



DÉTERMINISME ET CAUSALITÉ DANS LA PHYSIQUE CONTEMPORAINE

Dans le présent article nous nous proposons de donner un rapide aperçu de la crise que subit dans la physique contemporaine la notion du déterminisme des phénomènes naturels. On sait en quoi consiste l'idée du déterminisme : connaissant exactement l'état présent du monde physique, il serait possible d'en déduire toute la suite de ses états futurs. En langage mathématique, le déterminisme s'exprime en disant que les phénomènes de la Nature sont régis par des équations différentielles dont les solutions sont entièrement déterminées quand on connaît leurs valeurs et celles de certaines de leurs dérivées à un certain instant initial. Par exemple, le mouvement d'un point matériel dans un champ de force donné est entièrement connu quand on connaît sa position initiale et sa vitesse initiale. Cette doctrine du déterminisme universel a été magnifiquement résumée par Laplace dans sa célèbre phrase : « 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 les mouvements 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 ».

Si l'on fait abstraction du développement de la théorie des quanta, les progrès de la Physique depuis cinquante ans auraient plutôt contribué à préciser et à fortifier notre conception de la causalité rigoureuse en nous apprenant que la matière est formée de corpuscules, individus physiques de très petites dimensions chargés électriquement (électrons et protons) dont les assemblages

constituent les atomes des corps matériels et dont les mouvements donnent naissance aux phénomènes électriques. Comme on connaît l'expression des forces que les corpuscules élémentaires exercent les uns sur les autres et qu'on croyait pouvoir appliquer aux mouvements de ces corpuscules les lois rigoureuses de la Dynamique du point matériel, on arrivait ainsi à l'idée d'une matière formée par des individus nettement localisés et au mouvement bien défini dont l'évolution se trouvait déterminée avec une inéluctable nécessité par le jeu des interactions.

Évidemment cette résolution en individus élémentaires ne paraissait pas s'opérer aussi facilement pour le champ électromagnétique et la lumière que pour la matière. Néanmoins la découverte des phénomènes où les corpuscules de lumière semblent affirmer leur existence pouvait faire espérer qu'en dernière analyse il serait possible d'assimiler l'ensemble du monde physique à un vaste système de points matériels régis par des lois rigoureuses. Et, de toute façon, même en admettant que la lumière ne puisse pas se résoudre en individus, personne ne doutait que les phénomènes lumineux ne fussent soumis au déterminisme.

Mais l'aspect de la question s'est beaucoup modifié depuis un petit nombre d'années. La découverte des phénomènes où interviennent les quanta avait déjà jeté un doute sur la validité des idées qui jusqu'ici avaient guidé les théoriciens. Bohr, en développant sa théorie de l'atome, avait conservé l'image classique d'un électron ponctuel décrivant une orbite à l'intérieur de l'atome, mais il avait dû de plus introduire cette étrange limitation qui s'exprime en disant : « seuls sont stables et physiquement possibles les mouvements de l'électron qui correspondent à certaines valeurs de son énergie ». Quand l'électron sur sa trajectoire possède une de ces énergies privilégiées, l'atome est dans un état stationnaire ; mais, de temps à autre et brusquement, l'électron passerait d'un état stable à un autre état stable et la description spatio-temporelle de ces transitions brusques auxquelles est liée l'émission spectrale de l'atome a dès l'origine de la théorie paru très difficile. Bohr a depuis plusieurs années émis l'opinion qu'une véritable description causale dans le cadre classique de l'espace-temps lui paraissait impossible pour les phénomènes de l'échelle atomique.

Depuis, sont venues au jour ces doctrines nouvelles qu'on désigne sous le nom de Mécanique quantique ou de Mécanique ondu-

toire et, par suite de leur développement, les physiciens en sont arrivés aujourd'hui à douter du déterminisme rigoureux des phénomènes naturels et à se faire des individus physiques constituant la matière une idée très différente de l'ancienne et, il faut l'avouer, moins claire qu'elle. Ce sont ces points de vue nouveaux que nous allons nous efforcer de résumer.

*
*
*

L'idée primitive de la Mécanique ondulatoire est la suivante : le mouvement d'un corpuscule ne peut être véritablement décrit qu'en lui associant la propagation d'une onde ; ou, si l'on préfère, le phénomène physique que nous interprétons comme le mouvement d'un corpuscule traduit en réalité une certaine propagation d'ondes. On a pu tout d'abord espérer que cette idée fondamentale, fortement suggérée par l'étude des phénomènes quantiques et grâce à laquelle l'existence des états stationnaires dans l'atome trouve une interprétation simple, pourrait être développée dans le cadre des conceptions classiques. Voici comment on pouvait être tenté de le faire.

