

ANNALES DE L'I. H. P.

HANS REICHENBACH

Les fondements logiques de la mécanique des quanta

Annales de l'I. H. P., tome 13, n° 2 (1952-1953), p. 109-158

[<http://www.numdam.org/item?id=AIHP_1952__13_2_109_0>](http://www.numdam.org/item?id=AIHP_1952__13_2_109_0)

© Gauthier-Villars, 1952-1953, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de l'I. H. P. » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

Les fondements logiques de la mécanique des quanta ⁽¹⁾

par

Hans REICHENBACH,
Université de Californie, Los Angeles.

CHAPITRE I. L'INDÉTERMINISME.

L'indéterminisme associé à la théorie des quanta a été considéré, aussi bien par des philosophes que par des physiciens, comme la déviation de la physique classique la plus forte que l'on puisse imaginer. Je ne crois pas que ce jugement puisse être défendu. Il me semble d'abord que cette déviation n'est pas aussi grande qu'elle paraît à première vue, parce qu'il existe des développements en physique classique qui laissent supposer que le déterminisme n'est pas le dernier mot de l'homme de science en ce qui concerne les phénomènes naturels. Ensuite, d'autres résultats de la physique quantique contredisent la conception classique du monde physique à un plus haut degré que ne le fait l'abandon de la stricte causalité. Je veux parler du changement du concept de la matière, de la substance qui forme les corps physiques, changement profond qui s'est attaché à la découverte de M. de Broglie concernant une certaine équivalence d'ondes et de corpuscules et qui a bouleversé tout à fait les théories philosophiques issues de la science classique aussi bien que des expériences de tous les jours. Permettez-

(1) Conférences faites à l'Institut Henri Poincaré les 4, 6, 7 juin 1952.

moi, en guise d'introduction, de vous présenter ces développements d'un point de vue comparatif, c'est-à-dire en les comparant aux idées classiques dont ils sont sortis et qu'ils ont transformées en un nouveau tableau du monde physique. Ce n'est qu'après cette étude de l'arrière-plan philosophique que l'on pourra comprendre la signification des découvertes des physiciens pendant les trente années écoulées depuis les premières publications de M. de Broglie, et que l'on sera en mesure d'examiner d'autres conséquences de la physique nouvelle, comparables sinon supérieures à celles que je viens de citer.

Le déterminisme classique a son origine dans l'astronomie. Les astronomes ont l'avantage de s'occuper d'objets grands et éloignés les uns des autres, objets qui ne sont donc troublés ni les uns par les autres, ni par l'observateur humain. Ces objets célestes se meuvent suivant des lois très précises, qui permettent de prédire les positions futures si l'on connaît les positions présentes, ou plutôt qui permettent des prévisions très précises si l'on possède une connaissance suffisamment exacte de leur état présent. Cette régularité extrême a été considérée comme l'idéal de la nature pour ainsi dire, et si l'on ne pouvait pas toujours retrouver la précision astronomique parmi les phénomènes terrestres, on a conclu que c'est seulement la limitation des capacités humaines qui borne nos prédictions à l'incertitude de prévisions statistiques. L'idéal supposé de la nature est donc devenu l'idéal de la science, et la recherche de lois causales strictes a pris la forme d'une obligation morale dont la validité est hors de doute.

On n'a guère besoin de citer ici le passage fameux dans lequel Laplace assigne à une intelligence supérieure la capacité d'embrasser « 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 » ⁽²⁾. Ces mots se présentent, à un physicien moderne, comme la profession de foi d'un âge passé depuis longtemps, d'un âge où l'on attribuait aux étoiles le pouvoir de révéler les lois des plus légers atomes, d'un âge de confiance en l'harmonie de la nature aussi bien qu'en la capacité de l'homme de la traduire en des formules mathématiques. Le physicien de nos jours ne partage

⁽²⁾ P. S. LAPLACE, *Essai philosophique sur les probabilités*, Gauthier-Villars, Paris, 1921, p. 3.

plus cette confiance; il ne peut guère s'imaginer un temps où l'on croyait que le monde des grandes dimensions offrait l'image du monde des petites dimensions.

Cependant, la question du déterminisme n'est pas une question de foi, une question de psychologie du physicien ou de son époque. Il s'agit d'une question physique ou épistémologique, d'une question demandant une analyse logique et une réponse basée sur le raisonnement et l'observation. L'opinion que tous les phénomènes de la nature sont gouvernés par des lois strictes est l'expression d'une théorie physique qui, en tant que telle, doit être assujettie aux règles critiques généralement acceptées pour la discussion des théories. Commençons cette analyse en essayant de donner à la théorie du déterminisme une forme précise qui permette de la juger comme vraie ou fausse, ou du moins, comme vraisemblable ou invraisemblable.

L'hypothèse de la causalité se présente sous deux formes différentes : une forme conditionnelle et une forme catégorique. Dans la forme conditionnelle, l'énoncé de causalité commence par le mot « si » : si la situation A est complètement décrite au temps t_1 par les valeurs $u_1, \dots, u_n$ de certains paramètres, elle sera suivie au temps t_2 par la situation B. Dans la forme catégorique, nous tenons comme établi que les valeurs $u_1, \dots, u_n$ existent; et, omettant la phrase qui commence par « si », nous concluons que la situation B se produira. C'est la seconde forme, la forme catégorique, qui amène le déterminisme, car le déterministe maintient qu'il est admissible de séparer le conséquent de l'antécédent et d'affirmer la conclusion.

On ne pourrait trouver à redire à ce procédé si la situation était aussi simple que je viens de l'écrire. Malheureusement, elle est beaucoup plus compliquée.

Même si nous sommes justifiés à considérer la forme conditionnelle comme vraie, nous savons bien que la condition exprimée dans la prémisse n'est pas remplie. La description de la situation A par les paramètres $u_1, \dots, u_n$ n'est pas complète. Malgré cela, nous l'employons; et nous sommes obligés de l'employer parce que nous ne possédons pas une description meilleure. Heureusement, l'erreur commise en employant une description incorrecte n'est pas trop grande; la prédiction de la situation B sera valable approximativement. Cela veut dire qu'elle sera vraie dans des limites numériques étroites pour la plupart des cas.

Les lois des probabilités viennent à notre secours; si nous devons renoncer à une prédiction exacte, celles-ci nous offrent de la remplacer par une prédiction statistique.

La solution paraît simple, mais elle montre que le problème de la causalité est inséparable du problème des probabilités. Elle nous permet de séparer la conclusion de la forme conditionnelle au prix du sacrifice de la prétention d'arriver à un énoncé vrai : la conclusion n'est que probable. Elle substitue donc le concept de probabilité à celui de vérité; et elle nous demande de reformuler le principe de causalité de façon à ce qu'il tienne compte de sa liaison avec les principes des probabilités. Voilà la réponse qu'une analyse logique donne à la question du déterminisme : si un déterminisme peut être soutenu, il faut d'abord le formuler comme théorème en fonction des probabilités.

Si chaque prédiction est restreinte à un degré de probabilité, l'analyse causale ne peut que pousser plus loin ce degré de probabilité. Le principe de causalité est basé sur la supposition que cette augmentation de la probabilité est toujours possible; et l'idée du déterminisme se rapporte à un processus de limite concernant les probabilités de prévision. Si la description $D^{(1)}$ prévoit l'état futur B avec une probabilité $p^{(1)}$, on pourra augmenter cette probabilité en employant une description plus détaillée $D^{(2)}$. Cette nouvelle description de la situation initiale diffère de la première dans les points suivants :

1. La nouvelle description renferme un rapport des conditions physiques dans les environs spatiaux de la situation A.
2. La nouvelle description emploie des mesures plus précises des paramètres, et ajoute des nouveaux paramètres négligés auparavant à l'intérieur de A.
3. La nouvelle description emploie des lois causales perfectionnées.

Le point 1 sert à diminuer des interventions inattendues venant de l'extérieur du volume spatial v auquel se rapportent la situation A au temps t_1 , et la situation B au temps t_2 . Les points 2 et 3 servent à rendre plus précise l'exposition des relations physiques à l'intérieur de v .

En répétant ce procédé, on arrive à une série de descriptions $D^{(i)}$ et de probabilités $p^{(i)}$, qui nous permet de formuler l'hypothèse du déterminisme : cette hypothèse prétend que la série des $p^{(i)}$ converge vers la valeur 1 et qu'en même temps la série $D^{(i)}$ converge vers une descrip-

tion ultime D. L'idée du *déterminisme* peut donc être symbolisée par le schéma suivant :

$$(1) \quad \begin{cases} D^{(1)}, D^{(2)}, D^{(3)} \dots, D^{(l)}, \dots, \rightarrow D, \\ p^{(1)}, p^{(2)}, p^{(3)} \dots, p^{(l)}, \dots, \rightarrow 1. \end{cases}$$

La question se pose de savoir si ce schéma est corroboré par le témoignage de l'expérience.

Pour le physicien classique la convergence des probabilités $p^{(i)}$ ne faisait pas de doute. Ajournons donc la discussion de ce point et examinons d'abord la question de l'existence d'une description ultime. Aux points 2 et 3, la physique classique donnait la réponse que les lois naturelles définitives avaient été établies dans la mécanique de Newton et que les paramètres définitifs étaient donnés par le modèle mécanique de l'atome. Cependant il subsistait des difficultés en ce qui concerne le point 1. Si l'espace est infini, la description ultime D doit renfermer un nombre infini de paramètres; un logicien aura de la peine à accepter une telle idée, doutant qu'elle ait vraiment un sens.

La théorie de la relativité paraît offrir un remède : la vitesse de transmission causale étant limitée à celle de la lumière, tous les paramètres qui peuvent influencer la situation B au temps t_2 sont renfermés, au temps t_1 , dans une sphère V de volume fini. Cependant, une autre difficulté se présente : au même titre, on conclura qu'il est impossible de connaître les valeurs de tous ces paramètres avant l'instant t_2 . Donc, on ne peut pas donner au temps t_1 une description ultime D permettant la prédiction de la situation B.

La difficulté serait éliminée si l'univers était spatialement fini. Dans ce cas, du moins, le logicien n'aurait pas d'objections contre l'existence de la description ultime D. Acceptons donc cette supposition afin d'aboutir à une forme de déterminisme non exposée à des objections logiques.

Or, même dans ce cas, le déterminisme implique une hypothèse assez douteuse. En effet, il est bien possible que la série des probabilités $p^{(i)}$ converge vers une limite, tandis que la série des descriptions ne le fasse pas. Cette conception, qu'on peut appeler *indéterminisme classique*, peut être symbolisée par le schéma suivant :

$$(2) \quad \begin{cases} D^{(1)}, D^{(2)}, D^{(3)}, \dots, D^{(l)}, \dots \\ p^{(1)}, p^{(2)}, p^{(3)}, \dots, p^{(l)}, \dots \rightarrow 1. \end{cases}$$

Y a-t-il une possibilité de distinguer entre les deux conceptions (1) et (2) au moyen d'un critère empirique ?

Je propose d'employer le critère suivant : examinons la variation des probabilités lorsque la prévision se rapporte à un instant $t_3 > t_2$. Étant donnée la même description $D^{(i)}$ de la situation A au temps t_1 , nous savons bien que la probabilité diminuera si t_2 est remplacé par t_3 . En répétant cette considération, nous arrivons à une grille probabilitaire de la forme suivante :

$$(3) \quad \left\{ \begin{array}{cccccc} D_1^{(1)} & D_1^{(2)} & D_1^{(3)} & \dots & D_1^{(i)} & \dots \\ p_2^{(1)} & p_2^{(2)} & p_2^{(3)} & \dots & p_2^{(i)} & \dots \rightarrow 1 \\ p_3^{(1)} & p_3^{(2)} & p_3^{(3)} & \dots & p_3^{(i)} & \dots \rightarrow 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_k^{(1)} & p_k^{(2)} & p_k^{(3)} & \dots & p_k^{(i)} & \dots \rightarrow 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & \\ p & p & p & & p & \end{array} \right.$$

Les indices inférieurs indiquent le temps ; les indices supérieurs le degré de détail de la description. Sur chaque ligne, les probabilités convergent vers la valeur 1. Dans chaque colonne, elles diminuent et convergent vers une probabilité moyenne d'apparition de la situation B, indépendamment de la situation A.

Quoique cette grille soit convergente, elle ne présente pas une convergence uniforme. Étant donné un intervalle d'exactitude ε , on peut trouver, pour le temps t_k , une description $D_1^{(i)}$ telle que $p_k^{(i)} \geq 1 - \varepsilon$; mais pour la même description $D_1^{(i)}$ il y a un temps t_m , $m > k$, tel que $p_m^{(i)} < 1 - \varepsilon$. Donc, il n'y a pas de description $D_1^{(i)}$ qui prédise la situation future pour tous les temps avec une probabilité $p^{(i)} \geq 1 - \varepsilon$. Par conséquent, on ne peut pas assigner une valeur définie au coin inférieur droit : en suivant la dernière colonne, on y mettrait la valeur 1 ; en suivant la dernière ligne on y mettrait la valeur p .

