Zeitschrift: L'Enseignement Mathématique

Herausgeber: Commission Internationale de l'Enseignement Mathématique

Band: 32 (1933)

Heft: 1: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE

Artikel: LES IDÉES NOUVELLES INTRODUITES PAR LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Autor: de Broglie, L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-25324

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

LES IDÉES NOUVELLES INTRODUITES PAR LA MÉCANIQUE QUANTIQUE [1]

PAR

L. DE BROGLIE, Membre de l'Institut (Paris),
Lauréat du Prix Nobel de Physique.

Je voudrais vous exposer aujourd'hui en quelques mots les idées nouvelles qui ont été introduites dans la Science par le développement des nouvelles doctrines dites Mécanique quantique ou Mécanique ondulatoire. Assurément je me garderai bien de tirer de ce développement une philosophie générale. Le temps n'est plus en effet où chaque progrès des sciences donnait naissance à de vastes systèmes philosophiques, où les Descartes et les Leibniz aimaient à bâtir, sur le terrain solide de leurs découvertes scientifiques, des constructions métaphysiques plus aventureuses et moins durables. Instruits par le spectacle de l'écroulement successif de ces systèmes, amenés à se spécialiser davantage dans la technique d'une seule science par suite de l'augmentation et de la complexité indéfiniment croissantes des connaissances humaines, les savants d'aujourd'hui répugnent instinctivement à tout ce qui leur semble généralisation trop hardie ou théorie métaphysique. N'attendez donc pas de moi une philosophie générale fondée sur la Physique des quanta. Je voudrais plus modestement chercher à caractériser, d'une façon simple et sans avoir recours à l'appareil mathématique, les modifications que la découverte des phénomènes quantiques et leur interprétation théorique paraissent devoir apporter à certaines conceptions générales de la Physique classique et aussi de la Théorie de la Connaissance.

Dans les temps modernes, depuis le XVIIIe siècle jusqu'à nos jours, la théorie physique parait avoir reposé essentiellement sur

---

[1] Conférence faite le 15 novembre 1933, à la Séance d'ouverture des *Conférences internationales des Sciences mathématiques*, organisées par l'Université de Genève. Elle a été suivie d'une seconde conférence, intitulée « Quelques remarques sur la théorie de l'électron magnétique de Dirac » et insérée dans les *Archives des Sciences physiques et naturelles*, vol. 15, p. 465-483, Genève 1933.

deux bases: la conception mécaniste du monde matériel qui avait déjà trouvée son expression sous la plume de Descartes et l'hypothèse de la continuité des phénomènes physiques permettant d'en tenter l'étude avec l'aide puissante de l'analyse infinitésimale, hypothèse si nettement exprimée par la célèbre formule de Leibniz: « Natura non facit saltus ».

L'immense succès de ces deux idées dans de nombreux domaines de la science (Astronomie, Mécanique, Physique proprement dite) avait conduit la plupart des physiciens, tous ceux du moins qui ne s'enfermaient pas dans le formalisme énergétique, à adopter plus ou moins implicitement une certaine conception simple de l'Univers physique: ils se le figuraient comme une immense machine susceptible, suivant le mot de Descartes, d'être décrite par figures et par mouvements, c'est-à-dire comme une machine formée de parties, juxtaposées dans l'espace et mobiles dans le temps, dont les mouvements et modifications essentiellement continues, résultats des actions et réactions mutuelles, pouvaient être exactement exprimés dans le langage précis de l'analyse mathématique. Comme les actions entre les diverses parties du monde matériel diminuent avec la distance, il est souvent possible d'y isoler des systèmes autonomes ou presque autonomes; les lois de la Mécanique et de la Physique affirmaient alors qu'une connaissance suffisante de l'état initial d'un tel système isolé permettait avec l'aide de l'analyse de prévoir rigoureusement toute l'histoire ultérieure de ce système. Qu'une telle prévision de l'évolution d'un fragment suffisamment bien isolé du monde matériel soit effectivement possible quand on se borne aux phénomènes de l'échelle humaine ou de l'échelle astronomique, c'est ce que prouve d'une façon indiscutable le succès des grandes théories classiques de la Mécanique rationnelle, de la Mécanique céleste et de la Physique mathématique du siècle dernier. On a donc pu penser légitimement à un moment donné que l'application, aux phénomènes de l'échelle atomique, des mêmes conceptions de Mécanisme universel conduirait à des succès du même ordre. C'est pourquoi l'expérience ayant révélé l'existence de particules élémentaires de matière, électrons et protons, on a cherché à représenter les phénomènes de l'échelle atomique par des mouvements de ces particules élémentaires et