Considérons un train d'ondes, c'est-à-dire un phénomène ondulatoire de dimensions limitées, et supposons que ces dimensions, quoique grandes par rapport aux longueurs d'onde mises en jeu, soient petites par rapport à notre échelle usuelle. Ces hypothèses, qui n'ont rien de contradictoire, permettent de considérer l'étendue du train d'ondes comme négligeable et de l'assimiler à un point ; d'autre part, elles permettent aussi de considérer le train d'ondes comme monochromatique, c'est-à-dire de lui attribuer une seule fréquence et une seule longueur d'onde. Or, la nouvelle Mécanique assigne aux ondes qu'elle imagine des lois de propagation telles que le petit train d'ondes en question se déplace comme le fait un corpuscule dans l'ancienne Dynamique ; du moins ceci est-il vrai chaque fois que les ondes se propagent dans les conditions où l'optique géométrique est valable ou, ce qui revient au même, chaque fois que les dimensions de la trajectoire sont grandes par rapport aux dimensions du train. Les grandeurs mécaniques caractérisant le mouvement du corpuscule, l'énergie et la quantité de mouvement, sont alors reliées simplement à la fréquence et à la longueur d'onde du train

d'ondes. Nous obtenons ainsi une image physique simple du corpuscule : il serait constitué par une région d'excitation mobile, siège d'un phénomène vibratoire, région dont les dimensions seraient grandes comparées à la longueur d'onde, mais très petites à l'échelle humaine. Lorsque l'optique géométrique n'est plus suffisante pour prévoir la propagation du train d'ondes ou, si l'on veut, quand les dimensions des trajectoires prévues par l'ancienne Mécanique sont de l'ordre des dimensions du train d'ondes, alors les anciennes lois dynamiques ne peuvent plus s'appliquer, car il n'y a plus mouvement d'ensemble du train d'ondes le long d'une courbe, mais mouvements intestins dans le train d'ondes. Or, précisément pour les électrons, les longueurs d'onde des ondes associées sont prévues par la nouvelle théorie comme devant être de l'ordre des dimensions atomiques. Si les électrons sont constitués par des trains d'ondes, ils se comporteront bien comme des points matériels classiques pour les mouvements à notre échelle (déviation des rayons cathodiques par exemple) ; mais, dans l'atome, il ne sera plus possible de leur attribuer une orbite. Dans le domaine atomique, on serait à l'intérieur du train d'ondes, c'est-à-dire à l'intérieur de l'électron dont la charge électrique serait disséminée dans tout l'atome : les états stationnaires de Bohr correspondraient à des vibrations stables s'opérant à l'intérieur de cet électron diffus.

Jusqu'ici nous n'avons rencontré aucune idée qui ne soit conforme aux grandes lignes des conceptions classiques. Le phénomène ondulatoire substitué aux corpuscules par la nouvelle théorie serait un phénomène physique localisé dans l'espace et dans le temps, peut-être relié à la structure géométrique locale de l'espace-temps. Ce phénomène ondulatoire décrit par les équations aux dérivées partielles de la nouvelle Mécanique obéirait aux lois du déterminisme causal, car une solution des dites équations est bien définie quand on connaît sa valeur initiale et éventuellement celle de certaines de ses dérivées.

Malheureusement cette hypothèse séduisante d'après laquelle le train d'ondes *constituerait* le corpuscule ne résiste pas à un examen sérieux et n'est pas en accord avec les faits. Tout d'abord on peut montrer qu'un train d'ondes doit toujours, d'après les lois de propagation de la nouvelle Mécanique, s'épanouir en se propageant, de sorte que, si le train d'ondes constituait le corpuscule, le