Il me semble que cette grille probabilitaire indique que l'hypothèse du déterminisme n'est pas confirmée par l'expérience, même en physique classique. Il est vrai, la supposition d'une description ultime D ne contredit pas logiquement la structure de la grille. Mais si cette description ultime D existait, elle différerait essentiellement de toutes les descriptions $D^{(i)}$, en cela qu'elle établirait une colonne de probabilités non décroissantes, tandis que les valeurs des probabilités dans chaque

colonne introduites par un $D^{(i)}$ décroissent. On peut donc considérer la grille de convergence non uniforme comme une *preuve inductive* contre l'hypothèse du déterminisme, ou du moins, comme l'expression de l'absence de toute preuve inductive en faveur de cette hypothèse.

Bien sûr, une *preuve déductive* contre cette hypothèse ne peut pas être donnée; en d'autres termes, on ne commet pas de contradiction logique si l'on ajoute la supposition de l'existence d'une description ultime aux faits d'observations englobés dans cette grille. Mais cette hypothèse sera introduite au prix du sacrifice d'une continuité, parce qu'il n'y a pas de transition continue de colonnes $D^{(i)}$ observables à la colonne ultime D non observable. Et la continuité est l'essence de l'inférence inductive. Il en serait différemment si la grille offrait l'aspect d'une convergence uniforme : dans ce cas, on pourrait la considérer comme preuve inductive de l'existence d'une description ultime.

En employant le langage d'une théorie de la signification qui se base sur la vérification, on peut traduire ce résultat comme suit. Le déterminisme, s'il existe, ne se manifeste pas en des relations entre les quantités observables. Ces relations, bien sûr, n'excluent pas le déterminisme; mais elles ne le confirment pas non plus. Le déterminisme, en physique classique, représente une addition vide au système des relations observables; s'il est omis, si l'on renonce à parler d'une description ultime, rien ne change dans l'ensemble des énoncés vérifiables.

Enfin, venons-en à considérer la situation dans la mécanique des quanta. On sait bien qu'à cause de la relation d'incertitude de Heisenberg on ne peut pas augmenter la probabilité d'une prédiction au delà d'une certaine valeur $p < 1$. Nous arrivons donc au schéma suivant :

$$(4) \quad \begin{cases} D^{(1)}, D^{(2)}, D^{(3)}, \dots, D^{(i)}, \dots, \rightarrow D, \\ p^{(1)}, p^{(2)}, p^{(3)}, \dots, p^{(i)}, \dots, \rightarrow p. \end{cases}$$

Si les descriptions $D^{(i)}$ approchent une certaine description limite, donnée par la fonction ψ caractérisant la situation A , les probabilités $p^{(i)}$ croissent et convergent vers une valeur $p < 1$. C'est ce schéma qui formule l'indéterminisme quantique.

En comparant les trois schémas (1), (2), (4), on voit bien qu'il s'agit ici d'une extension continue de concepts. Le déterministe croit en l'existence d'une description ultime à l'aide de laquelle il arriverait à

une connaissance parfaite, telle que « rien ne serait incertain pour lui, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux ». L'indéterministe classique abandonne l'idée de cette description ultime; il se contente d'améliorer ses prédictions pas à pas, sans jamais prétendre arriver par ce procédé à une prédiction parfaite. L'indéterministe de la théorie des quanta restreint la puissance des prédictions à une limite au-dessous de la probabilité 1; et il peut admettre l'existence d'une description ultime parce que cette description limite n'offre aucune certitude de prédiction.

Ce tableau logique de la situation est présenté ici afin de démontrer qu'il s'agit d'une question de physique, et non d'une question de vues philosophiques ou de conception du monde. Je ne crois pas qu'il y ait des questions soit-disant philosophiques exemptes de traitement scientifique. Si la philosophie s'occupe des problèmes de la structure du monde, elle doit abandonner l'idée de dériver cette structure d'une intuition alléguée en des vérités éternelles. Les vérités philosophiques d'hier sont devenues les erreurs courantes d'aujourd'hui. Le philosophe qui veut contribuer à rendre compréhensible l'univers ne peut aider le physicien qu'en cherchant la forme correcte d'une question, mais pas en cherchant la réponse. C'est-à-dire, sa contribution consistera en une analyse logique des problèmes, qui sépare le contenu physique d'une théorie des additions sous forme de définitions et qui clarifie la signification des mots au lieu de prescrire des formes de pensée. Le philosophe peut définir le déterminisme et aussi bien l'indéterminisme; mais il ne peut pas désigner une de ces formes structurelles comme existante. C'est le physicien qui s'assure de la structure qui correspond aux faits d'observations.

D'après la physique des quanta c'est le schéma (4) qui décrit les relations causales gouvernant le monde physique; c'est-à-dire, elle a décidé en faveur de l'indéterminisme. Ce résultat dérive du principe que la fonction ψ englobe tout le matériel qui peut être fourni par des observations. Si ce principe, qu'on peut appeler le « *principe synoptique de la théorie des quanta* », est accepté, tout le reste est de la mathématique; ce qui veut dire qu'on peut en dériver mathématiquement les relations d'incertitude. Ces relations expriment uniquement le fait que l'analyse de Fourier d'un paquet d'ondes fournit un plus grand nombre de fréquences, ou oscillations harmoniques, dans la mesure ou l'extension du paquet est plus réduite. Une fois le principe synoptique accepté,

on n'a plus besoin de discuter l'existence de variables cachées, précisément parce que de telles variables constitueraient des quantités physiques non subordonnées à ce principe. Donc, l'étude du problème du déterminisme aboutit à la question : à quel titre la physique des quanta maintient-elle le principe synoptique ?

On peut répondre que ce principe a été corroboré par beaucoup d'observations. On n'a jamais rencontré un cas où il était possible de faire des mesures hors des limites fixées par la relation de Heisenberg ; et l'on a toujours pu exprimer la somme totale de toutes les observations par une fonction ψ . Des expériences de ce genre, bien sûr, offrent des raisons d'accepter le principe ; elles servent à indiquer qu'il est avantageux d'employer le principe, mais elles ne peuvent pas l'établir comme raisonnablement hors de doute. En d'autres mots, elles ne peuvent pas conférer à ce principe le titre d'une loi naturelle. On pourrait toujours s'attendre à rencontrer un jour une situation expérimentale qui admette des observations qu'on ne puisse pas englober dans une fonction ψ . C'est, par exemple, la supposition d'Einstein ; il considère la mécanique des quanta comme théorie statistique comparable à l'interprétation statistique de la thermodynamique classique, théorie qui nous permet de prédire les valeurs moyennes de certaines quantités contrôlables par des mesures, mais qui n'exclut pas la construction d'une théorie détaillée déterminant les valeurs individuelles de toutes les quantités physiques à l'aide de lois causales strictes.

C'est-à-dire, le principe synoptique a deux côtés, un côté positif et un côté négatif ; il admet de calculer à l'avance les résultats de certains arrangements expérimentaux, mais, d'autre part, il exclut l'existence d'observations enfrenant la loi de Heisenberg. C'est ce second aspect qui est attaqué par les déterministes, qui ne doutent pas de la légitimité du premier.

Pour trouver une solution, procédons par une méthode que l'on peut appeler la méthode de la situation retournée. Supposons que la partie positive du principe soit correcte, tandis que la partie négative doive être abandonnée. Quels seraient les résultats dérivables pour les objets physiques, pour les particules qui auraient une existence bien définie comme les molécules de la physique classique ?

Il faut d'abord se rappeler l'état logique de la statistique classique de Boltzmann et Gibbs. L'existence de lois probabilitaires n'y contredit

pas la supposition d'un déterminisme gouvernant la trajectoire de la molécule individuelle. Boltzmann a établi son fameux théorème H tout en supposant que la mécanique newtonienne détermine et le mouvement de chaque molécule et leurs collisions. En effet, Boltzmann a pu dériver la métrique probabilitaire existant dans l'espace de phases, des équations canoniques du mouvement à l'aide du théorème de Liouville, qui fournit des probabilités égales pour des volumes égaux dans cet espace. Et de nos jours, von Neumann et Birkhoff ont réussi à déduire le théorème ergodique de ces mêmes équations, théorème que Boltzmann avait ajouté à ses calculs comme axiome indispensable, mais qu'il ne pouvait pas démontrer. Or, la statistique classique des gaz et le déterminisme sont bien compatibles; ce sont des enfants du même père, pour ainsi dire, le père étant Newton, et les enfants vivant en harmonie préétablie par les équations canoniques. La physique classique, même si elle était incapable d'apporter beaucoup de raisons en faveur de l'indéterminisme, ne pouvait certainement pas invoquer de preuves décisives contre son existence.

Examinons maintenant l'état logique de la statistique des quanta. La statistique de Boltzmann y a été remplacée par celles de Bose et de Fermi, selon lesquelles les particules élémentaires sont indiscernables, c'est-à-dire ne possèdent aucune individualité. Par conséquent, cette théorie donne des nombres différents pour les combinaisons possibles des particules, résultat qui à son tour fournit des valeurs nouvelles pour les quantités thermodynamiques. Or, ces valeurs ayant été confirmées par des observations, on conclut qu'inversement les expériences nous informent que les particules sont indiscernables, ou du moins se comportent comme si elles l'étaient. Il faut étudier la signification de ce résultat.

Personne n'aurait dit, au temps de la physique classique, qu'il était capable de distinguer véritablement deux molécules l'une de l'autre, ou qu'il serait jamais capable de le faire. On ne peut pas observer une molécule individuelle, moins encore la marquer, comme les zoologues marquent les poissons ou les oiseaux. L'affirmation du physicien classique suivant laquelle chaque molécule possède une individualité doit être comprise indirectement : les molécules possèdent des individualités parce que leur comportement statistique indique que deux arrangements

de molécules doivent être comptés comme différents, si l'un diffère de l'autre seulement par un changement de place de quelques molécules. L'inférence globale remplace la vérification directe. Or, appliquant la même inférence, nous dirons qu'en physique quantique les particules n'ont pas d'individualité.

Les déterministes, par contre, croient en l'individualité des particules ; ils refusent de fermer la porte à la possibilité qu'un jour on parvienne à localiser et à observer de façon continue une particule individuelle. Examinons quelle en serait la conséquence. Nous serions obligés d'interpréter les statistiques de Bose ou de Fermi, qui demeureraient valables, comme produites par un ensemble de particules individualisées. Ceci est possible, mais amène des conséquences assez étranges.

Imaginons que nous jouions à pile ou face. En jetant deux pièces de monnaie simultanément, nous distinguons quatre combinaisons possibles, qui peuvent être symbolisées, A désignant pile et B face, sous la forme suivante, en distinguant les deux pièces de monnaie par des indices :

$$(5) \quad A_1 A_2, \quad A_1 B_2, \quad B_1 A_2, \quad B_1 B_2.$$

La combinaison pile-face quel qu'en soit l'ordre, se produira dans la moitié des cas, tandis que chacune des deux autres combinaisons ne se produira que dans un cas sur quatre.

Supposons maintenant que le jeu de pile ou face soit gouverné par la statistique de Bose. Nous aurions donc le cas pile-face dans un cas sur trois ; et la même fraction serait observée pour le cas pile-pile et pour le cas face-face. Est-ce que nous serions obligés de conclure que les pièces de monnaie sont indiscernables ?

Point du tout. On peut les distinguer facilement par observation directe. Nous arriverions à une conclusion différente : nous conclurions que les coups n'étaient pas indépendants les uns des autres. Nous dirions que si la première pièce montre pile, il y a une tendance pour l'autre pièce à montrer le même côté, telle que la probabilité de la combinaison $A_1 B_2$ soit réduite à $\frac{1}{6}$. Le même raisonnement s'applique à la combinaison $B_1 A_2$, et la probabilité de la disjonction $A_1 B_2$ ou $B_1 A_2$ prend la

valeur observée $\frac{1}{3}$. Cette interprétation peut être étendue, de façon cohérente, à une disjonction de r cas possibles⁽³⁾.