à considérer les atomes comme des sortes de systèmes planétaires offrant une image réduite des systèmes planétaires de l'Astronomie. Mais la nécessité d'introduire dans le modèle planétaire de l'atome des conditions de Quanta est venue montrer qu'en réalité à cette échelle intervenait un facteur tout à fait négligeable aux échelles supérieures: ce facteur, c'est le quantum d'action ou, si l'on préfère, la constante h de Planck. M. Bohr qui a attaché son nom au modèle planétaire de l'atome, a été le premier à pressentir qu'en réalité ce modèle était trompeur et que l'intervention du quantum d'action à l'échelle atomique apportait une limitation aux images de la Physique classique. Il a été par la suite celui qui a le plus insisté sur ce point au fur et à mesure que se développaient les nouvelles théories quantiques. Nous rattachant à ses idées, nous allons chercher à montrer comment le mécanisme d'une part, le continuisme d'autre part, se sont trouvés battus en brèche par l'éclosion de la nouvelle Mécanique.

* * *

Pour bien comprendre l'une des principales causes de l'échec du Mécanisme, il nous faut examiner quelle est dans la conception du Mécanisme universel, en face du monde matériel assimilé à une machine, la position du physicien qui observe et mesure pour pouvoir ensuite calculer et prévoir. Il y a en effet une hypothèse que l'on admet plus ou moins implicitement dans toutes les théories classiques, c'est qu'il est possible d'observer et même d'étudier quantitativement l'état d'un système sans troubler aucunement cet état. On admet en somme que le savant peut observer un système ou même faire des mesures sur ce système sans qu'il y ait aucun échange d'énergie appréciable entre le système et lui ou les instruments qu'il emploie. Or, il est bien évident qu'en toute rigueur ceci est inexact, même dans le cas de la simple observation puisqu'on ne peut connaître le monde extérieur que par l'intermédiaire des sensations et que toute sensation suppose toujours une action du monde extérieur sur un des organes de nos sens et par suite un échange d'énergie entre le monde extérieur et notre corps. A plus forte raison dans le cas de l'expérimentation et de la mesure, où il y a inter-

vention active du physicien dans un but déterminé, il n'est pas en toute rigueur licite de négliger l'interaction entre le système examiné et le dispositif employé par celui qui l'examine. Cependant cette objection de principe est en pratique négligeable chaque fois qu'il s'agit de l'étude d'un phénomène de l'échelle macroscopique, c'est-à-dire de l'échelle humaine ou de l'échelle astronomique. Il est certain qu'en dirigeant sa lunette vers un astre pour l'observer, l'astronome modifie le cours de cet astre dans une proportion tout à fait négligeable et même dans les phénomènes qui se jouent sur terre autour de nous, un expérimentateur habile peut toujours parvenir à ne pas troubler appréciablement ce qu'il veut étudier. Mais l'extrapolation du mécanisme physique depuis le domaine macroscopique où il est certainement applicable jusqu'à des domaines de plus en plus petits, où les mesures doivent porter sur des quantités de plus en plus faibles, suppose essentiellement qu'il est possible de faire décroître indéfiniment l'interaction que toute mesure suppose entre le monde extérieur d'une part, les appareils ou les sens de l'expérimentateur d'autre part; sans quoi, il doit arriver un moment où le trouble produit par une opération de mesure devient comparable aux quantités à mesurer et alors on ne saura plus quelle est réellement après la mesure la valeur des grandeurs qu'on a voulu mesurer. C'est ici qu'intervient l'existence du quantum d'action, de la constante h de Planck, dont l'apparition a été un des moments les plus essentiels de l'évolution de la Science contemporaine. L'existence et la valeur finie de cette constante de Planck a pour conséquence qu'il est impossible dans un système de l'échelle atomique de mesurer simultanément avec précision toutes les grandeurs dont la connaissance simultanée et précise serait nécessaire pour une description mécaniste rigoureuse du système. Plus exactement, deux grandeurs qui sont l'une par rapport à l'autre canoniquement conjuguées au sens de la Mécanique analytique, telles par exemple que la coordonnée x d'un corpuscule et la composante suivant l'axe des x de sa quantité de mouvement, ne sont pas simultanément mesurables avec précision. Plus un expérimentateur dirigera son opération de mesure de façon à obtenir une valeur plus exacte de l'une de ces grandeurs, plus par là même,

