

Bulletin
de la
Société française
de Philosophie

COMPTES RENDUS DES SÉANCES

Séance du 12 Novembre 1929

DÉTERMINISME ET CAUSALITÉ
DANS LA PHYSIQUE CONTEMPORAINE

M. Louis de Broglie propose à l'examen de la Société les considérations suivantes :

1. L'idée classique du déterminisme des phénomènes physiques consiste essentiellement en ceci : connaissant l'état actuel du monde physique, il serait possible d'en déduire toute la suite de ses états futurs. Au point de vue 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 instant initial.

2. La conception déterministe des phénomènes naturels a paru longtemps suffisante. En particulier, elle s'est trouvée très fortifiée par le triomphe de l'atomisme dans diverses branches de la Physique, car il semblait que les corpuscules constituants ultimes de la Matière étaient soumis aux lois rigoureuses de la Mécanique de Newton améliorée par Einstein.

3. La découverte de phénomènes où les quanta interviennent et le développement subséquent de la théorie des quanta ont jeté un doute sur la possibilité de représenter les faits physiques par des images rentrant dans le cadre classique de l'espace et du temps, de décrire ces faits « par figures et par mouvements ». En particulier la description à l'aide d'images spatio-temporelles des états stationnaires d'un atome et des transitions brusques qui font passer un atome d'un état dans un autre est apparue comme très difficile. Les travaux qui ont permis l'édification de la nouvelle Mécanique (Mécanique ondulatoire ou quantique) ont achevé de mettre en lumière ces difficultés.

4. L'idée fondamentale de la nouvelle Mécanique est que le mouvement d'un corpuscule ne peut être exactement décrit sans considérer une propagation d'ondes. Au début du développement de la nouvelle Mécanique, on a pu espérer qu'il serait possible de conserver une image du corpuscule conforme aux idées classiques : le corpuscule aurait été constitué par un petit train d'ondes qui, à l'échelle macroscopique, aurait pu être considéré comme ponctuel et se déplaçant suivant les lois de la Dynamique classique du point matériel, tandis qu'à l'échelle microscopique (par exemple dans l'atome), les dimensions du train d'ondes ne pouvant plus être négligées, les notions de trajectoire et de vitesse auraient perdu leur sens. Malheureusement cette conception, clairement exposée par M. Schrödinger, se heurte à des objections si graves qu'on doit aujourd'hui l'abandonner. D'autres tentatives faites pour concilier les idées fondamentales de la nouvelle Mécanique avec l'image classique du corpuscule ne peuvent pas non plus être considérées comme satisfaisantes.

5. En présence de cet échec, force est maintenant d'abandonner, au moins momentanément, les conceptions classiques de la Physique et d'adopter un point de vue tout nouveau qui a été surtout exposé par MM. Bohr et Heisenberg. L'onde de la Mécanique ondulatoire ne serait pas un phénomène physique ; elle serait seulement la représentation symbolique de l'état de nos connaissances sur un corpuscule ou un système de corpuscules.

Une observation ne nous fournit jamais une connaissance tout à fait exacte de la position et du mouvement d'un corpuscule ; il y a toujours une certaine erreur possible et, d'ailleurs, toute observation trouble un peu ce que l'on veut observer. La nouvelle conception pose en principe que l'état de nos connaissances, après une observation, peut toujours être représenté par une onde de la façon suivante : l'intensité de l'onde en chaque point de l'espace mesure la probabilité pour que le corpuscule se trouve en ce point.

et la composition spectrale de l'onde représente la probabilité relative des divers états de mouvements possibles du corpuscule. Les équations de propagation de la Mécanique ondulatoire permettent de suivre rigoureusement l'évolution de l'onde, c'est-à-dire l'évolution des probabilités à partir de l'instant qui suit la première observation jusqu'au moment où une deuxième observation vient nous apporter de nouveaux renseignements sur le corpuscule. L'état de probabilité après la seconde observation sera représenté par une nouvelle onde dont il faudra à nouveau suivre l'évolution.

Dans cette nouvelle conception, la Physique n'a donc pas à déterminer la suite rigoureuse d'événements qui s'enchaînent; elle peut seulement, à l'aide des renseignements fournis par des observations antérieures, dire à tout instant quels sont les événements possibles et leurs probabilités relatives.

6. L'ancien déterminisme mécanique supposait essentiellement que la position et l'état de mouvement d'un corpuscule pouvaient être entièrement déterminés (en principe, sinon en pratique) par une observation bien faite à un instant quelconque. Or, Heisenberg a montré que la nouvelle théorie entraîne nécessairement l'impossibilité de mesurer à la fois avec précision la position et la vitesse d'un corpuscule. Plus la mesure de la position est précise, moins exacte est la détermination de l'état de mouvement et inversement. Ce sont là les relations d'incertitude d'Heisenberg qui sont incompatibles avec le déterminisme classique.

7. Comment expliquer qu'à notre échelle le déterminisme des phénomènes physiques paraît rigoureux? Tout simplement parce que, dans les cas usuels, la marge d'indétermination introduite par la nouvelle Mécanique n'est sensible qu'à l'échelle microscopique. A l'échelle macroscopique, elle est généralement si faible qu'elle ne correspond à rien de mesurable. En d'autres termes, à notre échelle, les erreurs expérimentales masquent complètement la petite indétermination essentielle des phénomènes et tout s'y passe comme si la Nature était régie par un rigoureux déterminisme.

8. Suivant cette conception si nouvelle, la Physique ne peut pas prédire les événements futurs avec exactitude. Elle dit seulement quels sont les événements possibles et leurs probabilités relatives. Chaque fois qu'un événement se produit, la Nature ferait donc une sorte de choix entre diverses possibilités; quand un tel choix est effectué, les probabilités futures sont par là même restreintes, mais, d'ailleurs, parfaitement déterminées; car si l'on ne peut plus parler de lois causales, il y a toujours des lois rigoureuses pour les probabilités.