L'interprétation sera plus compliquée si l'on emploie trois dés qui fournissent la statistique de Bose. Dans ce cas, il n'existe pas seulement une dépendance liant un dé à chacun des autres; il existe aussi une dépendance entre un dé et les deux autres, pris en combinaison. Cela veut dire que nous devons considérer des probabilités relatives qui ont une classe de référence à deux termes, telle que l'expression $P(A_1, B_2, C_3)$, qui signifie la probabilité d'avoir face C au troisième dé si le premier montre la face A et le second la face B. Nous avons ici

$$(6) \quad \begin{cases} P(A_1, B_2, C_3) \neq P(A_1, C_3), \\ P(A_1, B_2, C_3) \neq P(B_2, C_3). \end{cases}$$

Examinons les conséquences de cette considération probabilitaire pour le problème de la statistique quantique des gaz. Le fait que la statistique des gaz fournit la distribution calculée par Bose ou par Fermi est bien confirmée par l'expérience. Si nous devons la mettre en accord avec l'idée de particules discernables, il nous faudra introduire des forces entre les particules qui les entraînent ou les repoussent de façon que leurs mouvements ne soient plus indépendants les uns des autres. Chaque particule dépendrait non seulement de chaque autre particule, mais aussi de la totalité des positions des autres particules. Ces forces seraient d'une nature assez étrange parce qu'elles seraient transmises instantanément à travers l'espace et ne pourraient être observées que par leurs effets sur la statistique seule.

On voit bien que le problème du déterminisme se pose, en théorie des quanta, sous une forme essentiellement différente qu'en physique classique. La statistique classique des gaz est compatible avec le déterminisme; et quoiqu'on puisse considérer le déterminisme, en physique classique, comme une addition peu nécessaire, cette physique n'offre aucune indication contraire. La statistique des quanta, par contre, ne peut guère être conciliée avec le déterminisme. Cela ne veut pas dire que le déterminisme soit absolument exclu. S'il y avait des méthodes permettant d'observer les mouvements individuels des particules sans

⁽³⁾ Voir mon livre *The Theory of Probability*, Berkeley, 1949, p. 156.

les déranger, et si ces observations prouvaient l'existence de lois strictes à l'aide desquelles on pourrait prédire exactement les chemins des particules, le déterminisme serait établi. Mais de quelle sorte de physique nous aurait-il fait cadeau ! Ce serait une physique de forces mystiques, loin de l'idée de force acceptée en physique classique ; et la physique résultante ne ressemblerait guère à celle de Newton et de Laplace. En effet, elle serait plus éloignée des principes du bon sens que la physique indéterministe des quanta acceptée aujourd'hui.

Voilà la raison pour laquelle le principe synoptique, suivant lequel le contenu des observations peut toujours être englobé dans une fonction ψ , est solidement établi par la physique des quanta, dans sa partie négative tout aussi bien que dans sa partie positive. Ce n'est pas seulement l'absence d'autres formes d'observation qui a persuadé le physicien d'accepter ce principe. Le système de la physique quantique, dans sa totalité, constitue une preuve intrinsèque en faveur du principe synoptique et donc contre la validité du déterminisme. Toute réunion de la partie positive de la physique quantique et le déterminisme nous amènerait à des conséquences si absurdes qu'elles ne peuvent être acceptées comme plausibles ; inversement, la déduction de ces conséquences présente un argument inductif contre le déterminisme.

On peut comparer la situation à celle qui existe dans la théorie de la relativité en ce qui concerne le principe de la vitesse limite des signaux, qui est égale à la vitesse de la lumière. Ce principe d'Einstein n'est pas basé seulement sur le fait qu'on n'a pas trouvé de signaux ayant une vitesse supérieure à celle de la lumière. Il est fondé, plutôt, sur le témoignage d'une théorie complète et couronnée de succès dont les conséquences seraient absurdes si le principe d'Einstein était faux. La partie négative de ce principe, l'exclusion de signaux plus rapides que la lumière, est donc basée sur des raisons positives ; c'est pourquoi le principe a été accepté.

La statistique des quanta et le déterminisme sont des ennemis naturels ; ils ne proviennent pas du même père. J'ai présenté dans ce qui précède quelques idées qui peuvent servir à éclairer cette divergence. Cependant, il y a beaucoup à ajouter. Les difficultés que je viens de décrire pour la statistique de Bose et de Fermi ne forment qu'une partie d'un problème plus général, problème qui a pris une tournure inattendue dans la physique des quanta : le problème des objets inobservés.

C'est à quelques idées concernant ce problème général qu'est consacré le chapitre suivant.

CHAPITRE II.

LES OBJETS INOBSERVÉS ET LA LOGIQUE A TROIS VALEURS.

Le temps où Newton et Huyghens discutaient la nature de la lumière marque le commencement d'un développement historique qui se divise clairement en trois phases. Pendant environ les cent années qui suivirent l'œuvre de Newton, la théorie corpusculaire était généralement acceptée. La seconde phase commença quand, avec les découvertes de Young et Fresnel, la théorie ondulatoire reçut un support inattendu; et lorsque Maxwell et Hertz eurent démontré l'existence d'ondes électriques, la théorie ondulatoire devint « une certitude, humainement parlant », si je peux me permettre de citer les termes de Heinrich Hertz lui-même. Le développement qui suivit a montré que l'intuition profonde de ce grand physicien ne s'est jamais manifestée aussi lucidement que dans ces mots « humainement parlant ». Ces mots ont anticipé la troisième phase, la phase de la dualité ondes-corpuscules, qui s'est rattachée aux découvertes de M. de Broglie et qui représente ce que nous pouvons appeler aujourd'hui « la forme définitive, humainement parlant ». Essayons de préciser la signification de cette solution, qui n'est pas restreinte à l'interprétation de la lumière, mais s'applique tout aussi bien à celle de la matière.

Il est arrivé à plusieurs reprises que des questions physiques aient invité le physicien à devenir philosophe. Bien sûr, sa philosophie n'est pas du genre des systèmes qui ont en stock des réponses toutes prêtes à toutes les questions qui peuvent être posées. Le physicien est satisfait s'il peut trouver une réponse à la seule question dont il s'occupe à ce moment-là; mais il insiste pour que la réponse soit donnée en une langue précise, aussi précise que les équations de la physique, et ne s'évanouisse pas dans un brouillard de mots et d'images. Heureusement, une telle langue existe aujourd'hui, et elle a été munie d'outils compa-

rables aux équations mathématiques, les formules de la logique mathématique.

Le problème des ondes et des corpuscules est un problème de logique de la connaissance. Il se rapporte à la relation entre observation et objet inféré, à la méthode d'étendre la connaissance acquise par observation des objets macroscopiques à des objets non observables, méthode d'importance vitale pour la physique, par l'emploi de laquelle elle a fait ses grandes découvertes et qui, en fin de compte, l'a entraînée dans des difficultés inouïes. Étudions cette méthode, d'abord sous une forme tout à fait générale, puis dans son application au problème des ondes et des corpuscules.

Les exigences de la vie pratique nous demandent d'ajouter à nos observations une théorie des objets inobservés. Cette théorie est assez simple : on suppose que les objets inobservés sont semblables à ceux que l'on observe. Personne ne doute qu'une maison ne soit la même chose qu'on l'observe visuellement ou non. L'acte de l'observation ne change pas les choses, ce principe nous paraît un truisme. Cependant, une réflexion brève nous montre qu'il est tout à fait impossible de le vérifier. Une vérification nous demanderait de comparer l'objet inobservé à l'objet observé, donc à observer l'objet inobservé, ce qui aboutit à une contradiction.

Il s'ensuit que ce principe n'a pas le statut logique d'une proposition vraie. Il s'agit plutôt ici d'une convention ; on introduit la définition que l'objet inobservé est gouverné par les mêmes lois que celles qui ont été vérifiées pour les objets observés. Cette définition constitue une règle qui nous permet d'étendre le langage des observations aux objets inobservés ; appelons-la donc une *règle d'extension du langage*. Une fois cette règle établie, on peut s'informer si l'objet inobservé est égal à l'objet observé ou non ; par exemple, on peut conclure que la maison reste à sa place quand nous ne la regardons pas, tandis que la jeune fille ne reste pas dans la boîte quand le magicien scie la boîte en deux morceaux. Des énoncés pareils n'auraient aucun sens si l'on n'avait ajouté une règle d'extension au langage des observations.

Le dernier exemple démontre un cas où la règle nous permet d'inférer qu'il y a un changement dans l'objet inobservé. En employant un exemple plus scientifique, je pourrais parler du changement de température qui se produit quand on met un thermomètre dans un réservoir

d'eau. Il s'agit là d'un cas où l'acte de l'observation change l'objet; malgré ce changement, nous n'avons aucune difficulté à calculer la valeur de ce changement à l'aide des lois thermodynamiques. Il semble donc que la règle d'extension du langage nous permette de parler toujours, sous forme de propositions douées de sens ⁽¹⁾, des objets inobservés.

Cependant, nous devons examiner cette thèse de plus près. Une règle de langage est arbitraire, bien sûr; mais on peut se demander s'il est toujours possible de l'appliquer. En d'autres termes, il faut étudier la question de savoir si le système physique construit à l'aide de cette règle est cohérent. En physique classique, la réponse est évidemment affirmative; mais ce fait doit être regardé comme un résultat d'expérience. On ne peut pas démontrer par des considérations purement logiques qu'il est toujours possible de construire une langue physique satisfaisant à la règle d'extension. Voilà le point où la physique des quanta diffère de celles des objets macroscopiques, possibilité qui avait échappé aux investigations logiques antérieures à la mécanique ondulatoire.

Dans cette nouvelle mécanique, il faut distinguer deux questions différentes. La première concerne la perturbation de l'objet par l'acte de l'observation. La seconde concerne l'état de l'objet inobservé. On se tromperait si l'on voulait conclure que la perturbation par l'observation entraîne nécessairement l'indétermination de l'objet inobservé. L'exemple du thermomètre introduit dans le réservoir d'eau montre que la perturbation par l'observation n'exclut pas la détermination de l'état de l'objet avant l'observation : on peut calculer cet état à l'aide de la théorie physique. Si la même méthode ne s'applique pas à la physique des quanta, il faut qu'on apporte des raisons spéciales pour cette impossibilité; c'est ici qu'intervient le problème de la règle d'extension du langage.

Étudions d'abord la première question. Il existe une méthode très simple pour démontrer le fait de la perturbation par l'observation. Ce fait se déduit d'une manière bien connue, du théorème de l'addition

(1) J'emploie les termes « sens », « doué de sens », « dénué de sens », comme équivalents des mots anglais « meaning », « meaningful », « meaningless ». Par contre, j'emploie le mot « raisonnable », comme son équivalent anglais « reasonable », dans la signification plus spécifique de « conforme au bon sens ». Une proposition douée de sens est donc une proposition qui a un sens, tout en pouvant être peu raisonnable.

des amplitudes probabilitaires. Si nous avons trois quantités u , v , w non commutatives, ce théorème nous donne la valeur

$$(7) \quad P(u_i, w_m) = \left| \sum_k \alpha_{ik} \beta_{km} \right|^2$$

pour la probabilité de mesurer la valeur w_m après l'observation de la valeur u_i . Les termes α_{ik} et β_{km} représentent les matrices de transformation. D'autre part, le calcul des probabilités nous offre un théorème d'addition de probabilités, sous la forme suivante :

$$(8) \quad P(u_i, w_m) = \sum_k P(u_i, v_k) P(v_k, w_m) = \sum_k |\alpha_{ik}|^2 |\beta_{km}|^2.$$

Les deux expressions (7) et (8) n'étant pas identiques, il faut que nous interprétions l'expression $P(u_i, w_m)$ de deux façons différentes : dans le cas de la relation (8), cette expression signifie la probabilité d'observer la valeur w_m après l'observation de la quantité u_i si une mesure de la quantité v a été intercalée, mesure dont le résultat n'a pas été enregistré, tandis que (7) nous présente cette probabilité calculée pour le cas où aucune mesure n'a été faite entre les deux observations. Or, toute mesure change les conditions physiques; ce fait s'exprime complètement dans des relations reliant les quantités observables.

Permettez-moi d'ajouter une remarque logique. Quoiqu'il nous soit possible de démontrer que l'observation perturbe les objets, on ne pourrait jamais démontrer qu'elle ne les perturbe pas. Cela veut dire que dans une physique différente, qui nous fournirait des résultats identiques pour les deux cas (7) et (8), nous ne pourrions pas conclure que la quantité inobservée est égale à la quantité observée; nous pourrions conclure uniquement qu'il nous est permis de définir ces deux quantités comme égales. Il y a donc une certaine asymétrie entre le cas positif et le cas négatif. En d'autres termes, on ne peut que démontrer, soit l'admissibilité, soit l'inadmissibilité d'une extension du langage tel que l'objet inobservé soit égal à l'objet observé. Nous retrouverons la même asymétrie, tout de suite, dans une question plus générale.

Abordons la seconde question. Étant donné que l'acte d'observation perturbe l'objet, est-il possible de calculer la valeur de la quantité considérée avant l'observation? La réponse dépend de l'admissibilité de

la règle d'extension de la langue, de la convention que les lois naturelles sont les mêmes et pour les objets observés et pour ceux qui ne sont pas observés. Car si cette règle est admissible, elle nous permet l'emploi de la théorie physique pour une inférence révélant l'état de l'objet inobservé, comme dans l'exemple du thermomètre introduit dans le réservoir d'eau.

