont l'interprétation par le seul moyen des conceptions classiques est impossible. Je ne puis décrire ici en détail les phénomènes de Quanta et les difficultés de leur interprétation : je veux seulement préciser deux aspects de

ces difficultés. D'une part l'étude des phénomènes de Quanta a conduit les physiciens, après de longs tâtonnements, à admettre que pour expliquer les propriétés de la matière, il ne suffisait pas de la considérer comme formée de corpuscules mais qu'il fallait associer à ces corpuscules des ondes dont la signification physique que nous examinerons plus loin est assez surprenante. D'autre part, pour formuler les lois expérimentales des phénomènes de Quanta, il a fallu toujours faire intervenir une nouvelle constante universelle complètement ignorée de la Physique classique et appelée la constante de Planck du nom de l'illustre savant Allemand qui le premier en a découvert l'importance. Cette constante habituellement représentée dans les équations par la lettre  $h$  n'est susceptible d'aucune interprétation dans le cadre des théories classiques basées sur la Mécanique de Newton. Sa signification a été depuis trente ans et est encore dans une large mesure aujourd'hui l'énigme de la Physique moderne : elle est restée la syllabe indéchiffrable du « mot croisé » de la Nature.

Notons ici un point très important : la constante  $h$  a une valeur extrêmement petite par rapport aux grandeurs qui interviennent usuellement dans les phénomènes à notre échelle. C'est la raison pour laquelle son existence ne s'est imposée à notre attention que quand nous avons su étudier la structure de la matière, c'est-à-dire les phénomènes de l'échelle atomique ou subatomique.

\*  
\*\*

Et maintenant nous devons préciser de quelle manière les théories contemporaines ont été amenées à associer des ondes aux corpuscules de matière. Pour cela nous devons d'abord rappeler le plus simplement possible ce que l'on nomme une onde. On peut se faire une représentation d'une onde simple en imaginant une série de vagues qui se suivent à intervalles réguliers ; la distance entre deux crêtes consécutives est appelée la longueur d'onde et la hauteur de la crête est appelée l'amplitude ; la longueur d'onde et l'amplitude sont les deux grandeurs qui définissent l'onde simple. Une telle onde simple est souvent nommée, d'un mot emprunté au langage de l'optique, une onde monochromatique. Mais on peut envisager des types d'ondes plus complexes qui sont for-

mées par une superposition d'ondes monochromatiques ; pour définir une onde complexe de ce genre, il faut se donner les longueurs d'onde et les amplitudes de toutes les ondes simples composantes ou, comme on dit encore par analogie avec l'optique, se donner la « décomposition spectrale » de l'onde complexe.

J'ai dit plus haut que les physiciens après une longue étude des phénomènes de Quanta étaient parvenus à la conviction que dans la théorie de la matière, il fallait associer la notion d'onde à celle de corpuscule. On a d'abord reconnu qu'au mouvement d'un corpuscule de vitesse bien définie, on devait faire correspondre la propagation d'une onde monochromatique dont la longueur d'onde est reliée à la vitesse du corpuscule par une relation où figure la constante  $h$ . A partir de cette idée s'est développée une nouvelle Mécanique connue sous le nom de « Mécanique ondulatoire » où l'étude du mouvement du corpuscule est *remplacée* par l'étude de la propagation de l'onde associée. Cette propagation de l'onde associée se fait suivant des lois rigoureuses mais il n'en résulte plus pour le corpuscule, comme je vais tenter de l'expliquer, un mouvement rigoureusement déterminé.