L'avenir dira si cette nouvelle façon de concevoir la Physique

est définitive ou si l'on en reviendra de quelque manière au déterminisme. Mais dès aujourd'hui on est en droit de réfléchir sur les conséquences de ces idées nouvelles. Il appartient aux philosophes de voir si elles peuvent contribuer, dans une certaine mesure, à combler le fossé qui jusqu'ici semblait séparer artificiellement le monde matériel du monde moral, auquel l'idée d'un rigoureux déterminisme causal paraît si difficilement applicable.

DISCUSSION

M. Xavier Léon. — Une fois de plus notre *Société française de Philosophie* se plaît à rapprocher savants et philosophes.

Elle est particulièrement heureuse d'accueillir aujourd'hui M. Louis de Broglie.

Dans la voie ardue que suit l'esprit humain, embarrassé par l'accumulation de ses succès, par la perfection croissante de sa technique, votre thèse marque un tournant triomphal ; les investigations de la micro-physique portées jusqu'à l'intérieur de l'atome afin d'expliquer les phénomènes de rayonnement semblaient nous engager dans une impasse. Or, comme l'a dit Schrödinger, vous êtes venu donner l'impulsion à cet ensemble de travaux qui, sous le nom de mécanique ondulatoire, constituent une étape fondamentale dans l'histoire de la physique contemporaine en projetant une lumière inattendue sur la théorie révolutionnaire des *Quanta*.

La crise dont vous allez nous entretenir s'y rattache étroitement. Déjà vous en avez fait la preuve dans un important article que vous avez bien voulu offrir à la *Revue de Métaphysique et de Morale* et je suis heureux de pouvoir annoncer qu'il paraîtra dans son prochain numéro¹.

En attendant il serait inutile d'en souligner l'importance devant les membres de notre *Société* ; c'est la conception maîtresse du Cartésianisme qui est remise en question, la conception du mécanisme universel dont s'était inspirée jusqu'ici la science moderne et qu'avait magnifiquement résumée Laplace.

Avant de prendre parti les philosophes ont un intérêt majeur à entendre sur ce point capital la controverse des savants.

Par une singulière fortune, il se trouve que notre *Société* a aujourd'hui l'honneur et le bonheur d'avoir pour hôte le penseur de génie qu'est le Professeur Albert Einstein.

En vous remerciant, M. Einstein, d'avoir accepté, avec la simplicité et la bonne grâce que nous vous connaissons, d'assister à

1. Numéro d'octobre-décembre 1929.

notre réunion, permettez-moi de vous rappeler que vous n'êtes pas un étranger parmi nous.

En avril 1922, vous avez déjà bien voulu répondre à l'appel que vous avait adressé notre cher ami P. Painlevé, et ce fut une séance remarquable entre toutes dans les Annales de notre *Société* que celle où vous avez bien voulu répondre aux questions que vous posaient nos collègues.

Nous n'attendons pas moins de la séance d'aujourd'hui. Permettez-moi, au nom de tous nos amis, de vous en exprimer notre profonde gratitude et, puisque vous avez été souffrant depuis que nous ne vous avons vu, de nous réjouir du rétablissement d'une santé si précieuse à la science et à l'humanité.

La parole est à M. Louis de Broglie pour son exposé.

M. Louis de Broglie. — Je crois qu'il est assez intéressant d'exposer à la *Société de Philosophie* l'interprétation indéterministe de la Nouvelle Mécanique. Cette interprétation s'est développée indépendamment de mes travaux. Longtemps j'y ai été opposé. Je rappelle les idées que j'ai soumises au Congrès Solvay de 1927 et qui procédaient d'une tendance contraire. Mais, comme cet effort ne me donne pas satisfaction, il me paraît intéressant de résumer l'interprétation indéterministe, sans prétendre qu'elle soit définitive.

On sait quelle est l'idée classique du déterminisme. La connaissance de l'état actuel du monde suffit, en principe, à déterminer son évolution ultérieure.

Dans l'application des mathématiques à la physique, les phénomènes physiques sont régis par des équations différentielles ou des équations aux dérivées partielles. La solution est déterminée si on connaît à un certain moment la valeur de la solution et des dérivées.

La théorie déterministe a été résumée par Laplace dans son Introduction à la *Théorie des probabilités*.

Si on fait abstraction des quanta, les progrès de la physique ont longtemps confirmé l'idée du déterminisme universel, représenté mathématiquement sous la forme d'équations différentielles ou d'équations aux dérivées partielles.

En particulier, les théories atomiques lui ont été longtemps favorables. On pensait qu'en appliquant les lois de la mécanique classique aux corpuscules ultimes, on connaîtrait leur évolution et qu'ils seraient soumis à une inévitable nécessité.

La théorie atomique ne s'applique pas sans difficulté à la lumière. Fresnel, par sa conception des ondes qui semblaient s'y opposer,

a cependant introduit une théorie qui, elle aussi, est déterministe. Quand on est revenu pour la lumière aux théories corpusculaires, on espérait construire une mécanique des atomes de lumière.

Mais, depuis un petit nombre d'années, les questions se sont modifiées. La théorie des quanta jette un doute sur les idées simples qui avaient guidé les théoriciens de la physique.

Selon Planck, seuls certains mouvements peuvent être réalisés. Il n'y a que des états discontinus, et la transition entre eux est difficile à imaginer.

L'idée de Planck a été reprise par Bohr dans sa théorie de l'atome. Pour lui aussi, seuls certains mouvements intraatomiques sont réalisables (états stables, états stationnaires), et, d'autre part, une description spatio-temporelle des transitions entre ces états lui a paru impossible.

La mécanique quantique et ondulatoire a conduit les physiciens à douter du déterminisme physique, et les a amenés à se faire une idée nouvelle moins claire que l'ancienne de ces individus physiques que sont les corpuscules. Dans la mécanique ondulatoire le mouvement d'un corpuscule ne peut se décrire que par une propagation d'ondes. Cette idée a été confirmée par l'expérience.