On a dit quelquefois que la perturbation par l'observation exclut la possibilité d'énoncés doués de sens concernant l'objet inobservé. Cette opinion n'est pas correcte. Il s'agit ici d'un problème d'extension du langage qui existe tout aussi bien pour la physique classique, parce que dans cette physique il y a aussi des observations qui changent l'objet. Une extension pareille n'offre aucune difficulté si la règle d'extension est admissible. Ce qui distingue la physique quantique de celle de la statistique classique des molécules est le fait que cette règle est inadmissible, que l'on peut démontrer que les lois des objets inobservés s'écartent de celles qui gouvernent les objets observés. Nous retrouvons ici la situation logique que nous venons d'étudier : en se basant sur des faits observables seuls, on peut démontrer une certaine différence entre les objets observés et non observés.

Afin d'établir une notation simple, appelons les phénomènes observables simplement *phénomènes* ; ceux qu'on ne peut pas observer nous les appellerons *interphénomènes*, parce qu'on les interpose entre les phénomènes à l'aide d'un procédé d'inférence. Nous emploierons le terme « observable » dans un sens assez large, de façon qu'il renferme des phénomènes comme la coïncidence de deux particules, indiquée par un instrument de mesure. De tels phénomènes quantiques sont inférés des observations macroscopiques par l'emploi de la théorie classique seule ; c'est pourquoi ils peuvent aller de pair avec les phénomènes macroscopiques.

Tandis que les phénomènes offrent partout l'aspect d'objets localisés étroitement, les interphénomènes ouvrent deux possibilités divergentes d'interprétation ; c'est ici qu'apparaît l'alternative, ondes ou corpuscules. Ces concepts n'ont aucune signification si l'on parle de phénomènes seuls ; ils appartiennent à un langage qui renferme les interphénomènes. En parlant de corpuscules, on attribue aux interphénomènes une localisation étroite semblable à celle des phénomènes ; en parlant d'ondes, on considère les interphénomènes comme étendus sur un

large espace. Les deux interprétations représentent deux règles différentes concernant l'extension de la langue, et la question se pose : laquelle des deux satisfait au principe que les lois physiques sont les mêmes aussi bien pour les phénomènes que pour les interphénomènes ?

La réponse est bien définitive : ni l'une ni l'autre ne satisfait à ce principe. La tentative d'assigner aux interphénomènes une existence définie, c'est-à-dire de leur attribuer des valeurs précises de position et de vitesses existant simultanément, nous amène nécessairement à des conséquences étranges concernant le principe de causalité. Je ne parle pas ici de la substitution d'une probabilité à la place de la certitude de la prévision. Ce changement paraît mineur par comparaison à certaines déviations d'un genre différent. La causalité classique renferme l'idée d'une propagation de proche en proche, d'une transmission continue de l'effet causal d'un point de l'espace à l'autre, transmission qui se produit au cours du temps. Par contre, les interphénomènes de la mécanique quantique présentent des relations causales qui surgissent brusquement, qui ne demandent aucun temps de propagation et qui représentent donc une véritable action à distance. A cet égard, les interphénomènes diffèrent essentiellement des phénomènes quantiques, parce que les quantités observables sont toujours gouvernées par des lois causales qui, à l'exception de leur caractère probabilitaire, ressemblent à celles de la physique classique et satisfont aux exigences d'une propagation continue.

Je n'ai pas besoin de donner tous les détails parce que ces résultats ont été souvent discutés. Je pense aux expériences de diffraction, aux dispositifs où un rayon d'électrons passe à travers deux fentes et est projeté sur un écran. On y observe un dessin de franges d'interférences, et l'on sait bien que le dessin produit par deux fentes ne constitue pas la superposition des dessins produits individuellement par chacune si l'autre est fermée. C'est là une observation macroscopique qui ne peut être traduite en langue d'interphénomènes que sous peine d'une violation du principe de causalité : une particule qui passe par une des fentes sait si l'autre fente est ouverte ou fermée. Ou plutôt, omettant l'anthropomorphisme du mot « savoir », nous dirions que le mouvement d'une particule passant par une fente dépend de la condition physique de l'autre fente, dépendance causale qui contredit le principe d'action de proche en proche. J'ai proposé de parler dans un tel cas, d'une

anomalie causale, terme qui indique la déviation du comportement causal des phénomènes observables.

L'interprétation ondulatoire, il est vrai, remédie à cette difficulté en tant qu'elle présente le dessin sur l'écran comme le produit d'un train d'ondes passant simultanément par les deux fentes et sujet à des interférences. Cependant, cette interprétation nous amène à des anomalies causales d'une autre sorte. L'onde arrive sur l'écran en toute son extension ; mais son effet consiste en un petit éclair localisé à un point seul de l'écran. Dès que l'éclair s'est produit, l'onde s'évanouit dans toute son extension. Cela veut dire que le processus dans un point de l'écran exerce une influence sur l'onde à chaque point du front ondulatoire, influence instantanée qui contredit le principe d'action de proche en proche et qui représente une forme d'anomalie causale. La transition de l'interprétation corpusculaire à l'interprétation ondulatoire n'élimine pas les anomalies causales ; les anomalies ne font que changer de place, et les interphénomènes appelés « ondes » ne sont pas plus raisonnables que ceux qu'on appelle « particules ».

Le mot « raisonnable », il est vrai, représente, lui aussi, un anthropisme. Disons donc qu'aucune des deux interprétations ne peut satisfaire à la règle d'extension du langage, selon laquelle les objets inobservés sont gouvernés par les mêmes lois physiques que les objets observables. Ces derniers ne présentent pas d'anomalies causales ; ce n'est que dans le monde des interphénomènes que de pareilles anomalies subsistent.

Ce résultat s'applique tout aussi bien à une troisième interprétation qui a été étudiée de manière critique par M. Louis de Broglie, il y a plus de 20 ans, et qui a été avancée récemment avec beaucoup de promesses et peu d'analyse logique dans un article de D. Bohm⁽⁴⁾ : l'interprétation de l'onde pilote. Cette interprétation représente une combinaison des deux autres ; elle parle d'un champ d'ondes qui guident des particules. En ce qu'elle emploie l'idée des ondes, cette interprétation évite les anomalies se produisant pour des particules qui passent par une grille de diffraction ; l'interférence est une affaire des ondes seules,

(4) David BOHM, *A suggested interpretation of quantum theory in terms of « hidden » variables* (*Phys. Rev.*, t. 85, 1952, p. 166 et 180). Voir aussi L. DE BROGLIE, *Remarques sur la théorie de l'onde pilote* (*C. R. Acad. Sc.*, t. 233, 1951, p. 641).

et la particule est pilotée selon les trajectoires du champ résultant de la superposition des ondes.

Cependant, les anomalies de l'interprétation ondulatoire se répètent pour cette interprétation; de plus, elle entraîne une autre sorte d'anomalies qui ont été indiquées très clairement par M. Louis de Broglie, dès ses premières études sur ce sujet. Il y a, dans cette théorie, une dépendance du chemin de la particule de la distribution statistique caractérisant l'ensemble des molécules, dépendance résultant du fait que la fonction ψ , qui représente l'onde, exprime en même temps la probabilité d'observer une particule à une certaine place. Les conséquences en sont assez étranges, en particulier, si l'on considère un rayonnement d'intensité faible tels que les particules marchent en file indienne. La trajectoire parcourue par la première particule indique ici la distribution statistique des particules qui vont la suivre. On peut interpréter cette dépendance de deux façons : ou la première détermine causalement le comportement des particules suivantes, ou elle est déterminée dans son comportement par des événements futurs. On n'échappe pas à cette difficulté si l'on attribue à l'onde une réalité physique, comme le croit M. Bohm. Cette onde réelle peut tenir compte du chemin individuel de la particule; mais le fait que l'onde réfléchit la distribution des particules à suivre exprime une harmonie préétablie qui aurait enchanté Leibnitz, mais qui, dans la physique de nos jours, ne peut être appelée qu'anomalie causale.

Permettez-moi d'ajouter ici, quelques mots concernant la question de l'interprétation d'une théorie physique. Je ne crois pas qu'il y ait d'interprétations défendues. En faveur de ceux qui voudraient interpréter les équations quantiques dans un certain sens, j'aimerais dire que je n'admettrais pas en physique de « sens interdit ». Je proposerais de le remplacer par un autre avis disant : « si vous aimez choisir une interprétation, faites-le donc; mais tirez-en les conséquences ». Voici le point qui distingue l'analyse logique de la langue des images. Ceux qui préfèrent s'imaginer le microcosme peuplé d'ondes, ou de particules, ou des deux ensemble, qu'ils le fassent ! Mais qu'ils n'oublient pas de décrire en un langage précis les propriétés de cette réalité physique qu'ils ont créée. Ils seront surpris de l'aspect étrange que le monde de leur construction présente dans une vue de premier plan.

Le problème de la réalité physique se pose, pour le logicien d'aujourd'hui.

d'hui sous forme d'une analyse de langage. Le monde admet une pluralité de descriptions ; chacune est vraie, mais chacune demande, pour être vérifiable, un énoncé des conditions sur lesquelles elle est basée. Il y a donc une classe de descriptions équivalentes, parmi lesquelles on ne peut faire de distinctions qu'en vue d'une simplicité descriptive, c'est-à-dire, une simplicité qui concerne la forme de la description seule et n'a aucune signification pour la question de la vérité. Cependant, on peut examiner la question si la classe renferme un *système normal*, c'est-à-dire une description qui satisfait à la règle d'extension selon laquelle les objets inobservés sont gouvernés par les mêmes lois que les objets observables. Pour la physique classique, un tel système existe ; c'est la langue de tous les jours. Par contre, la physique des quanta n'admet pas de système normal de description ; chaque description admissible renferme des anomalies causales. J'ai proposé le nom de *principe de l'anomalie* pour ce résultat.

Voici la différence décisive entre les deux physiques, et voici la forme dans laquelle la logique moderne traite des propriétés surprenantes du microcosme révélées dans la physique des quanta. Une propriété du monde des petites dimensions s'exprime sous forme d'une propriété de la classe des descriptions admissibles. Pour illustrer cette méthode, on pourrait citer les méthodes géométriques qui caractérisent un espace sous forme des invariants d'une classe de transformations ; et l'on pourrait se rappeler les méthodes de la théorie de la relativité générale qui décrivent un champ de gravitation par des relations invariantes par rapport aux transformations des systèmes de référence.

Une description qui attribue aux interphénomènes une existence bien définie peut être appelée *exhaustive* ; elle donne une réponse à chaque question que l'on peut poser à l'égard de leur état à chaque moment. Cependant, comme ces réponses nous paraissent souvent désagréables, se résolvant en des anomalies causales, on a proposé d'omettre entièrement les énoncés concernant les interphénomènes. On arrive ainsi à une interprétation *restreinte*, interprétation qui ne parle pas du tout d'interphénomènes et qui se réduit aux phénomènes observables.

L'interprétation avancée par Bohr et Heisenberg est de ce genre. Il me semble, cependant, que la défense de parler des interphénomènes ne peut pas être justifiée par des raisons logiques ; elle se base plutôt sur des raisons physiques. C'est à cause de l'absence d'un système nor-

mal qu'il serait prudent de ne pas parler des interphénomènes ; voilà tout ce que l'on peut dire en faveur de cette défense. Et l'absence d'un système normal exprime un fait physique. Les interprétations restreintes dérivent donc d'un fait physique.

Dans le langage du logicien, la théorie de Bohr et Heisenberg prend la forme d'une théorie de la signification. Un groupe de propositions est considéré comme dénué de sens et est donc biffé du domaine des affirmations admissibles. La question se pose si ce remède radical ne dépasse pas les bornes d'une restriction raisonnable. En effet, il paraît douteux que la physique puisse renoncer complètement à une description des interphénomènes. Par exemple, si un rayonnement d'électrons passe par deux fentes et produit un dessin de franges d'interférences sur un écran, on aimerait dire que quelque chose traverse les fentes ; personne ne doute que ce « quelque chose » ne puisse pénétrer la matière solide du diaphragme. Est-il nécessaire de sacrifier cet énoncé banal ? Si nous prenons la conception de Bohr et Heisenberg au sérieux, elle nous le demande.

La logique mathématique offre une méthode d'échapper à cette conséquence inopportune. Elle nous a présenté des systèmes de logiques multivalentes, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels la dualité des valeurs de vérité, « vrai » et « faux », est remplacée par une multiplicité de valeurs. En particulier, c'est la logique à trois valeurs qui s'offre à une interprétation de la physique des quanta. Cette logique renferme une catégorie intermédiaire entre « vrai » et « faux » que l'on peut considérer comme signifiant « indéterminé », catégorie qui peut servir à englober les énoncés concernant les interphénomènes.