corpuscule s'étalerait progressivement et n'aurait donc pas une existence stable. D'autre part, l'expérience a apporté une précieuse confirmation directe des idées fondamentales de la Mécanique ondulatoire grâce à la découverte du phénomène de la diffraction des électrons par les cristaux (Davisson et Germer, G.-P. Thomson). Quand un faisceau d'électrons de même vitesse tombe sur un cristal, un certain nombre d'entre eux sont renvoyés en arrière; les électrons ainsi réfléchis ne sont pas répartis uniformément entre les azimuts, mais sont concentrés dans des directions bien définies, tout comme la lumière diffractée par un réseau est concentrée dans certaines directions. Or nous savons bien, depuis les mémorables expériences de Laue sur les rayons X, que les cristaux, en raison de leur structure régulière, jouent le rôle de réseaux pour les ondes dont la longueur d'onde est de l'ordre de 10^{-8} cm. Le phénomène observé avec des électrons s'explique donc en admettant que la dynamique des électrons employés est régie par la propagation d'une onde dont la longueur d'onde est de l'ordre de 10^{-8} cm. Ceci est tout à fait en accord avec les idées générales de la Mécanique ondulatoire, et l'accord est même quantitatif, car la longueur d'onde mesurée est bien celle que prévoient les formules de la nouvelle Dynamique. Ces expériences cruciales apportent donc la preuve que le mouvement des électrons ne peut se décrire que par une propagation d'ondes, mais leur résultat est en complète opposition avec l'idée que les électrons sont constitués par de petits trains d'ondes. En effet, un tel train d'ondes serait éparpillé par l'action du cristal, et l'électron serait pour ainsi dire dissous par la diffraction. Pour prévoir correctement le phénomène réel, il faut considérer le faisceau des électrons incidents comme une onde plane et calculer les directions de diffraction comme on le fait dans la théorie classique des réseaux en optique; ceci prouve que l'onde incidente représente, non pas un électron déterminé, mais bien l'ensemble statistique du faisceau incident ou, si l'on préfère, l'ensemble des positions possibles d'un électron dans le faisceau incident. Dans l'expérience fondamentale qui la première a prouvé directement la nécessité de considérer les ondes associées aux électrons, l'assimilation de l'électron à un petit train d'ondes se montre donc insuffisante.

Les considérations qui précèdent et certaines autres encore

nous induisent à renoncer à l'idée d'un électron formé par un train d'ondes et nous inclinent à penser que l'onde a plutôt un sens statistique et représente une probabilité. On peut néanmoins essayer de conserver l'idée classique que le corpuscule a à chaque instant une position et un mouvement bien déterminés; mais les tentatives faites dans ce sens, notamment par l'auteur, se heurtent à d'assez graves objections, et la tendance actuelle des théoriciens est d'admettre une interprétation toute différente du rapport des ondes et des corpuscules, interprétation qui nous oblige à renoncer au déterminisme rigoureux et à remanier profondément notre conception des individus physiques.

..

Les promoteurs de la nouvelle interprétation (en première ligne W. Heisenberg et N. Bohr) sont partis de la remarque que, pour déterminer la position ou l'état de mouvement d'un corpuscule (ou d'un système de corpuscules) il est nécessaire d'établir une interaction entre ce corpuscule (ou ce système) et le monde extérieur dont fait partie l'observateur. Mais qui dit interaction, dit perturbation; d'où la conclusion qu'en observant on trouble toujours un peu ce que l'on veut observer. En approfondissant et en critiquant les diverses méthodes de mesure pouvant fournir la position ou l'état de mouvement d'un corpuscule, Heisenberg est parvenu à la conclusion suivante: indépendamment des erreurs accidentelles dues à l'imperfection de nos mesures, une observation ne peut pas, par suite d'une loi fondamentale de la Nature, nous permettre de déterminer à la fois, avec une précision parfaite, la position et l'état de mouvement d'un corpuscule. Plus la détermination d'une des coordonnées du corpuscule sera faite avec précision, moins exactement sera connue la composante correspondante de la vitesse et inversement; de même on ne peut augmenter la précision avec laquelle on mesure l'instant du passage d'un corpuscule en un point de l'espace qu'au détriment de la précision avec laquelle est connue l'énergie de ce corpuscule et inversement. Cette limitation réciproque de l'exactitude des déterminations pour les positions et les mouvements s'exprime par des relations précises, les relations d'incertitude d'Heisenberg, où figure la constante de Planck; la forme exacte de ces relations ne

nous importe pas ici. Bien entendu, aux incertitudes d'Heisenberg imposées par la nature des choses s'ajoutent en général les erreurs expérimentales au sens usuel du mot.