et sans qu'il puisse l'éviter, l'autre grandeur se trouvera modifiée d'une façon inconnue par l'opération même de la mesure. C'est ce qu'ont montré les fines et profondes analyses de MM. Bohr et Heisenberg. L'existence du quantum d'action lie ainsi à toute opération de mesure une perturbation finie et incontrôlable qui porte sur chaque couple de grandeurs canoniquement conjuguées. Telle est le contenu physique des relations d'incertitude d'Heisenberg. Il faut bien remarquer que cette impossibilité de mesurer avec précision toutes les grandeurs nécessaires à la définition mécaniste d'un système est en toute rigueur valable pour un système macroscopique, mais l'incertitude minimum sur les grandeurs conjuguées étant de l'ordre de la constante de Planck peut être ici rendue tout à fait négligeable par rapport à la valeur même des grandeurs mises en jeu et la conception mécaniste est très approximativement applicable. Pour préciser, nous appellerons désormais « phénomène macroscopique » un phénomène tel que, par rapport aux grandeurs qui y interviennent, la constante de Planck puisse être considérée comme infiniment petite; nous nommerons au contraire « phénomène microscopique » un phénomène se déroulant à une échelle assez fine pour qu'on ne puisse pas faire abstraction de la valeur finie de la constante h. Donc dans le domaine microscopique ainsi défini, la réaction entre l'observateur et la réalité extérieure, dont s'accompagne nécessairement toute observation et toute mesure, modifie profondément les phénomènes très fins que l'on veut étudier. De là l'incertitude d'Heisenberg et l'impossibilité de réaliser pour les phénomènes microscopiques la prévision rigoureuse de l'évolution d'un système à partir d'un état initial connu puisque toutes les grandeurs dont la connaissance simultanée serait nécessaire pour une telle prévision rigoureuse ne peuvent pas être connues à la fois.

Ici se présente une question sur laquelle MM. Bohr et Heisenberg ont plusieurs fois insisté. La physique classique suppose essentiellement qu'il existe une réalité objective pouvant être décrite tout à fait indépendamment des « sujets » qui l'observent. C'est même là, comme M. Bohr l'a finement observé, la raison pour laquelle la Physique classique pouvait prétendre au titre de science exacte. Mais voici que dans la Physique microscopique

contemporaine, on ne peut plus séparer nettement le phénomène observé ou mesuré de la méthode d'observation et de mesure. Le microcosme n'est pas une réalité objective pouvant être conçue ou décrite par l'homme indépendamment des procédés qui lui permettent de la connaître. Ou bien nous ne faisons aucune tentative pour suivre l'évolution du microcosme et alors cette évolution nous reste inconnue et n'est pas objet de science, ou bien nous cherchons à connaître cette évolution, mais alors nous la modifions d'une manière incontrôlable qui dépend d'ailleurs des éléments que nous cherchons à préciser. M. Bohr en a conclu que la physique des quanta atténue ou rend plus incertaine la distinction entre le subjectif et l'objectif. Peut-être y a-t-il là une sorte d'abus de mot. En réalité, les moyens d'observation, les instruments de mesure et même les organes de nos sens appartiennent à l'ordre objectif et le fait que dans la Physique microscopique on ne puisse plus négliger leurs réactions sur les portions du monde extérieur que nous voulons étudier, ne saurait aucunement abolir ni même atténuer la distinction traditionnelle de l'objectif et du subjectif. Si l'on voulait traduire en termes plus exacts la pensée de Bohr, il faudrait l'exprimer, me semble-t-il, de la façon suivante: tandis que la Physique classique trace une coupure artificielle entre une partie du monde objectif qualifiée de « réalité extérieure » tout à fait indépendante des « sujets » qui observent et une autre partie du monde objectif, instruments de mesure ou organes des sens, qui servirait aux dits sujets à connaître et à étudier quantitativement sans la modifier cette réalité extérieure, la Physique quantique montre le caractère artificiel d'une telle coupure et prouve qu'une description de la réalité physique tout à fait indépendante des moyens dont nous disposons pour l'observer est en toute rigueur impossible. Ainsi la nouvelle Physique microscopique ne peut-elle prétendre qu'à relier (et encore nous verrons que c'est seulement par des prévisions de nature statistique) les résultats d'une constatation expérimentale à ceux d'une autre constatation expérimentale postérieure, chaque constatation introduisant des modifications inconnues. Par là se trouve diminué le degré de détermination causale dont nous pouvons, par la recherche scientifique, prouver l'existence dans le monde objectif.