Une interprétation très intéressante de ce genre a été construite par M^{me} P. Février, qui a été la première à appliquer les résultats de la logique multivalente à la physique quantique. L'interprétation que j'ai proposée diffère sur certains points de celle de M^{me} Février ; et je me permets de présenter ici les idées générales sur lesquelles est basée cette interprétation ⁽⁵⁾.

L'emploi des tables de valeurs de vérité, méthode développée à l'ori-

(5) La bibliographie sur les logiques multivalentes a été citée dans mon livre *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, Berkeley, 1944, p. 147-148. Voir ce livre pour une exposition détaillée.

TABLEAU I A.
Logique à deux valeurs.

Négation	
<i>a</i>	<i>a</i>
V	F
F	V

TABLEAU I B.
Logique à deux valeurs.

<i>a</i>	<i>b</i>	Disjonction	Conjonction	Implication	Equivalence
		<i>a</i> ∨ <i>b</i>	<i>a</i> . <i>b</i>	<i>a</i> ⊃ <i>b</i>	<i>a</i> ≡ <i>b</i>
V	V	V	V	V	V
V	F	V	F	F	F
F	V	V	F	V	F
F	F	F	F	V	V

TABLEAU II A.
Logique à trois valeurs

<i>A</i>	Négation		
	cyclique	diamétrale	complète
	$\sim A$	$-A$	$\bar{A}$
V	I	F	I
I	F	I	V
F	V	V	V

TABLEAU II B.
Logique à trois valeurs.

<i>A</i>	<i>B</i>	Disjunc- tion	Conjunc- tion	Implication		Quasi- implication	Équivalence	
				normale	alternative		normale	alternative
		<i>A</i> ∨ <i>B</i>	<i>A</i> . <i>B</i>	<i>A</i> ⊃ <i>B</i>	<i>A</i> → <i>B</i>	<i>A</i> ↗ <i>B</i>	<i>A</i> ≡ <i>B</i>	<i>A</i> ≡≡ <i>B</i>
V	V	V	V	V	V	V	V	V
V	I	V	I	I	F	I	I	F
V	F	V	F	F	F	F	F	F
I	V	V	I	V	V	I	I	F
I	I	I	I	V	V	I	V	V
I	F	I	F	I	V	I	I	F
F	V	V	F	V	V	I	F	F
F	I	I	F	V	V	I	I	F
F	F	F	F	V	V	I	V	V

TABLEAU III.

Tautologies.

	Logique à deux valeurs.	Logique à trois valeurs.
T 1. Loi d'identité.....	$a \equiv a$	$A \equiv A$
T 2. Loi de négation { double.....	$\bar{\bar{a}} \equiv a$	$A \equiv \neg \neg A$ $\bar{\bar{A}} \equiv A$
T 3. Loi de négation triple..	—	$A \equiv \sim \sim \sim A$
T 4. Relation entre négations.....	—	$\bar{A} \equiv \sim A \vee \sim \sim A$
T 5. <i>Tertium non datur</i> ...	$a \vee \bar{a}$	—
T 6. <i>Quartum non datur</i> ...	—	$A \vee \sim A \vee \sim \sim A$
T 7. Loi de contradiction...	$a : \bar{a}$	$\frac{A . \bar{A}}{A \sim A}$ $\frac{A . \sim A}{A . \neg A}$
T 8. Lois de Morgan... {	$\bar{a} . \bar{b} \equiv \overline{a \vee b}$ $\overline{a \vee b} \equiv \bar{a} . \bar{b}$	$\neg (A . B) \equiv \neg A \vee \neg B$ $\neg (A \vee B) \equiv \neg A . \neg B$
T 9. Première loi distributive.....	$a . (b \vee c) \equiv a . b \vee a . c$	$A . (B \vee C) \equiv A . B \vee A . C$
T 10. Deuxième loi distributive.....	$a \vee b . c \equiv (a \vee b) . (a \vee c)$	$A \vee B . C \equiv (A \vee B) . (A \vee C)$
T 11. Loi de contraposition... {	$\bar{a} \supset b \equiv \bar{b} \supset a$ $a \supset b \equiv \bar{b} \supset \bar{a}$	$\neg A \supset B \equiv \neg B \supset A$ $\bar{A} \rightarrow B \equiv \bar{B} \rightarrow A$ $A \supset B \equiv \neg B \supset \neg A$
T 12. Dissolution de l'équivalence.....	$(a \equiv b) \equiv (a \supset b) . (b \supset a)$	$(A \equiv B) \equiv (A \supset B) . (B \supset A)$ $(A \equiv B) \equiv (A \rightleftharpoons B) . (\neg A \rightleftharpoons \neg B)$
T 13. Réduction à l'absurde..	$(a \supset \bar{a}) \supset \bar{a}$	$(A \supset \bar{A}) \supset \bar{A}$ $(A \rightarrow \bar{A}) \rightarrow \bar{A}$

gine pour la logique à deux valeurs, convient bien à la construction d'une logique. Ces tables indiquent des relations entre les valeurs des propositions élémentaires et celles des propositions composées à partir de celles-ci à l'aide d'opérations propositionnelles, telles que celles exprimées par les termes « non », « ou », « et », « implique », etc. Leur forme est donnée dans les tableaux I et II. La lettre V signifie « vrai » ; la lettre F signifie « faux » ; la lettre I signifie « indéterminé ». Les théorèmes, ou *tautologies*, d'une logique sont des formules composées qui possèdent un V dans chaque place de leur colonne. Une liste comparative des tautologies des deux logiques est donnée dans le tableau III.

Je ne veux pas entrer dans une discussion détaillée de ces tableaux. Permettez-moi, cependant, de vous indiquer la méthode par laquelle la logique à trois valeurs traite du problème d'un rayonnement passant à travers deux fentes.

Si aucune observation n'est faite aux fentes, on dirait, en employant la logique à deux valeurs, qu'une particule individuelle observée sur l'écran est passée, ou par une fente, ou par l'autre. Cet énoncé, qui appartient à une description exhaustive, nous amène à des anomalies causales, comme nous venons de le discuter. La description restreinte en forme de logique à trois valeurs remplace cette disjonction par une autre, construite à l'aide de trois valeurs et appelée *disjonction diamétrale*. Elle a les propriétés suivantes : si la particule a été observée à l'endroit d'une des fentes, la disjonction est vraie ; et si aucune observation n'a été faite aux fentes et l'énoncé du passage est indéterminé, la disjonction est vraie tout de même. En employant cette signification du mot « ou » nous pouvons donc dire que la particule passe par une fente ou par l'autre, sans arriver à des anomalies causales. La disjonction diamétrale, qu'on peut aussi appeler équivalence des contraires, est écrite dans la forme

$$(9) \quad B_1 \equiv - B_2$$

Cet énoncé, qui est vrai, caractérise le passage du rayonnement à travers les deux fentes. Mais on ne peut pas en dériver la disjonction ordinaire

$$(10) \quad B_1 \vee B_2$$

parce que cette dernière disjonction peut être indéterminée. Ce serait différent en logique à deux valeurs : on y pourrait déduire la relation (10) de la relation (9).

Le langage de la logique à trois valeurs nous permet donc de formuler, en des affirmations admissibles, tout ce que nous savons à l'égard des phénomènes et interphénomènes, sans amener des anomalies causales. Ce n'est que la relation entre les deux sortes de phénomènes qui s'exprime sous forme d'une proposition vraie, tandis qu'un énoncé concernant les interphénomènes séparément reçoit la valeur « indéterminée ».

On peut développer des solutions similaires pour d'autres problèmes aboutissant à des anomalies causales, tels que le problème d'une barrière

d'énergie traversée par des particules, et l'on peut aussi formuler la relation de complémentarité pour deux quantités non commutatives. Ces résultats indiquent que la logique à trois valeurs nous offre une forme de langage qui nous permet de parler du monde des quanta sans aboutir à des conséquences peu désirables.

Essayons de résumer cette analyse du problème des objets inobservés. L'alternative des théories corpusculaires et ondulatoires, qui marquent les deux premières phases des conceptions de la nature de la lumière, a été remplacée, comme résultat des découvertes de M. de Broglie, par une conjonction : le mot « ou » a été remplacé par le mot « et ». En même temps, cette conjonction qui indique la troisième phase du développement historique des investigations de la nature de la lumière, a été étendue de façon à renfermer la nature de la matière. Cependant, une analyse logique montre que ce mot « et », indiquant la conjonction, n'appartient pas à la langue des objets physiques ; il se réfère à une dualité de descriptions et appartient donc à la métalangue, langue qui traite des propriétés des systèmes linguistiques à l'aide desquels nous décrivons le monde physique. De la dualité des descriptions on peut même passer à une pluralité : on peut construire une classe de descriptions équivalentes. C'est sous forme de cette classe que la logique moderne traite du problème des objets inobservés ; et le choix des descriptions se présente comme un choix des règles d'extension du langage.

Quoique cette pluralité de descriptions s'applique déjà à la physique classique, elle n'y a pas d'importance ; parmi les descriptions équivalentes il existe un système normal, qu'il est convenable d'employer en oubliant tous les autres. Par contre, dans la physique des quanta la classe des descriptions équivalentes ne renferme pas de système normal. Chaque description entraîne des anomalies causales si elle est exhaustive, c'est-à-dire, si elle attribue un état bien défini aux interphénomènes. Pour échapper aux anomalies, on peut construire des descriptions restreintes qui excluent les énoncés des interphénomènes du domaine des affirmations vraies. La logique à trois valeurs nous offre une forme adéquate de cette sorte de description et nous permet de parler des interphénomènes dans un mode indirect, tel que les relations entre phénomènes et interphénomènes soient exprimées par des affirmations

vraies, tandis qu'on n'en puisse pas dériver séparément des énoncés concernant les interphénomènes.

Est-ce que ce résultat démontre que la vraie logique des quanta est trivalente ? Je ne crois pas qu'on puisse parler de la vérité d'une logique. Un système de logique est vide, c'est-à-dire, n'a pas de contenu empirique. La logique exprime la forme d'une langue, mais ne formule pas de lois physiques. Cependant, on peut envisager les conséquences résultant, pour la langue, du choix de la logique ; et, en tant que ces conséquences dépendent en même temps des lois physiques, elles réfléchissent des propriétés du monde physique. C'est donc la combinaison logique et physique qui indique la structure de la réalité dont s'occupe le physicien. Une physique quantique sous la forme d'une logique à deux valeurs existe ; mais elle renferme des anomalies causales, tandis qu'une physique quantique employant une logique à trois valeurs ne possède pas de telles anomalies. Cette conclusion, qui est le résultat de toutes les expériences englobées dans la mécanique ondulatoire, exprime la structure étrange du microcosme, structure qui a tant inquiété le physicien, mais qu'il a appris à maîtriser au moyen d'un système ingénieux d'équations et dispositifs expérimentaux. Voilà le résultat général assuré par les travaux des physiciens il ne nous reste qu'à l'accepter, quoique nous sachions bien qu'il s'agisse ici, de nouveau, de certitude « humainement parlant ».

CHAPITRE III.

LA DIRECTION DU TEMPS EN PHYSIQUE CLASSIQUE.

Afin de comprendre la contribution de la mécanique quantique au problème du temps, il faut commencer par étudier ce problème en physique classique. Nous verrons que d'un côté la mécanique ondulatoire renferme un développement destructif du concept du temps, tandis que de l'autre côté elle a donné à ce concept un fondement nouveau, fondement que la mécanique classique ne pouvait fournir.

Le concept du temps englobe des propriétés métriques et des propriétés topologiques. Les propriétés métriques ont été traitées, de nos jours, par la théorie de la relativité ; je n'ai pas besoin de parler ici de

ces découvertes bien connues qui ont changé profondément nos idées de la simultanéité d'événements séparés l'un de l'autre par une distance spatiale. Ce sont les propriétés topologiques dont je veux parler; et j'aimerais montrer que la physique classique nous fournit des instruments puissants propres à l'analyse de l'aspect topologique du temps, aspect qui détermine si complètement notre conception du monde physique tout aussi bien que la forme de nos expériences psychologiques.

L'étude du problème topologique du temps nous demande de distinguer soigneusement entre *l'ordre* et *la direction* du temps. L'ordre du temps correspond à l'ordre des points situés sur une ligne droite; cette extension à une dimension est ordonnée sans posséder une direction. En d'autres termes les points d'une ligne sont ordonnés par rapport à la relation « entre », mais l'on ne peut pas dire si la ligne s'étend de droite à gauche ou de gauche à droite. Pour assigner un sens à la ligne, il faut se servir de moyens extérieurs; par exemple on peut choisir un point et préciser qu'il est situé à gauche d'un certain autre point. Par contre, si l'on s'est donné trois points, la ligne elle-même déterminera celui qui est situé entre les deux autres. De même façon, l'ordre des événements dans le temps concerne des relations exprimées à l'aide du mot « entre », tandis que la direction du temps assigne un sens aux lignes du temps, sens unique qui se manifeste dans le flux du temps, dans la conception que le temps coule du passé vers l'avenir.