En principe, il n'y a pas là contradiction avec le déterminisme classique.

Par exemple, Schrödinger, au début de ses tentatives, considérait le train d'ondes comme une région limitée de l'espace, de dimensions grandes par rapport aux longueurs d'ondes, et petites par rapport à nos échelles usuelles (à notre échelle, c'est un point).

Dans la nouvelle mécanique, les lois de propagation de ce train d'ondes sont telles qu'il se déplace comme un corpuscule.

D'autre part, il y a une relation simple entre les grandeurs qui caractérisent le mouvement du corpuscule et les grandeurs qui caractérisent le train d'ondes associé.

On peut imaginer qu'un électron soit réellement constitué par un tel train d'ondes. Une telle hypothèse explique pourquoi on a rencontré des difficultés dans l'étude des phénomènes à l'échelle atomique, car les *dimensions* de la trajectoire seraient *alors* comparables aux dimensions du train d'ondes.

Sur une petite trajectoire on n'a plus un déplacement en bloc, mais un mouvement confus.

L'électron devient répandu dans tout l'atome.

Dans la mécanique ondulatoire, les états stationnaires de l'atome sont l'équivalent des ondes stationnaires.

Cette conception est conforme à l'hypothèse déterministe : l'état ondulatoire initial étant connu, l'état ondulatoire final serait connu.

Mais une première difficulté surgit, relative à la propagation du train d'ondes. Ce train d'ondes tend à s'épanouir dans toutes les directions. Le corpuscule devient de plus en plus étendu en se déplaçant ; il n'est pas stable.

Il y a une deuxième série d'autres difficultés qui ont été suggérées par l'expérience.

En 1927, l'expérience est venue apporter un appui définitif à la mécanique ondulatoire, par la découverte de la diffraction des électrons par les cristaux.

Un faisceau d'électrons animés d'une même vitesse tombant sur un cristal, les électrons sont renvoyés et concentrés en certaines directions privilégiées d'une façon tout à fait analogue à ce qui se produit dans la diffraction des rayons X.

Pour les électrons, le phénomène était nouveau. Jusqu'à la mécanique ondulatoire, on ne savait pas qu'on devait associer des ondes aux électrons, et que ceux-ci donneraient lieu à des phénomènes analogues aux phénomènes de diffraction.

La longueur d'onde des ondes considérées est très peu différente de celle des rayons X. Les phénomènes sont semblables à ceux que permettaient d'observer les rayons X.

Mais ces expériences cruciales ont apporté un argument très fort contre le point de vue des petits trains d'ondes. Ces trains seraient diffractés et les électrons seraient dissous par la diffraction.

Il faut donc remplacer le faisceau d'électrons par une onde plane monochromatique incidente qui représente l'ensemble statistique des électrons. Elle équivaut à l'ensemble des positions possibles des électrons dans le faisceau incident.

Ces faits conduisent donc à renoncer à la description des électrons par des trains d'ondes.

L'onde de la mécanique ondulatoire a un sens statistique.

On peut essayer de maintenir l'idée de corpuscules ayant une position et une vitesse définies et de conserver le sens d'une onde qui représente une probabilité.

Mais on se heurte à des difficultés et il n'y a pas de tentative qui ait réussi.

LA THÈSE INDÉTERMINISTE.

Aussi de nombreux physiciens renoncent-ils au déterminisme rigoureux, comme Bohr, Heisenberg, Dirac.

Pour repérer la position d'un corpuscule, il faut troubler son état.

Toute observation, toute expérience, trouble ce qu'on veut observer.

Heisenberg conclut qu'indépendamment des erreurs accidentelles, c'est une loi fondamentale de la nature qui fait qu'il est impossible de déterminer simultanément la position et la vitesse des corpuscules.

Plus la mesure x est précise, moins celle de $[mV_x]$ est précise. Cette limitation réciproque s'exprime par des relations quantitatives où intervient la constante de Planck.

Le produit de l'indétermination sur une coordonnée, par l'indétermination sur la coordonnée correspondante de la quantité de mouvement, est de l'ordre de la constante de Planck.

Il y a donc une incertitude fondamentale, due à la nature des choses, et qu'il est impossible d'éliminer complètement.

Jusqu'à maintenant on n'a imaginé aucune expérience qui ne soit affectée d'une relation d'incertitude.

D'ailleurs, on est obligé d'admettre que le carré de l'amplitude (ou intensité) mesure la probabilité de présence du corpuscule au point considéré.

L'onde plane monochromatique est homogène, indéfinie; le corpuscule ne peut être localisé. On connaît bien, en ce cas, le mouvement, mais non la position du corpuscule.

Au contraire, dans le cas de l'onde limitée, la position est mieux définie; mais l'onde limitée n'étant pas monochromatique, l'état de mouvement est moins nettement précisé.

Voici quelles sont les conséquences de ces relations d'incertitude :

1° On ne peut plus conserver l'image d'un corpuscule bien défini localisé en un certain point de l'espace.

2° On ne connaît jamais la position initiale et le mouvement simultanément.

Les postulats de l'ancienne théorie déterministe ne sont plus satisfaits.

3° L'onde perd de son caractère physique. C'est une représentation symbolique des états de mouvement possibles du corpuscule.

La conséquence est un changement dans le mode de description des phénomènes naturels par la science.

Que peut prévoir la physique ?

Ce que l'observation et l'expérience nous apprennent sur un corpuscule se résume en les caractères d'une onde.

A partir d'un état initial on en peut suivre l'évolution par la mécanique ondulatoire. Elle permet de suivre l'évolution de la probabilité.

Une observation ou une expérience à l'instant « t » est le point

de départ pour un nouveau calcul de propagation ondulatoire de la probabilité. Ce ne sont plus les mouvements, ce sont les probabilités des *résultats* des expériences futures qui sont déterminées nécessairement par les équations de la mécanique ondulatoire. D'où le terme de « *choix de la nature* » (Dirac).