Dans le même ordre d'idée, M. Bohr a remarqué que le genre de trouble apporté par l'observation au phénomène à observer dans la Physique microscopique présente une certaine analogie avec la difficulté que l'on éprouve en Psychologie quand on veut faire une étude objective des phénomènes psychologiques par la méthode dite d'introspection. La grosse difficulté que rencontre le psychologue quand il veut faire de l'introspection, la difficulté qui enlève aux résultats de ses investigations le caractère de science exacte, c'est l'impossibilité d'appliquer son attention à l'évolution d'un processus mental sans déformer par là même ce processus ou même l'arrêter complètement. Pour prendre un exemple d'un ordre plutôt psychophysiologique, si l'on cherche à noter par introspection les phases psychologiques qui accompagnent le passage de l'état de veille à l'état de sommeil, le résultat est toujours décevant: on n'observe rien du tout car on ne parvient pas à s'endormir. L'attention qu'on a voulu porter sur le phénomène de l'assoupissement progressif a empêché le phénomène même de se produire.

* * *

Ce que je viens de vous dire suffit, je crois, à faire comprendre comment la conception mécaniste de la Physique est venue se heurter dans le monde microscopique à l'impossibilité de tracer une image du fonctionnement de l'univers physique qui soit indépendante des perturbations introduites par l'observation et la mesure. Je voudrais maintenant vous montrer comment l'autre conception fondamentale sur laquelle reposait la science classique, la conception de la continuité des phénomènes naturels permettant de leur appliquer l'analyse infinitésimale a été aussi ébranlée par les progrès de la Physique quantique.

Nous avons dit déjà que la valeur finie de la constante h avait comme conséquence l'impossibilité de connaître simultanément avec précision les valeurs de deux variables canoniquement conjuguées. Or que sont au point de vue physique ces couples de variables que l'on nomme canoniquement conjuguées ? Si l'on examine ces couples de variables, on s'aperçoit qu'il y en a toujours une qui sert à la description en termes d'espace et de temps du système envisagé tandis que l'autre sert à la spécifi-

cation de son « état dynamique ». Les relations d'incertitude d'Heisenberg en affirmant que nous ne pouvons pas, à cause de la valeur finie de la constante h, connaître simultanément avec précision les couples de variables conjuguées nous apprennent en somme que la description complète d'un système mécanique en termes d'espace et de temps n'est pas compatible dans notre science avec la spécification exacte de l'état dynamique.

Peut-être cette impossibilité de préciser simultanément la localisation spatio-temporelle et l'état dynamique peut-elle être rattachée à l'une des inquiétudes de la pensée Antique. Considérons une flèche dans sa course, disait Zénon d'Elée; à chaque instant, elle est immobile dans une certaine position; comment dès lors peut-elle accomplir un certain trajet ? Comment le mouvement peut-il être fait d'une suite d'immobilités ? Aux yeux de la science moderne toute imprégnée, avant l'apparition des quanta, de l'idée de continuité, l'argument de la flèche de Zénon paraîssait quelque peu puéril. La considération des positions infiniment voisines d'un mobile permet en effet de définir la vitesse par le même raisonnement qui sert à établir l'existence de la dérivée d'une fonction continue: la vitesse n'est en somme que la dérivée par rapport au temps de la position. Alors, dans la Mécanique classique, tandis que les coordonnées à un instant t d'un mobile ou plus généralement d'un système mécanique définissent la localisation spatio-temporelle, les dérivées des coordonnées par rapport au temps servent à définir l'état de mouvement, la tendance dynamique. La considération des positions infiniment voisines et du mouvement uniforme instantané qui permet de passer de l'une à l'autre paraît ainsi permettre de réfuter entièrement l'objection de Zénon. Mais cette réfutation repose sur l'hypothèse de la continuité des phénomènes physiques et se trouve ébranlée par l'introduction dans l'univers physique d'un élément de discontinuité comme celui qui est impliqué dans l'existence du quantum d'action. Sans vouloir faire de Zénon un précurseur de M. Heisenberg et sans oublier le rôle que joue actuellement dans la question la valeur finie de la constante de Planck, on peut donc dire que l'impossibilité révélée par les théories récentes d'attribuer à la fois à un mobile une localisation spatio-temporelle exacte et un état