Dans la nouvelle conception l'onde associée à un corpuscule représente ou symbolise tout ce que nous savons sur le corpuscule. Cette onde associée est en général une onde complexe définie par une certaine décomposition spectrale et dont l'amplitude résultante est répartie à chaque instant d'une certaine façon dans l'espace. Or la nouvelle Mécanique se refuse à attribuer au corpuscule une position constamment bien définie dans l'espace ; elle nous dit seulement que le corpuscule se trouve nécessairement dans la région occupée par l'onde et qu'il a d'autant plus de chance de se trouver en un point que l'amplitude de l'onde est plus grande en ce point. De même la nouvelle manière de voir ne permet plus d'attribuer constamment au corpuscule un mouvement parfaitement déterminé : à chaque composante monochromatique qui figure dans la décomposition spectrale de l'onde associée, correspond une valeur possible de la vitesse du corpuscule et on sait seulement que la vitesse réelle du corpuscule correspond à l'une de ces valeurs possibles.

Il y a donc toujours dans la nouvelle Mécanique une certaine

incertitude sur la position du corpuscule et une certaine incertitude sur son état de mouvement. Il est aisé de se rendre compte en étudiant les propriétés mathématiques des ondes que ces deux incertitudes ne sont pas indépendantes : plus l'une est petite, plus l'autre est grande. Pour le voir, examinons d'abord un cas limite : celui d'une onde associée qui est simple, monochromatique ; elle correspond, nous l'avons vu, à un corpuscule dont la vitesse est parfaitement connue. Mais on peut montrer qu'une onde monochromatique de ce genre a une extension indéfinie dans l'espace et a partout même amplitude, en Mécanique condulatoire cela veut dire que le corpuscule associé à une position complètement indéterminée, il peut se trouver aussi bien en n'importe quel point de l'espace. Donc une connaissance complète du mouvement entraîne une incertitude absolue sur la position. Il peut cependant arriver que l'onde associée au corpuscule au lieu d'être indéfinie, occupe seulement une région limitée  $R$  de l'espace en dehors de laquelle l'amplitude de l'onde est nulle, l'incertitude sur la position est alors moins grande que dans le cas précédent puisque le corpuscule se trouve certainement dans la région  $R$ . Mais une onde limitée à une région de l'espace est nécessairement complexe, l'analyse mathématique le montre, et elle est formée par une superposition d'ondes monochromatiques dont chacune correspond à une vitesse possible du corpuscule. Ici donc, l'incertitude sur la position n'est plus complète, mais nous avons en compensation une incertitude sur le mouvement. Enfin on peut considérer l'autre cas limite, celui d'une onde occupant seulement une région  $R$  infiniment petite. La position du corpuscule est alors bien connue puisqu'il doit se trouver dans  $R$ , mais une telle onde de dimensions infiniment petites ne peut résulter que de la superposition d'ondes monochromatiques de toutes les longueurs d'onde possibles et par suite toutes les valeurs de la vitesse sont possibles pour le corpuscule ; quand il n'y a plus d'incertitude sur la position il y a une incertitude complète sur la vitesse.

M. Werner Heisenberg, qui a le premier aperçu ces conséquences de la nouvelle Mécanique, les a exprimées mathématiquement à l'aide d'équations appelées aujourd'hui les « relations d'incertitude ». Ces relations mettent en évidence le fait suivant : c'est

l'existence de la constante  $h$  qui nous empêche de connaître simultanément avec précision la position et le mouvement d'un corpuscule ; si  $h$  était nulle, une telle connaissance simultanée serait possible. Mais pourrait-on objecter, pour connaître simultanément la position et la vitesse d'un corpuscule, il suffit de mesurer en même temps ces deux grandeurs. M. Heisenberg a répondu victorieusement à cette objection en montrant qu'il n'existe pas de procédé de mesure ou d'observation qui puisse nous faire connaître en même temps d'une façon rigoureuse la position et la vitesse d'un corpuscule. Tout dispositif permettant la mesure de la position a pour effet de troubler d'une manière inconnue la vitesse et cela d'autant plus fortement que la mesure de la position est plus précise ; inversement tout dispositif permettant la mesure de la vitesse a pour effet de troubler la position d'une manière inconnue et cela d'autant plus fortement que la mesure de la vitesse est plus précise.