On sait bien que la mécanique classique ne peut pas nous fournir *la direction* du temps. Les équations différentielles de la mécanique classique sont du second ordre; donc, étant donné une solution, la substitution de la variable t par la variable $-t$ conduit à une autre solution. Une balle jetée en l'air, une planète se mouvant autour du Soleil, nous offrent des phénomènes *réversibles* : le mouvement se peut produire dans l'une ou l'autre direction. Donc, l'observation du mouvement en tant que phénomène mécanique ne nous donne aucune information sur la direction du mouvement.

Ce résultat étant bien connu, on a souvent oublié que la mécanique classique peut très bien nous donner des précisions sur *l'ordre* du temps. Si une balle passe du point A par le point B au point C, la mécanique nous laisse la liberté de considérer ce mouvement comme une transition de C par B à A, mais elle nous demande de ranger le passage par B entre C et A. C'est pour cette raison que la mécanique classique nous présente

le monde physique comme ordonné temporellement. Dans le cadre de la théorie de la relativité, cet ordre est devenu la source de la théorie causale du temps, selon laquelle le concept du temps provient de l'ordre causal et se base sur la définition suivante : un événement A précède un événement C si un signal émis à A arrive à C. On sait que cette définition, à cause du caractère limite de la vitesse de la lumière, laisse indéterminé l'ordre de certains événements situés sur des lignes d'univers du genre espace, pour lesquelles $ds^2 < 0$. Mais à part cette restriction, elle fixe un ordre du temps du monde physique qui correspond à l'ordre du temps de notre expérience psychologique.

Le temps causal de la théorie de la relativité est ordonné, mais n'a pas de direction. La transformation de Lorentz est invariante par rapport à un renversement du temps : Si l'on remplace t par $-t$ et t' par $-t'$, on obtient de nouveau une transformation de Lorentz, décrivant le mouvement en sens inverse. C'est pourquoi la relativité, malgré sa réduction du temps à la causalité, n'a contribué en rien au problème de la direction du temps.

Une définition de la direction du temps nous demande de distinguer entre cause et effet, c'est-à-dire, d'ajouter au concept de la connexion causale un critère formulant un sens de direction. Un tel critère est fourni par le second principe de la thermodynamique, par le concept de l'entropie. Examinons la signification de ce concept pour la direction du temps.

Au temps de la thermodynamique classique, on n'avait pas de doutes d'avoir trouvé, dans le concept de l'entropie, un instrument permettant d'introduire la direction du temps dans les équations physiques. Cette opinion optimiste rencontra des difficultés sérieuses quand L. Boltzmann donna la solution statistique du second principe de la thermodynamique. Ces difficultés ont trouvé une expression fameuse dans l'objection du renversement des mouvements des molécules : si l'on pouvait renverser les mouvements individuels de toutes les molécules, le gaz passerait d'un état d'entropie supérieure à un état d'entropie inférieure. Un tel passage ne peut pas être exclu si l'on interprète l'entropie comme propriété statistique, parce que les mouvements individuels des molécules sont réversibles. De plus, un tel passage doit se produire, dans l'histoire d'un système isolé, aussi souvent que le passage correspondant d'une entropie inférieure à une entropie supérieure. Ce résultat découle de

certaines théorèmes établis par J. Loschmidt et H. Poincaré; il signifie que dans le diagramme de l'entropie d'un système isolé il y a de temps en temps des recoins, tels que le nombre des montées et descentes est infini et leur quotient converge vers 1.

Il est très intéressant d'étudier les publications concernant l'objection du renversement du temps vers la fin du siècle dernier. Boltzmann nous assure que les transitions inverses se produisent bien rarement dans l'histoire d'un système isolé; il s'ensuit qu'on serait fondé à dire que si l'on observe le système dans un état d'entropie inférieure, on pourra en conclure qu'il passera bientôt à une entropie supérieure. Malheureusement; la même conclusion se déduit en ce qui concerne l'état précédent; on peut démontrer qu'il est très probable que le système provienne d'un état d'entropie supérieure. L'inférence s'applique, sous forme symétrique, à l'avenir et au passé; il nous est donc impossible de définir une direction du temps par rapport à l'entropie d'un système isolé.

Traduisons ce résultat en termes plus précis. Il faut distinguer entre une *inférence du temps à l'entropie* et une *inférence de l'entropie au temps*. La première s'applique à la question suivante : (supposons que le système soit observé dans un état A d'entropie inférieure, quelle sera la valeur de l'entropie dans un état postérieur B? La réponse est qu'il est extrêmement probable que cette valeur soit haute. Ce résultat nous permet de prédire l'état futur du système. La seconde inférence s'applique à la question : supposons que nous ayons observé deux états A et B du système dont A possède une entropie inférieure et B une entropie supérieure; lequel des deux états a précédé l'autre? La réponse est qu'il est aussi probable que A précède B que de B précède A. Ce résultat découle de la symétrie de la première inférence, dont on conclut qu'un état d'entropie inférieure serait précédé, selon toute probabilité, par un état d'entropie supérieure. Nous arrivons au résultat que l'inférence du temps à l'entropie est admissible, ainsi qu'il est communément admis; mais que l'inférence de l'entropie au temps doit être rejetée et qu'il nous est impossible de définir une direction du temps pour un système isolé.

Il existe un système isolé qui nous intéresse tout particulièrement : l'univers. Ce système, sans doute, est complètement isolé. Donc, notre univers ne possède pas de direction du temps; cette conclusion ne peut pas être rejetée s'il est admissible de parler de l'entropie de l'univers.

Mais, est-il admissible d'en parler? On peut en douter. Si l'univers est infini spatialement, le concept d'entropie ne s'y applique pas. Nous n'avons cependant pas besoin d'étudier cette question. La direction du temps est une affaire qui concerne l'ensemble de nos alentours immédiats; si nous devons avoir recours aux nébuleuses lointaines, cachées dans les profondeurs de l'univers, afin de résoudre la question de la direction du temps, nous ne pourrions obtenir une interprétation de l'expérience du temps habituel quotidien. Il faut que nous examinions de nouveau les inférences dont le physicien se sert quand il passe de l'entropie au temps.

En effet, quand il observe un état d'entropie donnée, le physicien se refuse de conclure que cet état ait été précédé d'un autre ayant une entropie supérieure. Supposez qu'on vous montre deux images coupées d'un film, l'une présentant une maison en bon ordre, l'autre présentant la même maison après les effets d'une explosion : vous sauriez bien dans quel sens le film a été déroulé. Vous diriez qu'il est très probable que l'état d'ordre, d'entropie inférieure, a précédé l'état de désordre, d'entropie supérieure, rejetant ainsi la conclusion de Boltzmann selon laquelle la probabilité de cette affirmation n'est que 50 %, la même que pour l'ordre inverse du temps. Comment expliquer ce refus d'accepter les résultats de la physique théorique?

On se heurte à des difficultés lorsqu'on veut préciser la signification du mot « probable », quoique celui-ci soit employé si fréquemment dans le langage quotidien. Une probabilité signifie une fréquence, et une fréquence se rapporte à une classe d'événements, ou plus précisément, à une série d'événements, c'est-à-dire, à une classe ordonnée. Des différences dans la signification du mot « probable » s'expliquent souvent par des différences entre les séries auxquelles le mot se rapporte. Examinons la question de ce point de vue.

La probabilité calculée par Boltzmann se rapporte à l'histoire d'un système isolé, donc à un *ensemble de temps*. Par contre, la probabilité employée dans l'exemple des images des maisons n'est pas de ce genre. Dans l'histoire d'une maison, il n'y a pas assez de changements d'état pour en construire une fréquence; une explosion se produit une fois, et l'histoire de la maison est terminée. Si nous comptons une fréquence, elle concerne une pluralité de maisons; c'est-à-dire, elle concerne un *ensemble d'espace*. La probabilité que nous employons afin d'inférer

une direction du temps ne se rapporte pas à un ensemble de temps, mais à un ensemble d'espace.

Étudions cet ensemble. Il existe beaucoup de systèmes physiques qui proviennent de systèmes plus grands et qui se séparent ensuite de ceux-ci; une fois séparés, il restent quasiment isolés pour une période assez longue. Ces systèmes, que j'appellerai *systèmes d'embranchement*, commencent par un état d'ordre, d'entropie inférieure, et se développent vers un état de désordre, d'entropie supérieure. L'état d'ordre ne se présente pas ici comme un produit de la chance dans l'histoire du système isolé, mais résulte d'une action réciproque entre le système et ses environs; le système plus grand se développe vers un état d'entropie supérieure, tandis qu'un système d'entropie inférieure est créé sous forme d'une partie du système qui le comprend.

L'univers abonde en systèmes d'embranchement de cette sorte. On verse du lait dans le café et crée ainsi un système d'embranchement d'entropie inférieure; les rayons du Soleil chauffent un rocher qui, en combinaison avec la neige autour de lui, représente un système d'entropie inférieure tendant vers une compensation des températures, etc. C'est l'ensemble de tels systèmes d'embranchement qui offre la possibilité d'expliquer la forme de probabilité employée dans l'inférence de l'entropie au temps : au lieu de dire qu'il est probable que le système ordonné soit le produit improbable d'un procédé de séparation dans l'histoire du système isolé, nous disons qu'il est probable que le système n'ait pas été isolé dans le passé et constitue le produit d'une intervention du dehors. Par exemple, si nous trouvons une cigarette brûlant sur un cendrier, nous ne croyons pas que cet état a été précédé par un état où la cigarette étaient entièrement constituée par des cendres, état duquel l'état présent se soit développé par une séparation improbable des composantes chimiques des cendres. Nous préférierions supposer que quelqu'un l'a allumée il y a quelques minutes, et que donc l'état présent improbable est le résultat d'une intervention du dehors. Nous dirions que cette explication est plus probable que la précédente. Ce second mot « probable » se rapporte, non à une fréquence dans l'ensemble de temps, mais à une fréquence comptée dans l'ensemble d'espace des systèmes d'embranchement.

Le calcul des probabilités offre des méthodes de traiter ces deux sortes de probabilités.

On construit une grille probabilitaire :

$$\begin{array}{ccccccc}
 x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1i} & \dots & \rightarrow p \\
 x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2i} & \dots & \rightarrow p \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\
 x_{k1} & x_{k2} & x_{k3} & \dots & x_{ki} & \dots & \rightarrow p \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow & & \\
 p_1 & p_2 & p_3 & & p_i & & \rightarrow p
 \end{array}
 \quad (11)$$

Chaque ligne horizontale représente l'histoire d'un système d'embranchement, donc un ensemble de temps. Par contre, les colonnes représentent des ensembles d'espace. Considérons la probabilité d'un état d'entropie inférieure : dans chaque ligne, cette probabilité p a une valeur très petite. Il en est différemment dans les colonnes : dans la première, la probabilité p_1 d'un état d'entropie inférieure est assez grande parce qu'il s'agit de la colonne des états de séparation, des états du commencement des systèmes d'embranchement. Peu à peu, les valeurs des probabilités $p_2, p_3, \dots$ diminuent et convergent dans la suite vers la probabilité p .

En employant une notation développée dans une autre publication ⁽⁶⁾, j'écris

$$(12) \quad P(B^{ki})^i = p$$

pour la probabilité d'un état B dans une ligne horizontale, et

$$(13) \quad P(B^{ki})^k = p_i$$

pour la probabilité de B dans une colonne. L'indice répété indique donc la direction dans laquelle la fréquence est comptée. La grille convergente (11) est caractérisée par la relation

$$(14) \quad \lim_{i \rightarrow \infty} P(B^{ki})^k = P(B^{ki})^i.$$

Dans la théorie des grilles probabilitaires on montre qu'une telle grille, qui décrit un processus de mélange, est caractérisée par certaines relations spéciales qu'on ne peut pas déduire des axiomes du calcul des

⁽⁶⁾ Voir mon livre *The Theory of Probability*, Berkeley, 1949; et mon article *Les fondements logiques du calcul des probabilités* (*Ann. Inst. Poincaré*, t. 7, fasc. V, 1937, p. 267).

probabilités et qu'il faut considérer comme définitions des types de grilles. Pour la physique, cela signifie que le type de la grille constitue une forme d'hypothèse empirique; c'est-à-dire, que l'expérience seule peut justifier le choix de la grille employée comme description des phénomènes physiques. Il s'agit ici, en particulier, d'une propriété que j'ai appelée *invariance de grille* ⁽⁷⁾ et qui peut être formulée, sous une forme un peu simplifiée, comme suit :

$$(15) \quad P(A^{ki}, B^{k,i+n})^i = P(A^{ki}, B^{k,i+n})^k \quad (n \geq 0).$$

Ces expressions désignent des probabilités relatives. A gauche, nous avons la probabilité horizontale, celle pour qu'un état A d'entropie inférieure soit suivi d'un état B d'entropie supérieure. A droite nous avons une probabilité verticale de la forme suivante : dans la colonne $i + n$ on choisit tous les éléments $x_{k,i+n}$ (ici k est variable, $i + n$ constant) pour lesquels l'élément x_{ki} de la colonne i se trouve dans un état A; et dans la suite partielle ainsi définie on compte les éléments appartenant à l'état B. Si cette fréquence correspond à la fréquence comptée dans une ligne, indiquée à gauche, la condition d'invariance de grille est remplie.