Les relations d'incertitude que l'on peut, avec Heisenberg, déduire d'une critique des méthodes de mesure correspondent exactement à la double nature corpusculaire et ondulatoire que la nouvelle mécanique attribue aux individus physiques. En effet, remarquons d'abord que, pour rendre compte des phénomènes optiques d'interférences et de diffraction et des nouveaux phénomènes de diffraction des électrons par les cristaux, il est nécessaire d'admettre que le carré de l'amplitude ou « intensité » de l'onde associée à un corpuscule mesure en chaque point la probabilité de trouver le corpuscule en ce point. Maintenant, la Mécanique ondulatoire fait correspondre au mouvement uniforme d'un corpuscule la propagation d'une onde plane monochromatique et indéfinie dont la fréquence et la longueur d'onde sont reliées très simplement à l'énergie et à la quantité de mouvement du corpuscule. Une telle onde plane est homogène, rien n'y distingue un point d'une autre, de sorte que si le mouvement du corpuscule est, lui, bien défini, sa position est entièrement indéterminée. Si, au contraire, l'onde associée à un corpuscule n'est pas une onde indéfinie, mais un train d'ondes limité, la position sera mieux définie puisque le corpuscule doit se trouver à l'intérieur du train d'ondes. Mais la théorie des ondes nous apprend qu'un train d'ondes est équivalent à une superposition d'ondes monochromatiques planes dont les amplitudes se compensent par interférence en dehors des limites du train ; de plus, le domaine spectral correspondant à cet ensemble d'ondes monochromatiques est d'autant plus étendu que les dimensions du train d'ondes sont plus petites. Donc, si on fait correspondre à chaque onde monochromatique un état de mouvement bien défini, chacune des composantes monochromatiques du train d'ondes correspondra à un mouvement possible du corpuscule et il y aura sur l'état de mouvement une incertitude d'autant plus grande que la position sera mieux connue et inversement. Traduit en formules, ceci donne les relations d'Heisenberg.

Réfléchissons aux conséquences de ces nouvelles conceptions. Il est impossible de conserver du corpuscule, de l'individu physique élémentaire, l'image simple d'un petit objet, inétendu

ou peu étendu, ayant une position et une vitesse bien définies. Il est aussi impossible de lui attribuer une évolution dans le temps parfaitement déterminée par les conditions initiales de position et de mouvement, puisque ces conditions initiales ne peuvent jamais être exactement connues. Quant à l'onde de la nouvelle Mécanique, ce n'est plus une réalité physique, un phénomène vibratoire se jouant réellement dans l'espace, c'est seulement une représentation symbolique des positions et des états de mouvement d'un corpuscule. Voilà qui doit modifier profondément non seulement l'idée classique du déterminisme causal, mais la manière même dont la science peut décrire l'évolution des phénomènes naturels.

Voyons, en effet, ce que, d'après le nouveau point de vue, la physique serait capable de prévoir. Une observation ou expérience quelconque, faite pour déterminer la position et le mouvement d'un corpuscule, donne des résultats affectés d'une incertitude au moins égale à l'incertitude d'Heisenberg. Il sera donc possible, d'après ce que nous avons dit plus haut, de représenter l'état de nos connaissances sur le corpuscule après l'observation par un certain train d'ondes dont les dimensions spatiales représentent l'incertitude en position et dont la décomposition spectrale donne l'incertitude sur les états de mouvement. L'équation de propagation des ondes en Mécanique ondulatoire permet alors de suivre l'évolution de l'onde jusqu'à l'époque t où a lieu une seconde expérience ou observation. Connaissant la forme de l'onde et sa composition spectrale au temps t , on peut dire quelle est la probabilité de trouver à cette époque le corpuscule dans telle position et aussi quelle est la probabilité de lui trouver alors tel état de mouvement. Lorsque la deuxième observation aura été faite, on possédera de nouveaux renseignements sur le corpuscule plus précis que ceux fournis par l'onde qui, jusque-là, représentait l'évolution de la probabilité. On aura alors un nouvel état initial de probabilité; on s'en servira pour construire une nouvelle onde et pour étudier à son aide l'évolution ultérieure de la probabilité jusqu'à une troisième observation et ainsi de suite.

Avec cette manière de voir, on ne peut donc plus attribuer au corpuscule à tout instant une position et une vitesse, ni lui assigner un mouvement régi par des lois rigoureuses. Ce que la

nouvelle Mécanique détermine rigoureusement par ses équations aux dérivées partielles à partir d'un état initial, ce ne sont pas les événements futurs, c'est la probabilité de ces événements futurs. Quand le corpuscule manifeste son existence en produisant un effet mesurable, il choisit en quelque sorte entre plusieurs hypothèses possibles ; par exemple, il peut manifester sa présence ici ou là à l'intérieur du train d'ondes associé. Mais chaque fois qu'un choix a été fait, les possibilités futures sont par là même restreintes et entièrement déterminées. C'est pourquoi, bien que les promoteurs de ces nouvelles conceptions parlent d'un libre arbitre de la Nature (Dirac), ce libre arbitre est limité et il y a encore des lois physiques ; mais ce ne sont plus des lois causales, ce sont des lois de probabilité.