En examinant de près la question, on retrouve par cette critique des possibilités de mesure, les relations d'incertitude déjà déduites des propriétés des ondes associées.

Cette impossibilité de mesurer simultanément la position et la vitesse que M. Heisenberg a illustrée par des exemples particuliers, apparaît à la réflexion comme l'expression d'un fait de très grande portée. Avant d'avoir été amené à un examen plus approfondi de ce point, la Physique posait en principe que l'homme peut décrire les phénomènes physiques sans jamais avoir à tenir compte de la réaction qu'il exerce sur ces phénomènes en cherchant à les observer ou à les mesurer. Tel un petit dieu, le savant était censé regarder la réalité de l'extérieur et l'apercevoir comme un vaste échiquier couvert de pièces dont il avait pour mission de décrire à chaque instant la position et le mouvement. Or une telle conception est évidemment inexacte : nous ne sommes pas de petits dieux placés en dehors de l'échiquier de la Nature ; nous sommes nous mêmes sur l'échiquier et notre présence, notre action exerce des perturbations sur l'état et l'évolution des êtres physiques qui nous entourent. En particulier, quand le physicien veut observer avec précision, veut faire des mesures, opérations indispensables pour faire de la science exacte, il est obligé d'entrer en relations,

soit directement à l'aide de ses sens, soit indirectement par l'intermédiaire d'instruments de mesure, avec la réalité qu'il veut étudier et cette entrée en relations entraîne nécessairement en principe une perturbation des phénomènes observés.

Mais comment se fait-il que des remarques aussi simples, aussi banales mêmes, n'aient pas été faites depuis longtemps ? En réalité elles ont été faites depuis longtemps, mais elles ne sont devenues réellement essentielles que depuis la découverte du quantum d'Action. En effet, dans la Physique à notre échelle, la perturbation de l'observé par l'observateur ou les moyens d'observation est en général ou négligeable ou facilement éliminable. Il n'en est pas de même quand on arrive à l'échelle atomique : cela tient en partie à l'existence de particules ultimes de matière et d'électricité, existence dont résulte qu'il est impossible de faire intervenir, dans l'observation ou la mesure, des quantités de matière ou d'électricité inférieures à certaines valeurs ; mais cela tient surtout à l'existence d'une troisième discontinuité dans la Nature, le quantum d'Action, discontinuité dont les deux autres apparaîtront peut-être un jour comme des conséquences. Les analyses d'Heisenberg et de Bohr ont montré très nettement comment l'existence du quantum d'action intervient dans toute opération de mesure pour empêcher la mesure simultanée des quantités dites « canoniquement conjuguées » qui définissent les unes la position et les autres le mouvement. Au vrai l'existence du quantum d'Action exprime une liaison d'un genre tout à fait insoupçonné de l'ancienne Physique entre la configuration et l'état dynamique, elle nous fait soupçonner que toute notre représentation du monde matériel dans un espace métrique (Euclidien ou Riemannien) où les notions de position, de distance, de trajectoire ou de vitesse ont un sens clair, repose sur une base inexacte.

On voit donc combien l'intervention du quantum d'Action a changé l'idée que l'on se faisait de l'observation et de la mesure d'une grandeur physique. Dans la conception classique, le savant qui observe ou qui mesure ne fait que constater un état de chose qui existe en dehors de lui, sans le modifier appréciablement. Dans la conception quantique au contraire, l'observation ou la mesure provoque nécessairement, en raison de l'existence du quan-

tum d'Action, une perturbation incontrôlable du phénomène étudié. Si la mesure est précise, elle fournit pour la grandeur mesurée une valeur bien déterminée, mais cette valeur résulte non seulement de l'état antérieur à la mesure, mais de la mesure elle-même, sans que l'influence de celle-ci puisse être prévue à l'avance.