Il ne reste plus de lois *causales*, mais des lois de probabilités.

Une autre conséquence est la suivante : le nouveau point de vue permet l'explication du succès de la mécanique ancienne pour les phénomènes à grande échelle :

C'est que la longueur d'onde λ est très petite par rapport aux phénomènes à mesurer.

En vertu du théorème d'Ehrenfest, le petit train d'ondes se déplace en bloc comme se déplace un corpuscule. C'est cela qui rendait possible de penser que le train d'ondes constituait le corpuscule.

Au point de vue probabiliste, le corpuscule est quelque part à l'intérieur du train d'ondes. Si on fait une expérience de position, on le trouvera quelque part. Mais ce train d'ondes est petit ; à notre échelle, c'est un point. Aussi l'incertitude d'Heisenberg se trouve-t-elle masquée par l'erreur expérimentale sur la mesure du corpuscule. Tout se passe comme si on se trouvait en présence de lois *rigoureuses*, aux erreurs expérimentales près.

Cela explique le déterminisme apparent des phénomènes microscopiques.

D'autre part, les relations d'Heisenberg empêchent d'attribuer une configuration définie à l'atome.

Pour raisonner, il faut attribuer aux atomes des états d'énergie déterminés.

Pour les imaginer, il faut leur attribuer une position déterminée.

Pour les phénomènes macroscopiques, cette difficulté disparaît.

En résumé, les lois causales sont remplacées par des lois de probabilité.

Des corpuscules, il n'est pas possible de définir à la fois la position et la vitesse ; ils ne peuvent donc être décrits dans le cadre de l'espace et du temps.

Le déterminisme n'est possible que si les positions et les mouvements sont bien déterminés. Or il est *impossible*, par les *lois de la nature*, de les déterminer *simultanément*. Le déterminisme absolu est inaccessible.

On peut toujours supposer qu'il existe, mais il est peu conforme à l'esprit scientifique de supposer ce qui est inutile.

Ou bien maintenir l'idée d'un déterminisme sous-jacent. Mais

la conclusion de nos efforts est qu'on ne peut arriver à en formuler les lois.

M. A. Einstein. — Il est nécessaire de distinguer deux significations différentes du principe de causalité et du déterminisme.

On peut tout d'abord les prendre dans un sens empiriste, c'est-à-dire considérer comme un fait d'expérience que des relations correspondantes à des lois existent entre les divers aspects d'un système matériel. La connaissance de ces lois et de bonnes observations faites à un moment donné sur le système permettent de savoir quel sera son état à un moment ultérieur. On peut prévoir si on sait observer. En ce sens, une loi de la nature ne peut concerner que des éléments directement observables, et son déterminisme est rigoureux si l'expérience permet de vérifier avec exactitude la relation exprimée par la loi entre les résultats d'observation. Si la précision de nos mesures comporte une limitation de principe telle qu'on l'a déduite de la théorie des quanta, on peut exprimer ce fait sous la forme d'un principe d'indétermination.

Mais il est un autre énoncé du principe de causalité qu'on peut prétendre opposer au précédent et qui envisage le déterminisme non plus en fait, mais en droit, qui pose comme but à notre effort scientifique la construction d'une représentation dans laquelle l'état initial d'un système détermine entièrement ses états ultérieurs. On peut douter qu'il soit possible d'atteindre un pareil but et que sa recherche soit avantageuse ou pratique, mais on ne saurait nier *a priori* cette possibilité sans abandonner l'attitude scientifique si intimement liée aux besoins de notre raison. Il est possible que la difficulté exprimée par le principe d'indétermination soit la conséquence d'une imperfection dans notre manière d'envisager les choses et nous révèle seulement la nécessité d'une modification profonde dans notre construction théorique, comme ce fut le cas pour la chimie théorique avant l'introduction de la thermodynamique et la découverte des règles de Gibbs.

L'indétermination des lois actuelles ne signifie pas l'impossibilité d'atteindre des lois précises; le principe de causalité théorique n'est pas atteint par une difficulté de la causalité empirique.

M. E. Borel. — Je ne voudrais pas que la brève remarque que je vais faire fût interprétée comme impliquant que je sous-estime l'importance scientifique des nouvelles théories physiques. Cette importance est, à mon avis, très grande, mais ce n'est point le lieu d'en développer les raisons. Toutefois, au point de vue purement philosophique des relations entre la mécanique statistique et le déterminisme, ces nouvelles théories ne me paraissent apporter

rien de nouveau par rapport aux théories de Maxwell, Gibbs et Boltzmann.

M. Louis de Broglie. — Ce qu'il y a de remarquable, en particulier, dans les théories récentes, c'est la difficulté de dissocier le point de vue statistique du point de vue individuel dans la nouvelle mécanique; c'est une différence, et qui me semble caractéristique. Avec les anciennes théories on admettait la possibilité de cette dissociation; on ne peut plus le faire aujourd'hui, semble-t-il.

M. A. Einstein. — Le déterminisme expérimental a déjà rencontré des difficultés analogues à celles que suscitent les théories actuelles. Elles sont communes à toutes les conceptions atomistiques, qu'il s'agisse d'éléments de matière ou d'éléments d'action. L'expérience fait toujours intervenir des nombres entiers d'éléments de chaque sorte et les considérations statistiques interviennent comme lien entre la théorie et l'expérience aussi bien en théorie cinétique qu'en mécanique des quanta.

M. J. Hadamard. — L'occasion d'une séance telle que celle-ci, où physiciens et philosophes se trouvent réunis et mis en face des conceptions si profondes et si hardies de l'« Atomistique » contemporaine, est peut-être bonne pour poser une question d'ordre historique au sujet de laquelle il me semblerait intéressant d'avoir une réponse précise.