dynamique entièrement défini semble se rattacher à une difficulté conceptuelle depuis longtemps aperçue. Pour reprendre un mot de M. Bohr, la localisation exacte dans l'espace et le temps est une « idéalisation », la conception d'un état de mouvement parfaitement défini en est une autre et ces deux idéalisations « complémentaires » qui sont très approximativement compatibles à l'échelle macroscopique ne le sont plus en toute rigueur à l'échelle microscopique.

Les conséquences de l'abandon de la continuité impliqué dans l'introduction du quantum d'action se sont montrées clairement dès l'apparition de la théorie de l'atome de Bohr sous sa forme primitive. Dans cette théorie, l'atome est considéré comme un système solaire en miniature et l'on cherche à préciser les éléments quantitatifs de ce système solaire. Mais l'introduction de la quantification de l'atome qui s'est montrée nécessaire pour mettre la théorie en accord avec les faits, a obligé M. Bohr à admettre que le système solaire en question n'est susceptible que d'un certain nombre d'états « stationnaires » dont les énergies forment une suite discrète. Le passage d'un état stationnaire à un autre qui s'accompagne d'une émission de radiation doit être regardé comme une transition brusque échappant à toute description. Ici pour la première fois dans la Science moderne est apparue l'idée qu'il existe une incompatibilité radicale entre la conception d'un état dynamique stationnaire caractérisé par une valeur bien déterminée de l'énergie et la description en termes d'espace et de temps. Cette incompatibilité s'est révélée encore plus profonde quand le développement de la nouvelle Mécanique est venue montrer que les positions et les vitesses des électrons-planètes dans le modèle de Bohr n'ont pas d'existence réelle et qu'en vérité non seulement les transitions entre états stationnaires mais les états stationnaires eux-mêmes échappent à toute tentative de description spatio-temporelle. L'état stationnaire, c'est-à-dire l'état énergétique stable et bien défini, est une idéalisation qui à l'échelle atomique n'est plus compatible avec celle qu'implique l'idée d'une description dans le cadre de l'espace et du temps.

En même temps s'est avéré une sorte de caractère kaléidoscopique du monde envisagé dans sa structure fine. Des observa-

tions successives faites sur un même atome nous le montreront toujours dans des états stationnaires sans que nous puissions jamais le saisir dans un état intermédiaire entre deux états stationnaires. La Physique atomique ne pouvant mettre en évidence que des valeurs discrètes de l'énergie paraît devoir renoncer à la continuité et se borner à dégager les lois nécessairement statistiques qui président aux sauts d'une valeur à une autre. Je dis que ces lois sont nécessairement statistiques car la détermination causale en Physique paraît bien liée à l'idée que les transformations s'opèrent continûment dans le cadre de l'espace et du temps et semble devoir disparaître avec elle. La nouvelle Physique cherchera donc, étant donné un système dans un état stationnaire initial, à calculer les probabilités pour que ce système soit trouvé à une époque ultérieure dans tel ou tel autre état stationnaire.

La conception nouvelle issue de la considération des états atomiques stationnaires à énergies quantifiées à été étendue par les récentes méthodes mécaniques de manière à s'appliquer non seulement à la grandeur « énergie » mais à toutes les autres grandeurs physiques mesurables. La mesure exacte de l'une quelconque de ces grandeurs conduit toujours à une valeur déterminée, mais les valeurs trouvées pour une même grandeur par des mesures successives ne sont reliées les unes aux autres que par des lois de probabilités. Pour bien comprendre cette question, il faut maintenant envisager la façon dont le « dualisme » des corpuscules et des ondes s'est introduit dans la théorie physique moderne. Plus les expérimentateurs sont parvenus à affiner leurs méthodes d'investigation dans le domaine atomique et microscopique, plus il est apparu que les résultats de leurs expériences s'expriment tout naturellement en attribuant à la réalité physique une structure discontinue, en y distinguant des unités discrètes, les unes complexes comme la molécule ou l'atome, les autres simples (ou provisoirement simples) comme le proton, l'électron ou le photon. Le résultat d'une mesure précise s'énonce toujours en attribuant certaines valeurs à quelques-unes des grandeurs qui caractérisent ces unités physiques discrètes. Que les résultats de l'expérimentation fine amènent toujours à considérer des corpuscules ou des systèmes