On aperçoit alors la grande modification qui s'introduit ici dans notre ancienne conception du déterminisme physique. Le déterminisme consistait en somme en ceci que, connaissant le résultat de certaines observations ou mesures, on devait pouvoir prévoir avec l'aide de l'analyse mathématique le résultat des observations ou des mesures futures. Mais si chaque observation ou mesure apporte avec elle un élément nouveau et incontrôlable, l'idéal auquel aspirait la conception classique du déterminisme est évidemment impossible à atteindre complètement. Quelles sont alors les prévisions que la science reste en état de faire ? Pour pouvoir faire des prévisions au sujet d'un système physique formé de corpuscules, il faut partir d'un état initial connu. Mais un état initial ne peut être exactement connu dans le sens qu'envisageait le déterminisme classique, puisque des mesures simultanées opérées sur le système ne peuvent jamais faire connaître exactement à la fois les variables de position et les variables dynamiques. L'état initial dont on part sera donc affecté d'incertitudes. Cet état initial avec les incertitudes qu'il comporte nécessairement, la théorie physique actuelle le représente par une certaine onde associée. L'évolution de l'onde à partir de cette forme initiale pourra être rigoureusement prédite à l'aide des équations de propagation de la Mécanique ondulatoire, mais il n'en résulte pas un déterminisme rigoureux pour la prévision des phénomènes observables ; tout ce que la théorie pourra fournir, c'est la probabilité pour que telle mesure future donne tel résultat ; en général, à part quelques cas exceptionnels, elle ne pourra pas affirmer que telle mesure donnera avec certitude tel résultat. On s'explique assez bien ce fait en remarquant qu'entre l'instant où l'on prévoit le résultat possible de la mesure et celui où l'on connaît ce résultat, il n'y a eu la mesure elle-même avec la perturbation inévitable qu'elle entraîne.

Certains physiciens pensent encore aujourd'hui que le principe

du déterminisme rigoureux des phénomènes physiques doit être maintenu. Le cours des phénomènes *en lui-même*, c'est-à-dire indépendamment des interventions que nous faisons pour le connaître, serait rigoureusement déterminé : seule l'existence malencontreuse du quantum d'Action, en posant une borne inférieure aux perturbations que nous exerçons dans l'observation et la mesure, nous empêcherait de réunir jamais les éléments nécessaires pour préciser la marche rigoureuse des phénomènes. D'autres physiciens pensent au contraire qu'il n'y a pas lieu de maintenir l'affirmation métaphysique d'un déterminisme que la science ne pourrait plus réellement constater. Quoi qu'il en soit de ces divergences théoriques, il semble que pratiquement on soit aujourd'hui d'accord sur le point suivant : tandis que l'ancienne Physique avait la prétention de soumettre tous les phénomènes à des lois rigoureuses et inexorables, la nouvelle Physique ne parvient plus à nous fournir que des lois de probabilité. Sans doute ces lois de probabilité peuvent s'exprimer en formules précises, mais ce ne sont cependant que des lois de probabilité. Il reste donc pratiquement, dans l'image que la théorie physique peut aujourd'hui nous fournir des phénomènes, une certaine marge d'incertitude et l'on peut dire que cette marge d'incertitude a sa raison profonde dans l'existence du quantum d'Action et est en quelque sorte mesurée par la grandeur de la constante  $h$ . La constante  $h$  trouve ainsi une interprétation assez imprévue : elle serait, peut-on dire, la borne qui marque, au moins pratiquement dans notre science humaine, la limite du déterminisme.