La Physique, nous venons d'en avoir la confirmation, se trouve en ce moment de plus en plus conduite à admettre un certain indéterminisme, on peut presque dire un certain libre arbitre, dans le domaine intérieur à l'atome. Or ce fait, le fait qu'un pareil libre arbitre atomique serait, en vertu de la loi des grands nombres, parfaitement compatible avec le déterminisme naturel tel que l'expérience nous le montre, avait été depuis longtemps remarqué par les métaphysiciens. Je n'en saurais douter, car c'est par des conversations que j'ai eues avec Durkheim entre 1893 et 1896, donc, il faut le reconnaître, de longues années avant d'apparaître aux physiciens, que cette idée m'a été signalée. Est-il exact, comme cela m'a été dit depuis, qu'elle remonte à Boutroux (*Sur la contingence des lois de la nature*); ou, suivant une autre information qui m'est donnée, avait-il été précédé, à cet égard, par la Métaphysique allemande? Je serais, pour ma part, reconnaissant à nos collègues philosophes de me fournir ce renseignement.

M. P. Langevin. — Je suis d'accord avec M. Einstein quand il compare les difficultés soulevées par la découverte du quantum d'action de Planck et celles qui résultent de l'existence des atomes; il s'introduit d'un côté comme de l'autre une limitation de nos pos-

sibilités expérimentales. Je voudrais insister comme lui sur le fait que la situation actuelle n'est pas sans précédent ni au point de vue purement scientifique, ni au point de vue des conséquences philosophiques qu'il est possible d'en tirer, et souligner aussi le danger qu'il peut y avoir de donner à l'expression de ces conséquences une allure trop anthropomorphique, comme on le fait, par exemple, en disant que « la nature fait un choix » dans les limites où le principe d'indétermination exprime l'impossibilité de suivre expérimentalement ou plutôt de prévoir avec une précision illimitée l'évolution d'un système particulier. Avant d'employer des expressions de ce genre et d'en tirer des conséquences dont certaines sont au moins prématurées, il faudrait préciser le sens et la portée de l'idée du déterminisme individuel, voir dans quelle mesure s'y combinent l'expérience immédiate et l'interprétation théorique, ou l'*a priori* anthropomorphique. Il ne faut pas oublier surtout que seul joue un rôle dans l'expérience courante un déterminisme statistique que nul ne songe à mettre en question et pour lequel valent les relations précises de la mécanique classique.

Toutes les fois que le développement des constructions théoriques s'est trouvé en présence de difficultés comme celles dont il est question aujourd'hui, il s'est produit un retour vers l'attitude que les physiciens appellent phénoménologique et qui consiste à n'introduire, autant que cela peut avoir un sens, que des notions dérivées de l'expérience immédiate.

C'est ainsi qu'Heisenberg a donné un aspect nouveau à la mécanique des quanta en renonçant à appliquer aux corpuscules intra-atomiques des considérations d'ordre individuel analogues à celles de la mécanique classique ou de la mécanique céleste. Par l'intermédiaire du calcul des matrices, il a cherché à n'introduire que des éléments traduisant directement les données expérimentales, représentant par une seule variable suffisamment complexe l'ensemble du spectre d'un atome, des intensités et des fréquences des raies qui le composent, seules données expérimentales par lesquelles se traduit à nous, en spectroscopie, l'activité interne de cette sorte d'atomes.

Je crois, avec notre ami Meyerson, qu'une telle attitude ne peut pas avoir pour le physicien un caractère définitif et qu'elle représente seulement une position de repli devant les difficultés de l'attaque théorique. L'histoire de la physique montre que chaque repli de ce genre a été suivi par une offensive nouvelle et féconde dans le sens du besoin d'aller au delà de l'expérience immédiate, de comprendre la réalité en construisant une représentation à partir de notions plus ou moins abstraites.

Par exemple, vers le milieu du XIX^e siècle, au moment où de grosses difficultés d'ordre mathématique et physique arrêtaient le développement de la théorie cinétique, s'est produite la réaction énergétique appuyée sur le développement des principes de la thermodynamique et pendant laquelle on croyait pouvoir attribuer une valeur absolue au principe de Carnot, considéré comme traduction et expression de l'ensemble des faits expérimentaux. Vous savez comment le développement plus récent de la mécanique statistique, avec introduction systématique des considérations de probabilités appliquées à l'hypothèse atomique, a permis de donner sa signification véritable au principe de Carnot et lui enlever son caractère absolu, pour trouver dans les fluctuations qui le contredisent le reflet de la structure atomique et le moyen d'atteindre les grandeurs liées à cette structure. Il a été particulièrement fécond, ici, de devancer l'expérience immédiate et de chercher à comprendre le sens profond du principe au lieu de voir en lui, comme faisaient les énergétistes, une expression limite des possibilités de notre connaissance.

Ne peut-il pas en être de même pour le principe d'indétermination ? Il y aurait pour les physiciens abdication et renoncement à supposer *a priori* le contraire. Au delà du déterminisme statistique, auquel semblent se limiter aujourd'hui nos possibilités expérimentales, il me semble nécessaire, et il sera certainement fécond, de continuer à chercher une interprétation et une représentation plus profondes, d'obéir une fois de plus à l'instinct qui pousse le physicien à aller au delà de la phénoménologie pure et de l'expérience immédiate, dans la mesure où cette expression possède un sens précis.

Il est certain que le langage par lequel nous traduisons nos idées, même les plus concrètes, est déjà construit sur des abstractions et que tout résultat d'expérience ne peut s'exprimer qu'en langage de théorie plus ou moins sommaire. C'est par rapport à une représentation qu'il peut être question de déterminisme ou d'indétermination. La tendance profonde de la physique est de chercher constamment à perfectionner la représentation, pour y inclure le maximum possible de détermination. Notre science n'a pas d'autre sens et se renoncerait elle-même si elle s'arrêtait sur ce chemin.