On peut démontrer qu'une grille composée par des séries horizontales à rémanence diminuante (comme les séries de Markoff), si elle satisfait à la condition de l'invariance de grille, est toujours convergente et caractérisée donc par la relation (14). En d'autres termes, quelle que soit la distribution d'un état B dans la première colonne, les colonnes ultérieures ont une tendance à reproduire la distribution B existant dans les lignes horizontales.

Physiquement, cela veut dire que l'ensemble d'espace présente une tendance à reproduire l'ensemble de temps. Cette tendance statistique ne découlant pas des axiomes du calcul des probabilités, elle exprime une loi naturelle, qui est vérifiée par un nombre immense d'observations et s'applique sans exception à tous les ensembles de systèmes physiques, qu'ils soient des groupements de molécules, ou des systèmes macroscopiques composés d'un grand nombre de molécules, ou d'étoiles. Permettez-moi de parler ici d'une *isotropie statistique*, en appliquant à des conditions statistiques un terme qui, dans l'optique,

(7) Voir l'article *Les fondements...*, équat. (60).

indique une équivalence de directions. C'est l'isotropie statistique qui nous offre une explication des phénomènes exprimant la direction du temps.

Car c'est l'isotropie statistique qui force les systèmes d'embranchement à se développer tous dans la même direction. Supposons que la moitié de ces systèmes se développent en sens inverse, débutant par un état d'entropie haute et avançant vers un état d'entropie inférieure. Il s'ensuit que la grille composée de tous les systèmes d'embranchement ne pourrait pas être isotrope : les dernières colonnes, comme les premières, renfermeraient un grand nombre d'états d'entropie inférieure, résultat qui contredit la distribution de pareils états dans les lignes horizontales. La relation (14) ne serait donc pas remplie. Nous concluons que cette supposition est fausse. L'isotropie statistique exprime la propriété de l'univers à laquelle nous devons *le parallélisme de l'augmentation de l'entropie* : la totalité des systèmes d'embranchement définit une seule direction du temps.

Une fois ce résultat établi, il est facile de tenir compte de l'inférence de l'entropie au temps. Si la fréquence est comptée verticalement, à savoir, dans une colonne, on ne trouve qu'une petite probabilité pour qu'un état d'entropie inférieure soit précédé, pour le même système et donc sur une ligne horizontale, par un état d'entropie supérieure ; du moins, ce résultat s'applique aux colonnes initiales de la grille. Nous avons donc réussi à trouver la réponse à l'objection du renversement des vitesses moléculaires. La symétrie des probabilités à l'égard de l'avenir et du passé n'existe que pour l'ensemble de temps ; elle ne subsiste plus pour l'ensemble d'espace. Et la direction du temps peut être définie en fonction de l'entropie parce que l'agrégation des systèmes d'embranchement présente une asymétrie à l'égard du temps, asymétrie provenant du parallélisme de l'augmentation de l'entropie.

Ces idées, il me semble, fournissent la solution du problème de la direction du temps en physique classique. Tandis que la mécanique classique ne nous donne que l'ordre du temps, la thermodynamique statistique distingue entre les deux directions de cet ordre et montre qu'elles sont de qualités statistiques différentes. L'irréversibilité du cours des événements macroscopiques est compatible avec la réversibilité du cours des événements élémentaires.

Vous me demanderez, peut-être, en quoi cette solution diffère de

celle donnée par Boltzmann. Permettez-moi d'ajouter quelques mots à cet égard. Boltzmann voyait bien que la courbe de l'entropie d'un système isolé ne peut pas définir une direction. Il restreignait donc la direction du temps à une partie ascendante de la courbe de l'entropie de l'univers, et il remarquait que les habitants humains de l'univers considéreraient comme temps positif la direction pour laquelle leur partie de la courbe est ascendante. Il savait bien que cette conception entraîne la possibilité de directions contraires du temps pour des périodes cosmiques différentes.

Je n'ai rien à dire contre cette dernière conclusion; en effet, je crois qu'une direction du temps ne peut être définie que pour une période cosmique, et je renonce tout à fait à chaque tentative de traiter du temps cosmique comme un entier. Cependant, il me semble que l'existence d'une montée de la courbe de l'entropie de l'univers, quoiqu'elle soit une condition nécessaire d'une direction du temps, n'en est pas de condition suffisante. Il faut y ajouter l'hypothèse des systèmes d'embranchement gouvernés par les lois d'une isotropie statistique. Aussitôt que nous ajoutons cette hypothèse aux idées de Boltzmann nous arrivons à comprendre la direction du temps; nous pouvons tenir compte des phénomènes nombreux observés dans notre voisinage immédiat qui manifestent la direction du temps. Sans cette hypothèse, qui n'est pas une conséquence logique du fait que la courbe de l'entropie monte, nous ne pourrions pas expliquer l'existence d'une telle direction.

J'aimerais beaucoup présenter quelques autres résultats qui se déduisent des idées développées précédemment et qui concernent un chapitre nouveau : la statistique des phénomènes macroscopiques. Dans les statistiques de cette sorte, on compte comme éléments, non pas les états des molécules, mais les états des systèmes macroscopiques; et l'on peut définir pour eux une entropie macroscopique qui ressemble, à bien des égards, à l'entropie thermodynamique. Afin de donner un exemple, on peut prendre le processus du battage d'un jeu de cartes; il y a beaucoup de processus naturels qui présentent des qualités similaires. Une statistique des accidents de la circulation, par exemple, peut être traitée de ce point de vue, si vous consentez à appeler un accident de circulation un événement naturel.

Il existe une conséquence qui découle de l'hypothèse des systèmes d'embranchement et qui tient compte d'une certaine différence entre la

direction positive et la direction négative du temps. Si nous observons une coïncidence improbable, nous en concluons que les deux événements sont les produits d'une cause commune. Par exemple, si deux lampes électriques s'éteignent simultanément, on conclut qu'un plomb a sauté, ou que le courant a été interrompu pour toute la rue; il serait trop improbable de supposer que les deux lampes ont été grillées au même moment. Il y a aussi un effet commun aux deux événements; il fait noir dans la chambre et l'on s'arrête de lire son journal. Mais cet effet commun ne peut pas servir comme explication de la coïncidence improbable; c'est seulement la cause commune qui peut en offrir une explication, c'est ce que j'appelle *le principe de la cause commune*.

Cette idée peut être exprimée d'une autre façon : on peut inférer la cause totale d'un effet partiel, mais l'on ne peut pas inférer l'effet total d'une cause partielle. C'est pourquoi il est facile d'enregistrer le passé, tandis qu'il est très difficile de prédire l'avenir. Par exemple, on peut déduire la pression barométrique d'hier en partant d'une marque enregistrée sur le papier d'un barographe, mais si l'on veut prédire la pression de demain il faudra connaître des données météorologiques concernant une région beaucoup plus étendue. On peut baser sur ces idées une définition de la direction du temps (*).

Il s'agit là d'une différence assez familière entre la direction positive et la direction négative du temps, différence liée intimement à la distinction entre causalité et finalité, entre explication à l'aide des causes et explication à l'aide des buts. Il n'est pas facile de l'incorporer au principe général statistique formulé dans le second principe de la thermodynamique. Cependant, en employant l'hypothèse des systèmes d'embranchement on peut montrer que le principe de la cause commune, qui gouverne une grande partie de nos inférences et révèle notre croyance en une direction du temps, découle du second principe et représente une application du principe de l'isotropie à la statistique macroscopique. La démonstration fait usage de la grille probabilitaire discutée. Il s'en suit que l'abandon complet du principe de finalité, abandon qui

(*) Je reprends ainsi quelques idées développées dans une publication antérieure : *Die Kausalstruktur der Welt und der Unterschied von Vergangenheit und Zukunft* (Ber. d. Bayer. Akad., München, math.-naturwiss. Abt., 1925). Les inférences dont j'ai parlé y sont formulées à l'aide de fourchettes de lignes d'univers. Cependant, j'ai changé aujourd'hui mes opinions sur les relations mathématiques gouvernant ces fourchettes.

est caractéristique pour la science moderne, ne représente pas une décision arbitraire d'accepter un certain mode de pensée, mais est exigé par le second principe de la thermodynamique, qui nous demande de chercher une explication toujours sous forme de cause.

Enfin, ces idées peuvent être rattachées à une nouvelle branche de la mathématique appliquée, à la théorie de l'information, qui a été développée dans les travaux de C. Shannon, W. Weaver, N. Wiener, et J. von Neumann. On peut employer la mesure de l'information introduite dans ces travaux pour définir la direction du temps en fonction d'une statistique d'événements macroscopiques. En combinant le concept de l'information avec le principe de la cause commune, on peut expliquer le fait qu'on peut enregistrer le passé, mais non pas l'avenir. On arrive ainsi à une théorie des instruments enregistreurs et l'on peut montrer que l'augmentation de l'information indique le flux du temps, la même direction du temps que la thermodynamique caractérise au moyen de l'augmentation de l'entropie.

La relation entre information et entropie est forme réciproque : information signifie entropie négative, et entropie peut être interprétée comme mesure d'ignorance plutôt qu'à d'information. Une valeur haute de l'entropie signifie une classe étendue d'arrangements moléculaires possibles ; et la relation inverse entre information et entropie n'exprime qu'une loi bien connue de la logique traditionnelle, la loi de la relation inverse entre compréhension et extension.

Cette considération nous demande d'ajouter une remarque concernant les instruments enregistreurs. Dans ces instruments, l'augmentation de l'information indique la direction positive du temps ; donc cette direction est indiquée ici par une diminution de l'entropie. Ceci est possible parce que les instruments enregistreurs ne sont pas des systèmes isolés. Ils sont des appareils accumulant de l'ordre tiré de leurs environs ; en effet, leur ordre refléchit l'ordre de l'ensemble d'espace des systèmes d'embranchement et nous informe d'actes d'intervention dans le passé, processus causals enregistrés sur le barillet tournant de l'instrument.

Pourquoi est-ce que je vous présente ces idées au cours d'une analyse des fondements logiques de la théorie des quanta ? Bien sûr, les phénomènes quantiques ne sont pas macroscopiques. Mais ce ne sont pas les phénomènes quantiques eux-mêmes qui constituent l'aspect du monde physique de notre expérience ; ce sont les conséquences de ces phéno-

mènes pour les objets macroscopiques qui créent le système des relations gouvernant le monde de nos expériences. Et ces conséquences, quant à la structure du temps, passent par l'intermédiaire de la statistique des mesures et donc de la statistique des informations enregistrées.

CHAPITRE IV.

LA DIRECTION DU TEMPS DANS LA PHYSIQUE DES QUANTA.

En physique classique, le problème de la direction du temps se présente sous la forme d'un paradoxe : tandis que le cours des événements moléculaires est réversible, celui des événements macroscopiques ne l'est pas. La solution du paradoxe est donnée par la conception statistique de la matière macroscopique, conception qui nous offre la possibilité de construire une différence spécifique entre la direction positive et la direction négative du temps.

On a souvent espéré trouver une solution différente pour la physique des quanta. On a pensé à la possibilité que les phénomènes élémentaires y soient d'une nature irréversible; l'abandon du déterminisme, on l'a cru, pourrait être associé avec un changement de cette sorte parce qu'une mécanique indéterministe serait exempte des lois strictes qui lient l'avenir au passé sous forme d'une correspondance unique. J'aimerais examiner ce problème. Mais avant d'entrer dans les détails, disons tout de suite que le résultat sera négatif, que les phénomènes élémentaires quantiques se sont montrés aussi réversibles que les mouvements moléculaires de la mécanique classique. De plus, certains développements récents montrent que le problème du temps dans les petites dimensions est beaucoup plus compliqué que celui des molécules de la mécanique classique. Celles-ci nous laissaient au moins le concept de l'ordre du temps; mais il semble que les particules de la mécanique des quanta n'admettent même pas un ordre du temps. Pour cette raison, la théorie statistique du temps est indispensable à la physique quantique tout aussi bien qu'à la physique classique. D'autre part, nous verrons que la combinaison des phénomènes quantiques avec la théorie statistique nous amène à des conséquences surprenantes présentant le concept du temps sous un aspect nouveau.