autonomes de corpuscules comme les atomes, c'est ce qui est depuis longtemps certain pour la matière, mais l'analyse des réactions entre matière et rayonnement a montré aussi plus récemment qu'il en était de même pour la lumière et a amené à considérer des corpuscules de lumière ou photons.

Finalement c'est donc sous la forme corpusculaire que s'énoncent tous les résultats de la Physique expérimentale microscopique: c'est là un fait dont on ne peut faire abstraction. Mais ces corpuscules élémentaires ou ces systèmes autonomes de corpuscules que la recherche expérimentale permet d'isoler dans la réalité physique, nous ne pouvons jamais arriver à les décrire complètement à la façon classique en les localisant exactement dans l'espace à un instant donné et en leur attribuant simultanément un état dynamique bien défini. Ce fait lié, nous l'avons vu, à l'impossibilité d'observer la réalité sans la troubler, s'exprime par les relations d'incertitude d'Heisenberg et est une conséquence de l'existence du quantum d'action. Mais alors puisque nous ne connaissons jamais tous les éléments qui nous seraient nécessaires au point de vue du Mécanisme universel pour prédire l'évolution future d'un corpuscule ou d'un atome, quel genre de prévision, ou si vous préférez quelle science, reste possible ? C'est ici que les ondes interviennent. Le développement de la Mécanique ondulatoire a en effet conduit à associer à chaque corpuscule ou système de corpuscules une onde dont la nature s'est révélée progressivement plutôt symbolique. Après chaque mesure qui nous a fourni sur un corpuscule ou un système de corpuscules des renseignements nécessairement incomplets à cause de l'incertitude d'Heisenberg, nous pouvons associer à ce corpuscule ou à ce système une certaine onde qui représente en quelque sorte nos connaissances, y compris l'incertitude dont elles sont affectées. On peut ensuite suivre d'une façon rigoureuse l'évolution de cette onde au cours du temps à l'aide des équations de propagation de la nouvelle Mécanique et la forme de l'onde à une certaine époque ultérieure nous permet de prévoir quels sont les résultats possibles de la mesure d'une grandeur mécanique quelconque faite à cette époque et les probabilités respectives de ces divers résultats possibles. Ainsi l'évolution des probabilités à partir de la première mesure obéit à un déter-

minisme rigoureux symbolisé par la propagation de l'onde, mais il n'en résulte pas en général un déterminisme rigoureux des apparences corpusculaires décelées directement par l'investigation microscopique. De plus, chaque nouvelle mesure introduisant un élément nouveau et inconnu, le calcul entier de l'évolution de l'onde doit être repris après chaque mesure: il n'y a pas lieu de s'en étonner puisque l'onde représente les probabilités et que chaque mesure, en nous fournissant des renseignements nouveaux, bouleverse évidemment l'état des probabilités.

Bref, l'aspect corpusculaire des phénomènes miscroscopiques est celui qui se présente naturellement dans l'expérience: si l'on pouvait mesurer à la fois tous les éléments impliqués dans l'idée classique des corpuscules on parviendrait sans doute à une description mécaniste et déterministe du microcosme analogue à celle qu'avait tentée la théorie primitive de Bohr. Mais comme nous le savons maintenant, la connaissance simultanée des éléments spatio-temporels et des éléments dynamiques est rendue impossible par l'existence du quantum d'action de sorte que la succession des états observables rapportée à l'image corpusculaire nous apparaît comme discontinue et acausale. La considération des ondes permet de rétablir la continuité et le déterminisme entre deux mesures consécutives, mais seulement en ce qui concerne l'évolution des probabilités. La Mécanique nouvelle, en s'appuyant sur ces idées, a d'ailleurs pu aisément expliquer comment, dans le domaine macroscopique où la constante h est sensiblement négligeable, l'on retrouve la continuité apparente et le déterminisme et l'on peut concilier l'idéalisation spatio-temporelle avec l'idéalisation des états dynamiques. Autrement dit, on a pu démontrer qu'en passant du microcosme au macrocosme, la Physique quantique tend asymptotiquement vers la Physique classique.