Une objection se présente naturellement à l'esprit. Les phénomènes mécaniques qui se jouent à notre échelle ou à l'échelle astronomique paraissent obéir à un déterminisme rigoureux ; c'est même ce fait, comme je le disais au début, qui a suggéré la doctrine du déterminisme universel. Comment ce déterminisme des phénomènes macroscopiques est-il conciliable avec les idées que nous venons d'exposer ? La réponse est aisée si l'on se souvient de la petitesse de la constante  $h$  par rapport aux grandeurs qui interviennent dans les phénomènes mécaniques à notre échelle ou a fortiori à l'échelle astronomique. Dans ces phénomènes, la marge d'incertitude mesurée, nous l'avons dit, par  $h$  est si petite par

rapport à la valeur absolue des grandeurs mises en jeu qu'elle est totalement négligeable, étant d'ailleurs complètement masquée par les erreurs expérimentales qui affectent inévitablement nos observations et nos mesures. De là un déterminisme *apparent* des phénomènes macroscopiques parfaitement conciliable avec une certaine indétermination des phénomènes à l'échelle microscopique.

Peut-être est-il intéressant d'ajouter ici une autre remarque sur les conséquences de l'existence du quantum d'Action. L'idée que le monde physique est semblable à lui-même à toutes les échelles, que l'infiniment petit est une réduction homothétique de l'infiniment grand se retrouve comme un leit-motiv dans les écrits des penseurs et les théories des savants. Le génie de Blaise Pascal a su exprimer cette pensée sous des formes émouvantes et n'est-ce pas elle qu'on retrouve, il y a vingt ans, inspirant les modèles planétaires de l'atome ? Eh bien ! aujourd'hui, à la lumière des théories quantiques récentes, cette idée nous apparaît comme un principe inexact. Les images qui suffisent pour la description du macrocosme sont inadéquates pour celle du microcosme. Quand, descendant l'échelle des grandeurs, le physicien aborde l'étude du monde atomique, du monde des corpuscules élémentaires, il y rencontre un élément entièrement nouveau et irréductible, le quantum d'Action, dont l'intervention entraîne les importantes conséquences que nous avons tenté d'analyser. La valeur finie de la constante de Planck a pour effet que dans le monde physique, l'infiniment petit n'est pas une réduction homothétique de l'infiniment grand.

\*  
\*\*

Nous sommes parvenus, en ce qui concerne les corpuscules élémentaires à la conception suivante : on peut les décrire tantôt comme des corpuscules au sens classique ayant une localisation précise dans l'espace, tantôt comme des ondes qui remplissent tout un domaine de l'espace. Et ces deux modes de description sont tous les deux indispensables, le premier parce qu'il traduit l'individualité et la nature discontinue du corpuscule manifestée par la valeur discrète et constante de ses caractéristiques (de sa charge

et de sa masse par exemple), le second parce que seul il peut rendre compte de phénomènes tels que la diffraction des électrons ou l'existence de leurs états stationnaires dans les systèmes atomiques. Or tous les efforts faits pour concilier ces deux points de vue ont échoué : je le sais, car j'en ai fait beaucoup moi-même au début du développement de la nouvelle Mécanique. Comment se peut-il que pour décrire une même entité physique, l'électron par exemple, il nous faille absolument deux images incompatibles ? Ceci s'explique ou du moins se comprend parce que, ainsi que nous l'avons vu, nous ne pouvons connaître à la fois avec précision les grandeurs qui seraient nécessaires pour préciser les deux descriptions. C'est ce qui résulte des relations d'incertitude, elles-mêmes conséquences de l'existence du quantum d'Action. Les deux descriptions incompatibles n'entreront jamais en conflit absolu parce que plus l'une est précise, plus l'autre est nécessairement floue.