M. E. Borel. — Au point de vue philosophique, l'indéterminisme de prévision des phénomènes à notre échelle, qui est une conséquence des théories de la mécanique statistique, a une importance aussi grande que l'indéterminisme des nouvelles théories. Il

importe peu que cet indéterminisme soit extrêmement peu probable ; il suffit qu'il apparaisse comme à la rigueur possible pour que nous constations une contradiction entre les faits et le déterminisme rigoureux des phénomènes à notre échelle. C'est ce déterminisme rigoureux, fait d'observation millénaire, qui nous a conduit à postuler le déterminisme à l'échelle moléculaire ; il est pour le moins curieux que ce déterminisme à l'échelle moléculaire ait comme conséquence nécessaire que le déterminisme à notre échelle n'est pas rigoureux, en ce sens qu'il n'est pas exact qu'une même suite d'antécédents entraîne nécessairement (à notre échelle) la même conséquence.

M. A. Einstein. — Dans des cas nombreux, tels que celui du mouvement brownien, la théorie fait intervenir des éléments non directement observables et trouve des vérifications de plus en plus complètes à mesure que nos moyens d'observation deviennent plus perfectionnés. La justification d'une conception théorique est dans sa puissance d'explication et de prévision.

M. E. Le Roy. — La différence est profonde entre la nouvelle théorie indéterministe et l'ancienne mécanique statistique. Dans celle-ci, l'indétermination n'est imputable qu'à nous, à notre incapacité au maniement d'équations trop nombreuses ; il y a seulement, de notre part, impuissance de détermination, impuissance de débrouiller le déterminisme de l'échelle atomique. Dans la perspective que vient de définir M. Louis de Broglie, au contraire, il s'agit d'une indétermination essentielle, intrinsèque, irréductible, liée à la nature même des choses : au niveau du micro-phénomène, la détermination est impossible en soi ; elle ne peut pas être définie parce qu'elle n'existe pas.

M. E. Borel. — Il y a là une difficulté sur laquelle les mathématiciens ont souvent discuté et ne sont pas d'accord. Un calcul, tel que celui de la décimale de π , dont le rang est 10^{100} , exigerait, pour être effectuée, des millions d'années et des milliards de calculateurs, doit-on le regarder comme exécutable ? En d'autres termes, lorsque le fini est très grand et dépasse les limites que peut atteindre l'homme, n'est-il pas à traiter comme l'infini ?

M. P. Langevin. — Je crois que M. Einstein a raison de ne pas admettre sans examen plus approfondi qu'il s'agit ici d'une limitation différente de celle qui s'impose aux conceptions atomiques sous leur forme ancienne. Il y aurait de graves inconvénients, au point de vue des progrès ultérieurs de la science, à considérer comme définitive et essentielle, dès maintenant, une

indétermination qui traduit seulement, à mon sens, l'insuffisance de nos moyens actuels de représentation.

M. E. Le Roy. — J'insisterais volontiers, moi aussi, sur l'impossibilité de concevoir une indétermination foncière et surtout un choix fait par la nature. Mais il y faudrait quelques développements qui ne pourraient trouver place que dans une autre séance. Je me bornerai donc, ce soir, à noter d'un mot que les remarques de M. Langevin, sur le rôle nécessaire des principes théoriques pour la définition même des faits, nous ramènent à des vues que j'avais longuement exposées autrefois.

M. J. Perrin demande comment l'on pourrait définir le sens de l'expression : « L'état actuel d'un système ».

M. P. Langevin. — Les physiciens ont toujours eu avantage à être déterministes. Leur effort n'a de sens que dans cette direction.

M. Raymond Lenoir. — M. de Broglie vient d'exprimer avec humilité le doute philosophique qui s'empare de lui. L'humilité est pour les philosophes. Ce qui frappe, c'est la parfaite cohérence des résultats présentés par les physiciens. Le philosophe, accoutumé à l'analyse, oublie trop souvent que les lois scientifiques sont vaines, qui ne permettent pas de reconstruire ou, mieux, de pénétrer le sens des organisations naturelles. L'établissement des séries périodiques, les analyses spectrales si délicates autorisent les édifices moléculaires. Et nous voyons comment un atome capture un à un les électrons.

Les conséquences généralisées de l'étude des rayons Röntgen se développent-elles devant le philosophe, il y a crise de mots, non de formules. M. Hadamard demandait tout à l'heure ce que penserait un métaphysicien. Il serait embarrassé. Depuis le début du XIX^e siècle, les philosophes ont cessé d'être à l'école de la science et de maintenir, entre les concepts dont ils font usage et les faits observables, une correspondance rigoureuse. Ils retrouvent aujourd'hui devant eux la même voie traditionnelle dont ils se sont écartés. Descartes, Leibniz, Laplace en marquent les étapes. Descartes affirme la réalité quantitative de l'univers. Leibniz voit dans tous les progrès physiques dissociés des possibles. Mais il se fait de l'harmonie une conception telle que tout est lié dans le cours du monde par des nombres fractionnaires. Le développement de la pensée mathématique entraîne le passage des possibles aux probables. Le calcul des probabilités a pu recevoir de Gibbs et de Boltzmann l'extension et l'application que vient de rappeler M. Borel ; il procède de Laplace.