Un point important c'est de montrer comment l'on peut concilier une telle interprétation de la Mécanique nouvelle avec le déterminisme en apparence rigoureux qui règne à notre échelle. La raison essentielle en est que la longueur d'ondes associée à un corpuscule dans les conditions usuelles est très petite par rapport à ce que nous pouvons mesurer. Une observation bien faite pourra alors nous fournir sur la position et le mouvement du corpuscule des renseignements qui, tout en étant conformes aux relations d'Heisenberg, pourront se représenter par un train d'ondes de dimensions négligeables à notre échelle. Or, on peut démontrer (théorème d'Ehrenfest) que ce petit train d'ondes se déplace en bloc comme devrait le faire, d'après l'ancienne Dynamique, un corpuscule placé dans les mêmes conditions extérieures.

C'est précisément ce fait qui rendait tentant de dire que le train d'ondes *constituait* le corpuscule ; mais nous avons vu que cela n'est guère possible à admettre. Avec le nouveau point de vue, le petit train d'ondes ne constitue pas le corpuscule ; le corpuscule est ponctuel ; nous ignorons sa position, mais nous savons cependant qu'il ne peut se manifester qu'à l'intérieur du train d'ondes. Alors, comme nous ne pouvons pas expérimentalement discerner l'un de l'autre deux points intérieurs au train d'ondes et comme celui-ci suit la trajectoire imposée au point matériel par l'ancienne Dynamique, tout se passe pratiquement comme si le corpuscule avait une position bien définie à chaque instant et obéissait aux anciennes lois du mouvement. L'incertitude d'Heisenberg et

l'indéterminisme qui en résulte sont, en somme, dans ce cas, masqués par l'imperfection de nos mesures.

Ainsi donc nous retrouvons bien le déterminisme apparent des phénomènes de l'échelle macroscopique. Mais, à l'échelle atomique, l'impossibilité d'assigner à la fois une position et un état énergétique aux corpuscules a une grande importance et nous empêche de construire une image claire des événements dans le cadre de l'espace-temps. Dès l'instant où l'on attribue à l'atome un état stable d'énergie bien déterminé, on exclut par là même, d'après les relations d'Heisenberg, toute possibilité de décrire la configuration de l'atome dans cet état stable; d'ailleurs, toute tentative pour déterminer cette configuration troublerait complètement l'état stable. Attribuer aux corpuscules une énergie bien déterminée est la seule manière de pouvoir appliquer le principe de la conservation de l'énergie; leur attribuer une position est la seule manière de nous les représenter clairement. Malheureusement ces deux points de vue « complémentaires » approximativement compatibles à grande échelle ne le sont plus à l'échelle atomique : là est, selon Bohr, la véritable cause des difficultés de représentation auxquelles on se heurte dans l'étude des phénomènes atomiques.

Notons encore un point. Dans le cas où l'on a affaire non pas à un seul corpuscule se déplaçant dans un champ de force donné mais à un ensemble de corpuscules en réaction les uns avec les autres, le caractère symbolique de l'onde se trouve encore accentué, car on ne peut plus considérer l'onde comme se propageant dans l'espace ordinaire; la propagation doit être imaginée comme s'effectuant dans un « espace de configuration » à caractère abstrait. Cette onde continue à représenter symboliquement l'évolution de la probabilité à partir d'un état initial fourni par l'observation.

*
* *

Lois causales remplacées par des lois de probabilité, individus physiques bien localisés et à mouvement bien défini remplacés par des individus physiques qui refusent de se laisser représenter simplement et ne peuvent jamais être qu'à moitié décrits : telles sont les conséquences surprenantes des nouvelles théories. En

creusant sous les lois de probabilité parviendrait-on à retrouver des lois causales comme on a retrouvé naguère derrière les lois statistiques des gaz les lois causales du mouvement des molécules ? Certains arguments porteraient à le croire, mais il serait bien imprudent de l'affirmer. Quant à la possibilité de conserver des corpuscules la notion simple qu'on en avait auparavant, cela semble exclu, non seulement par les considérations développées plus haut, mais aussi par des raisons tirées du succès des nouvelles méthodes statistiques et du principe d'exclusion de Pauli ; nous ne pouvons y insister ici. Ce que nous avons dit suffit, pensons-nous, à montrer l'importance du changement de point de vue qui s'est récemment opéré en physique. Quel que soit le sort final réservé aux nouvelles doctrines, il est infiniment intéressant pour les philosophes que les physiciens aient été amenés, fût-ce momentanément, à douter du déterminisme des phénomènes physiques et de la possibilité de les décrire d'une façon complète dans le cadre de l'espace et du temps.

LOUIS DE BROGLIE.