J'ajouterai encore une remarque. Lorsqu'on étudie l'évolution d'une seule unité physique, corpuscule ou atome, l'onde associée symbolise les probabilités de localisation et d'état dynamique de cette unité; mais si l'on a affaire à un très grand nombre d'unités identiques, l'onde représente alors la répartition statistique de cet ensemble d'unités. Considérons par exemple les expériences de l'optique classique: envisagées de notre point

de vue actuel, ces expériences apparaissent comme mettant en jeu un grand nombre de photons sans réussir à déceler l'existence de chacun d'eux; elles permettent seulement d'étudier la répartition statistique des photons, répartition qui est représentée par l'onde associée, c'est-à-dire par l'onde lumineuse classique. Telle est la raison profonde pour laquelle l'optique classique a pu se passer de la notion de corpuscule et considérer uniquement l'onde. La même circonstance se présente d'ailleurs dans les expériences récentes de diffraction des électrons, expériences dont le résultat peut se décrire uniquement au moyen de l'onde associée à l'électron sans aucune intervention de la conception corpusculaire de l'électron. On comprend ainsi comment l'onde malgré son caractère symbolique peut dans certaines expériences portant sur un grand nombre de corpuscules apparaître comme *étant* la réalité physique.

* * *

Résumons maintenant l'ensemble des idées développées jusqu'ici. A l'échelle microscopique la réalité physique se révèle comme formée d'unités présentant des avatars successifs avec transitions brusques, avatars dont la description ne peut se faire avec l'aide de l'analyse infinitésimale dans le cadre de la continuité et du déterminisme. Mais l'aspect statistique de ces transformations kaléidoscopiques se laisse, lui, décrire à la manière classique par l'artifice des ondes associées. Quand on s'élève au monde macroscopique où la constante de Planck cesse d'avoir une influence appréciable, le caractère discontinu des phénomènes individuels disparait, noyé pour ainsi dire dans la statistique; les descriptions complémentaires et en quelque sorte inconciliables par corpuscules et par ondes, par localisation spatio-temporelle et par état dynamique, viennent se rejoindre et se fondre dans le moule harmonieux et rigide de la Physique classique.

Peut-être est-il intéressant de remarquer que l'existence et la valeur finie de la constante de Planck introduit une différence essentielle entre le microcosme et le macrocosme. L'idée que le monde physique est semblable à lui-même à toutes les échelles, que l'infiniment petit est une réduction quasiment homothétique

de l'infiniment grand, se retrouve comme un leitmotiv dans les écrits des penseurs et les théories des savants. Le génie de Pascal a su exprimer cette idée en des termes émouvants 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 cette conception, à la lumière des théories récentes, nous apparait comme, en principe, inexacte. Les images qui suffisent pour la description du macrocosme sont inadéquates pour celle du microcosme. Quand descendant l'échelle des grandeurs, le physicien aborde le monde atomique, le monde des corpuscules, 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, en permettant de définir et d'opposer l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique, a pour effet que, dans le monde physique, l'infiniment petit n'est pas une réduction homothétique de l'infiniment grand.

* * *

Faut-il aller plus loin et croire, comme M. Bohr paraît le suggérer, que les conceptions nouvelles de la Physique contemporaine permettront de comprendre pourquoi les méthodes classiques de la science objective paraissent s'adapter malaisément aux phénomènes de l'ordre vital et de l'ordre moral de telle sorte que la Physique microscopique servirait d'intermédiaire entre la réalité physique macroscopique, où Mécanisme et Déterminisme sont valables, et d'autres domaines plus subtils où ces mêmes conceptions seraient sinon fausses, du moins inutilisables ? Restant dans mon rôle de physicien, je ne tenterai point de répondre à cette question. Je me bornerai à conclure que la découverte des quanta dont les conséquences commencent seulement à nous apparaître dans toute leur ampleur, semble bien exiger de la part de la pensée scientifique un des changements d'orientation les plus importants qu'elle ait eu à effectuer au cours de son long et séculaire effort pour plier, autant qu'il est possible, notre tableau du monde physique aux exigences de notre raison.