Par ailleurs, il n'y a aucune difficulté à penser un monde où les événements apparaissent comme probables, sans plus. Il n'a plus le contexte que lui prêtent les oppositions de termes traditionnelles. Nous étions accoutumés à une certaine balance du continu et du discontinu. Nous établissions entre les phénomènes des séries indéfinies, pensant céder au mouvement naturel de la pensée. La théorie des quanta révèle, dans un monde échappant à l'appréhension des sens, des sauts d'électrons entraînant une suite d'états stationnaires du système. Nous nous en étonnons. Et, quand nous dépeignons un caractère, nous parlons de « sautes » d'humeur. Nous ne prenons pas garde que notre expérience familière trahit un sentiment de la vie dont tous les moments sont discontinus. Claude Bernard approfondit le fonctionnement des organes, pour soumettre à l'observation un instant de vie détaché de ce qui est passé et à venir. Nous ne composons un cours des êtres et des choses qu'en vertu d'un artifice mathématique. Devant la représentation symbolique d'états stationnaires successifs, on est allé jusqu'à évoquer un mouvement de rotation, une spirale qui restituent aux faits observés leur continuité. La solution de l'antithèse verbale, peut-être aussi de difficultés soulevées par le schème des quanta et des trajets d'ondes, semble être dans le seul fait observable auquel le développement de l'électro-magnétisme donne son sens plein au cours du XIX^e siècle : l'alternance, qui se traduit par la succession de mouvements de signe contraire, et, jeu de lumière et d'ombre, exprime un rythme.

M. de Broglie, qui a rendu hommage à la mémoire de Fresnel, sait les origines de la mécanique ondulatoire. Devant la fantaisie avec laquelle semble évoluer le trajet d'ondes, est-il nécessaire de parler d'« indéterminisme » ? Cette contrepartie du « déterminisme » est toute en négations. Son contraire précise-t-il davantage ? Sans doute le déterminisme apparaît comme une conception familière, parce qu'il est né d'une vue circonscrite et étroite de l'action. La cause n'engage qu'un sens juridique auquel ne saurait se plier la nature. A moins de se limiter, comme dans la philosophie hellénique, à l'exacte compensation des énergies en acte, la cause doit céder la place à la raison. Dans l'acception où la prend Leibniz, la raison est le λόγος : ce qui rend compte d'une chose, c'est-à-dire ce qui est susceptible de recevoir le calcul et s'exprime en nombres. Alors il importe peu que nous ne puissions, à chaque moment du temps, prévoir dans aucun domaine ce que sera la minute d'après. Ceci seul importe que, dans tous les ordres de dimension, tous les états simultanés du monde puissent être compris en nombres, et la théorie des quanta ajoute cette spécification,

dont le sens plein se révélera peut-être quelque jour, en nombres entiers.

Sur la demande de quelques membres, la Société décide de poursuivre la discussion dans une séance ultérieure. La date en a été fixée au 1^{er} mars 1930.

APPENDICE

Lettre de M. Bénézé.

Votre note révèle, à mes yeux, un triple souci :

1^o *Physique*. — Substitution d'une nouvelle physique à l'ancienne ; abandon non seulement des vieilles formules, mais de la vieille conception du continu de la matière, dont le calcul infinitésimal paraissait suffire à épuiser l'intelligence. La théorie des quanta nous a déjà habitués à cette idée.

Je ne suis pas compétent, et j'ai confiance dans la compétence et la probité des expérimentateurs : j'accepte donc entièrement la nécessité de ce changement.

2^o *Méthodologique*. — Ce que vous appelez le déterminisme classique, c'est la notion générale de loi scientifique, en tant qu'elle est liée à ces formules mathématiques, aujourd'hui périmées. Liaison qui laisse supposer qu'à ce déterminisme vieilli il faudrait en substituer un autre, dont la caractéristique serait justement de n'être point strict. Probabilisme et non déterminisme.

Je suis obligé de faire ici deux remarques :

a. L'idée de loi n'est-elle pas antérieure à toutes les formules mathématiques ou physiques (en tout cas d'allure sensible) qui correspondent à la « matière » des phénomènes déterminés ? Et antérieure ne doit pas se prendre ici dans un sens chronologique (car on pourrait prétendre que l'idée de la loi est une habitude, le produit d'une expérience préalable), mais dans un sens vraiment philosophique, transcendantal, dirions-nous pour être plus précis. L'idée de loi serait alors une condition de notre esprit, indispensable à la connaissance scientifique des phénomènes (et elle n'est appelée scientifique que parce que nous imposons aux phénomènes cette idée de loi).

S'il en est ainsi, ce qui est habitude dans la loi, c'est la formule, et rien d'étonnant pour le philosophe que l'expérience rectifiée nous oblige à changer cette formule (c'est le sort de toute science), dès que l'expérience — d'où elle est sortie — contredit nos prévisions. Je suis sûr qu'il a des lois, et rigoureuses, sans quoi je n'aurais pas l'idée de chercher leurs formules, mais je ne connais pas ces formules : c'est l'expérience qui me les apprendra.

Ici, l'expérience physique nouvelle me les apprend-elle ? Oui, mais elles ne sont pas précises. Qu'importe au déterminisme ? Même, si je

démontrai que la connaissance précise en est impossible, il faudrait retenir que la certitude de la loi est préalable ; que, si l'ingéniosité, le talent, le génie des chercheurs ne sont pas encore parvenus à la décision désirable, c'est par ignorance, non par la nature du déterminisme.

b. L'équivoque provient de l'emploi de la probabilité. Ce qui est probable, ce n'est pas la notion de loi, c'est la formule. Ce qui est rationnel dans la probabilité (donc inévitable), c'est uniquement la certitude *a priori* que tous les événements d'un ensemble d'événements sont, en tant qu'événements, possibles : et j'appelle événement ce qui n'arrive qu'une fois. Tout le reste revient à compter (ce qui est une opération expérimentale) telle sorte d'événements, puis telle autre, et à comparer. Maintenant, quand emploie-t-on la probabilité ? Justement quand la formule qui devrait être fournie directement par l'expérience est trop compliquée, incertaine. On lui substitue le calcul des « chances », qui peut mener plus vite à une formule pratique.

Ainsi l'emploi de la probabilité n'est qu'un moyen ingénieux de tourner une difficulté ; il a, d'ailleurs, des inconvénients, car il n'a de sens que par et pour un très grand nombre d'expériences ; et c'est peut-être pour cela qu'on « démontre » que les formules acquises ne peuvent être précises. Mais je me récusé volontiers sur ce dernier point.