Nous pouvons ici faire appel à une comparaison que j'ai développée dans des écrits antérieurs. Soit deux dessins dont l'un serait tracé sur un certain plan et l'autre sur un plan parallèle. Si nous examinons ces dessins à l'aide d'un instrument optique, nous ne pourrions être à la fois « au point » sur les deux. En nous mettant au point sur l'un, nous pourrions en examiner les détails, mais alors l'autre nous apparaîtra si flou que nous ne pourrions en avoir aucune idée précise. Nous ne pourrions donc jamais faire correspondre les deux dessins point par point pour préciser leurs différences. La nécessité de faire appel à deux images contradictoires pour la description des corpuscules élémentaires a suggéré à M. Bohr une vue générale qu'on peut appeler la théorie de la « complémentarité ». Dans l'esprit de son auteur, cette théorie dépasse de beaucoup le cas particulier pour lequel elle a été faite et atteint presque l'ampleur d'une doctrine philosophique. Pour M. Bohr, corpuscule et onde sont des « aspects complémentaires de la réalité » ; mais il faut bien entendu le sens très particulier que possède ici le mot « complémentaire » : il signifie « qui se complètent en s'excluant ». Les aspects complémentaires se complètent en ce sens qu'on doit les considérer tous les deux pour obtenir une description complète de l'entité électron, mais ils s'excluent en ce sens que la connaissance exacte de l'un est incompatible avec la

connaissance exacte de l'autre et qu'aucune correspondance point par point ne peut par suite être rigoureusement établie entre les deux aspects.

M. Bohr a vu dans l'idée de complémentarité suggérée par la théorie quantique des phénomènes atomiques une conception générale qui pourrait trouver son application en dehors des limites de la Physique. Les êtres vivants, par exemple, possèdent d'une part des activités coordonnées et obéissant au moins en apparence à une sorte de finalisme, et d'autre part ils possèdent une structure matérielle physico chimique. Or aux yeux de M. Bohr, ce sont là deux « aspects complémentaires » car la connaissance exacte et complète de la structure physico chimique d'un être vivant exige la dissection de cet être vivant et l'analyse de ses cellules, opérations évidemment incompatibles avec la persistance de la vie chez cet individu, tandis qu'au contraire l'observation de l'activité vitale de l'être vivant exige qu'on respecte au moins en grande partie l'intégrité de sa structure : le mystère de la vie résiderait en quelque sorte dans la nature complémentaire de ces deux aspects. Et M. Bohr va plus loin et écrit : « Étant donné l'opposition existant entre le sentiment du libre arbitre qui domine la vie psychique et la connexion causale en apparence rigoureuse que présentent les phénomènes physiologiques concomitants, il n'a certes pas échappé aux philosophes que l'on se trouvait en présence d'un rapport de complémentarité non intuitif. On a souvent soutenu qu'une étude détaillée des processus du cerveau — étude assurément irréalisable mais cependant imaginable — révélerait un enchaînement causal qui offrirait une représentation univoque des impressions psychiques et des sentiments. Mais cette expérience idéale apparaît sous un jour nouveau depuis que la découverte du quantum d'Action nous a enseigné qu'il n'est pas possible d'établir en détail la suite causale des processus atomiques, ni d'obtenir une connaissance quelconque de ces derniers sans une perturbation essentiellement incontrôlable de leur cours. La conception considérée du rapport entre les processus du cerveau et les impressions de l'âme nous conduit dès lors à penser que toute tentative pour observer les premiers entraînerait une modification essentielle du sentiment de la volonté. Sans doute, ce sont là des analogies plus

ou moins pertinentes ; néanmoins, il est difficile d'échapper à la conviction que les faits révélés par la physique théorique, inaccessibles à nos formes ordinaires d'intuition, nous fournissent un moyen nouveau d'investigation des problèmes philosophiques généraux ».

J'ai donné en entier cette citation un peu longue pour montrer toute l'ampleur des conceptions auxquelles parvient M. Bohr. Sans doute on pourra discuter ces conceptions, car des vues philosophiques de cette sorte prêtent forcément à discussion. Mais que de telles conceptions puissent sortir des progrès récents de la Physique et des idées nouvelles que ces progrès ont fait naître, n'est-ce pas là en lui-même un fait des plus intéressants ? N'est-ce pas là une preuve de l'importance de l'évolution subie par nos conceptions théoriques en Physique pendant ces dernières années ?

---