La notion de loi reste au-dessus de tout cela, parce qu'elle en soutient la réalité phénoménale. La probabilité est de « matière » ; la loi est de forme. Nous laissons la matière aux physiciens ; l'étude de la forme revient aux philosophes ; et nous sommes sûrs à l'avance que, quelles que soient les trouvailles de ceux-là, elles n'empiéteront pas sur les certitudes de ceux-ci. Il faut seulement bien répartir les domaines. Que diriez-vous d'un philosophe qui, au nom de la métaphysique, nierait les résultats sensibles d'une expérience bien faite ? Que dirons-nous des savants qui, prétendant s'appuyer sur l'expérience sensible, critiquent les conditions non-sensibles de cette expérience ? Cela n'empêche pas les communications entre philosophes et savants, et j'ajoute que les philosophes ont sans doute plus besoin des savants que les savants des philosophes.

3° *Souci métaphysique.* — La liberté vous semble en jeu. Puisque l'imprécision inéluctable des formules nous empêche de prévoir, n'y a-t-il pas un battement, un « imprévu imprévisible », par où s'insinuerait notre liberté, dont la certitude en nous est inébranlable ? Cela m'a rap-pelé, sauf erreur, le « clinamen » des épicuriens.

Si ce qui est dit plus haut, sur la distinction de la notion de loi et de la formule, est vrai, cette inquiétude et cet espoir sont déplacés. Déterminisme rigoureux doit s'accorder avec liberté. Il s'accorde.

Une loi n'est pas suffisante pour prévoir. Il faut une occasion où l'appliquer. La loi comme telle (et la formule qui la manifeste) n'est que virtualité. C'est l'occasion qui l'actualise. Et c'est par l'occasion que se fixe notre liberté. Si donc nous connaissions rigoureusement toutes les formules, nous serions encore sûrs que nous sommes libres, et cela sans erreur.

C'est justement parce que nous sommes libres que l'avenir est imprévisible ; mais cette imprévisibilité ne tient pas à l'ignorance de la formule sensible ; elle tient à ce que cette contingence des futurs est une condition *a priori* de notre pensée, tout comme la fatalité des choses passées et le déterminisme des lois. Notre liberté se meut au milieu de ces éléments sans se confondre avec aucun.

Vous direz qu'il y a beaucoup de prévisions qui réussissent ? Oui, mais quand sait-on qu'elles ont réussi ? Quand le moment prévu est présent ou passé, c'est-à-dire quand il n'est plus à venir. Les savants et le sens commun prennent le droit de penser à l'avenir comme s'il était passé. Ne le leur refusons pas, mais marquons bien que l'avenir est toujours devant nous, et *qu'il n'existe pas dans le sensible*. Voilà le clou où s'accroche notre parfaite certitude d'être libres. L'accommodation avec l'expérience est affaire de dialectique, inutile ici. Ainsi la probabilité des savants n'a rien de commun avec la liberté morale.

G. BÉNÉZÉ.

Lettre de M. André Metz.

Je demande qu'on me permette une remarque au sujet de la validité des raisonnements qui concluent à l'indéterminisme. D'après Heisenberg, la question de savoir si une connaissance complète du passé peut permettre de prédire l'avenir ne se pose pas, parce que la connaissance complète du passé est impossible. Or, tous les raisonnements qui nous montrent cette impossibilité sont basés sur le fait qu'il nous faut, pour connaître quelque chose d'une particule, faire agir sur elle une particule (ou une onde, mais on sait que l'une et l'autre sont inséparablement associées) du même ordre de grandeur. Toute observation introduit donc une perturbation analogue à la quantité à mesurer elle-même.

Il y a ainsi des limitations imposées, par là même, à nos moyens d'investigation. Mais comment passer de là à une indétermination *dans la nature des choses* ? Nous n'en avons pas le droit. Si l'on examine de près le détail des raisonnements, on voit qu'il est question de chocs plus ou moins violents, exactement comme s'il s'agissait de particules à notre échelle, c'est-à-dire de boules de billard. Or, qu'on y prenne bien garde, les « expériences de pensée » sur les boules de billard contiennent implicitement l'hypothèse du déterminisme intégral. On n'a pas le droit, par conséquent, d'en tirer autre chose. A supposer que quelqu'un soit, devant un billard pourvu d'un grand nombre de boules, en présence des difficultés que l'on nous signale dans la théorie des quanta, il est extrêmement probable — si c'est un esprit sain et clair — qu'il déplorera la pauvreté de ses moyens d'investigation, mais n'ira pas accuser l'indéterminisme de la nature. Pourquoi en serait-il autrement à l'échelle électronique ? Les raisonnements que l'on présente ne nous paraissent pas justifier de différence à ce point de vue, et surtout ils n'éliminent pas, du moins dans la forme qu'ils ont revêtue jusqu'ici, l'hypothèse implicite

du déterminisme contenue dans toutes les expériences de pensée sur les chocs de particules.

Enfin, je voudrais dire également un mot au sujet de la question qui a été posée à la séance et qui est d'une grande actualité dans les circonstances présentes : *D'où vient la croyance au déterminisme ?* Ici, c'est dans l'épistémologie de M. Émile Meyerson que l'on trouve la réponse : la recherche de la causalité, et, à son défaut (car la causalité intégrale, au sens meyersonien, est une limite impossible à atteindre et même à approcher), de la *légalité*, c'est-à-dire du déterminisme, est une tendance caractéristique de la raison humaine. La croyance à la légalité des phénomènes, ou du moins l'application de cette croyance, est même solidaire de toute *action* accomplie par l'homme et par l'animal. Il faut agir, et conformément aux précédents qui ont réussi. *Agis ou tu seras dévoré.* La raison transforme cette croyance vague — plutôt sentie que réfléchie, plutôt appliquée que sentie, — en une foi précise au déterminisme de la nature.

A. METZ.

L'Éditeur-Gérant : MAX LECLERC.