La mécanique classique ne fournit pas de direction du temps parce que ses équations différentielles sont du second ordre. Si nous remplaçons t par $-t$ dans une solution de ces équations, nous arrivons à une autre solution. Or, il en va différemment pour l'équation de Schrödinger parce que cette équation est du premier ordre à l'égard du temps. On a donc cru que cette équation définit une direction du temps.

Écrivons l'équation de Schrödinger dans la forme

$$(16) \quad H_{op}\psi(q, t) = c \frac{\partial \psi(q, t)}{\partial t}, \quad c = \frac{ih}{2\pi},$$

En effet, si $\psi(q, t)$ est une solution de cette équation, $\psi(q, -t)$ n'en est pas une, parce que cette fonction satisfait à l'équation

$$(17) \quad H_{op}\psi(q, -t) = -c \frac{\partial \psi(q, -t)}{\partial t},$$

C'est, par contre, la complexe conjuguée $\psi^*(q, -t)$ qui satisfait à (16), tandis que la complexe conjuguée $\psi^*(q, t)$ satisfait à (17). On le voit facilement si l'on pose

$$(18) \quad \psi(q, t) = \varphi(q) e^{2\pi i \nu t},$$

où $\varphi(q)$ est une fonction complexe qui ne dépend pas de t . Nous avons donc

$$(19) \quad \psi^*(q, -t) = \varphi^*(q) e^{\pi i \nu t}$$

et cette fonction satisfait à (16). Mais les fonctions $\varphi(q)$ et $\varphi^*(q)$ diffèrent l'une de l'autre; on peut donc les distinguer physiquement, par exemple en calculant les distributions d'une quantité qui ne commute pas avec q . Est-ce que nous pouvons en conclure que l'équation de Schrödinger définit une direction du temps?

Cette conclusion ne serait pas valable. Tandis que les observations peuvent distinguer entre φ et φ^* , elles ne peuvent pas distinguer entre $\psi(q, t)$ et $\psi(q, -t)$ c'est-à-dire entre (18) et la fonction

$$(20) \quad \psi(q, -t) = \varphi(q) e^{-2\pi i \nu t}$$

qui possède le même facteur $\varphi(q)$ que $\psi(q, t)$. Comme (20) satisfait à l'équation (17), une distinction entre $\psi(q, t)$ et $\psi(q, -t)$ serait possible seulement si nous avions une possibilité de discriminer entre les

formes (16) et (17). Mais une telle possibilité n'existe qu'à condition que nous connaissions la direction du temps. Le signe du second membre de l'équation de Schrödinger indique la direction du temps, il est vrai; mais ce signe présuppose la direction du temps, et si nous renversons cette direction nous passons de la forme (16) à la forme (17) sans rencontrer aucune contradiction avec l'expérience.

En résumé, toute détermination de la direction du temps à l'aide de l'équation de Schrödinger constituerait un raisonnement circulaire : elle ne fournit pas autre chose que la direction qu'on y a introduite à l'avance par d'autres moyens.

Autrement dit, en physique des quanta nous dépendons des méthodes de la physique classique si nous voulons nous assurer de la direction du temps. En appliquant ces méthodes familières, nous arrivons à un signe du second membre de l'équation de Schrödinger et il n'y a pas d'autre méthode.

Le cours des événements élémentaires quantiques est réversible; les équations de la théorie des quanta ne nous offrent pas de possibilité de définir la direction positive du temps. Voilà le premier résultat de notre analyse. On peut déduire un second résultat qui paraît encore plus destructif pour le concept du temps.

L'identité d'un objet physique au cours du temps est une relation qu'il faut bien distinguer de l'identité logique. Tout est identique avec soi-même; ce principe tautologique de la logique ne peut pas nous donner aucune information sur un objet physique, parce que l'objet physique est composé d'une série d'états successifs. Chaque état est identique logiquement avec lui-même, mais si nous considérons la série entière des états comme constituant un objet physique, nous employons un concept d'*identité physique* que l'on a appelé *genidentité*, en faisant usage d'un terme introduit par K. Lewin.

A l'égard des objets macroscopiques, l'application de ce concept n'offre aucune difficulté. On distingue facilement une personne d'une autre, et même un œuf d'un autre, parce qu'on peut marquer les œufs. Dans le premier chapitre j'ai signalé les difficultés qui apparaissent pour les molécules, et j'ai discuté les méthodes indirectes de définir la genidentité des molécules. On peut résumer les résultats de cette discussion comme suit : en physique classique, il y a une genidentité naturelle des molécules, quoiqu'il ne soit pas possible de s'assurer,

à l'aide d'observations, de l'individualité de chacune d'entre elles. Dans la statistique de Bose ou de Fermi, on peut parler de la genidentité des molécules; mais cette genidentité est arbitraire et peut être introduite sous diverses formes. Cela veut dire que, si deux molécules entrent en collision, on peut les identifier après la collision comme on veut; on ne peut pas distinguer expérimentalement entre une continuité physique et une sorte de « crossing over ». La genidentité est donc devenue l'affaire d'une définition arbitraire. Cependant, il y a encore une genidentité dans le sens suivant : le nombre des particules est constant. Dans ce sens il y a un certain reste d'individualisme : quoiqu'on ne puisse pas distinguer les individus l'un de l'autre, on peut au moins les compter.

Une déviation de ce principe a été observée pour les photons. Mais les photons ne sont pas de la matière ordinaire; ils n'ont pas de masse au repos. La déviation serait plus grave si l'on ne pouvait plus compter les électrons. Cette conclusion, qui représente la fin de l'individualisme, a été tirée par E. Stückelberg et R. Feynman ⁽⁹⁾ dans des travaux récents. Selon ces auteurs, la ligne d'univers d'un électron peut être courbée de façon à retourner vers le passé; dans certaines périodes de son existence, l'électron se déplacerait donc dans le sens inverse du temps. Cette partie de son mouvement, cependant, admet une seconde interprétation : on peut parler d'un positron se mouvant dans le sens positif du temps. Voilà donc deux descriptions équivalentes du même phénomène; l'une est aussi vraie que l'autre, et il n'y a pas d'expérience qui pourrait discriminer entre les deux interprétations.

Dans la discussion du problème des objets inobservés nous avons parlé de la théorie des descriptions équivalentes, et nous avons montré que chaque description exhaustive des interphénomènes, en physique quantique, entraîne certaines anomalies causales. Les résultats de Stückelberg et Feynman offrent une illustration nouvelle de ce principe de l'anomalie. Le chemin d'un électron, en effet, appartient aux interphénomènes; il en est de même pour la question de la genidentité. Les phénomènes observables ne nous donnent aucune information concernant la genidentité; si nous parlons d'un individu qui reste identique à

⁽⁹⁾ E. C. G. STÜCKELBERG, *Helv. Phys. Acta*, t. 14, 1941, p. 588; et t. 15, 1942, p. 23; R. P. FEYNMAN, *Phys. Rev.*, t. 76, 1949, p. 149.

lui-même pendant une certaine durée, nous étendons notre langage de façon à renfermer des énoncés concernant des propriétés inobservées. Selon Stückelberg et Feynman, cette extension du langage peut être construite dans le sens de deux formes différentes l'une de l'autre à l'égard de la direction du temps : ou bien nous avons un individu se déplaçant, en partie, dans le temps négatif, ou bien nous avons deux individus se mouvant dans le temps positif. La première interprétation renferme l'anomalie causale d'une particule allant contre le flux du temps; mais la seconde a d'autres anomalies dont il nous faut parler.

Feynman a proposé son interprétation, en particulier, en vue d'interpréter la production des paires. En présence d'un rayon γ une paire composée d'un électron et d'un positron se produit quelquefois à partir de rien; le positron bientôt rencontre un autre électron, et les deux se fondent de façon à ne laisser qu'un autre rayon γ . Nous avons donc trois individus, deux électrons et un positron, et leur histoire est assez étrange du point de vue de la causalité, en tant qu'elle renferme la production d'une paire à partir de rien, et ensuite l'annihilation d'une paire. Cette anomalie est éliminée, selon Feynman, si l'on remplace les trois individus par un seul, par un électron qui dans une phase de son existence se meut en sens inverse du temps. Évidemment, on a remplacé une anomalie par une autre, et l'on peut choisir, chacun à son goût.

Cette dualité de descriptions est extrêmement intéressante du point de vue de l'analyse logique du temps. Elle indique le fait que même l'ordre du temps n'est pas une propriété invariante dans la classe des descriptions équivalentes. Dans la première interprétation, l'électron venant de l'événement A et le positron venant de l'événement B constituent deux lignes causales dirigées vers l'événement C, où les deux particules se fondent; dans la seconde interprétation, ces lignes ne constituent que des parties d'une seule ligne ACB. Pour cette seconde interprétation, C est donc « causalement entre » A et B; pour la première il n'y est pas. En d'autres termes, l'ordre du temps est ACB, ou si l'on veut, BCA pour l'une des interprétations; pour l'autre, l'ordre est ou AC et BC, ou CA et CB. Il s'agit donc, non pas seulement d'un changement de direction, mais aussi d'un changement de l'ordre du temps.

La mécanique classique ne pouvait pas nous donner une direction du

temps; mais elle nous donnait un ordre. Nous n'avions qu'à assigner une direction à une ligne causale unique et une direction était assignée à chaque ligne. Il n'en est pas de même en mécanique des quanta; on peut renverser la direction d'une ligne causale sans renverser la direction des autres. On ne peut donc pas construire un ordre cohérent, admettant la définition d'une direction du temps. On arriverait à des résultats contradictoires : en suivant le chemin ACB, on trouverait que A précède B; en suivant un autre chemin, on trouverait que B précède A.

Il semble que dans le domaine des quanta le concept de temps perde sa signification directe. La variable t a toujours joué un rôle douteux dans la mécanique des quanta. Elle acquiert une signification seulement lorsqu'on passe à des observations macroscopiques. Si cela est vrai, non seulement la direction du temps, mais même son ordre sera un produit de la statistique. Le temps serait né du chaos des événements élémentaires comme le fil est né de la pelote à l'aide du rouet. On devra attendre le développement de la théorie du noyau atomique avant qu'on puisse parler définitivement de ce qu'on peut prévoir aujourd'hui seulement comme une possibilité.

A propos des idées de Feynman, une autre remarque se présente. La vie d'un positron est assez brève; c'est pourquoi les électrons marchant en sens inverse du temps ne jouent pas de grand rôle dans la statistique des électrons. S'il n'en était pas ainsi, il serait douteux qu'un temps ordonné résultât du chaos atomique. Peut-être y aurait-il des lignes causales fermées dans le macrocosme. On pourrait conclure que l'existence d'un temps linéaire se rapporte à la différence entre l'électricité négative et positive, au fait que l'électricité appelée négative l'emporte sur celle qu'on a appelée positive en ce qui concerne le nombre des particules libres. Selon les conceptions de Dirac, cette supériorité de l'électricité négative dérive du fait que tous les états d'énergie négative sont occupés, tandis que ceux d'énergie positive sont libres en général; le positron n'existe que sous forme d'un trou laissé ouvert quand un électron quitte sa place dans l'océan de la matière invisible. Ce sont des images; mais elles expriment des idées qui possèdent des équivalents dans des équations mathématiques. Une solution de ces problèmes, qui occupent largement la pensée des physiciens, serait susceptible d'éclairer le problème du temps.

Cependant ce sont les relations du temps du macrocosme qui déterminent l'aspect du temps de notre expérience immédiate. A cet égard la théorie des quanta nous présente une conclusion assez intéressante, qui résout certaines difficultés que présente l'analyse du temps dans la physique classique.

La mesure d'une quantité quantique est un procédé qui projette l'incertitude quantique dans le macrocosme. Cela résulte du fait qu'une mesure représente un acte de déclenchement; le phénomène élémentaire, l'arrivée d'une particule, dirige les phénomènes macroscopiques dans une forme unique, et ces phénomènes, l'indication sur un cadran, seraient tout à fait différents si le phénomène élémentaire était différent. C'est pourquoi le procédé de mesure peut nous donner des informations sur le phénomène élémentaire. Et c'est pourquoi il nous est impossible de prédire le résultat de la mesure si elle a été précédée par la mesure d'une quantité non-commutative; cela est exclu par la relation de Heisenberg.

Il existe donc certains phénomènes macroscopiques qu'on ne peut pas prédire, mais que l'on peut enregistrer. Supposons que l'on fasse des mesures consécutives de deux grandeurs non commutatives, de façon alternée. On aura une série d'événements macroscopiques que l'on ne peut pas prédire, mais que l'on peut enregistrer. Cette série nous offre une distinction très nette entre le passé et l'avenir : le passé est déterminé, mais l'avenir ne l'est pas.

Cette thèse demande une explication. L'incertitude quantique, tant qu'elle concerne les phénomènes élémentaires seuls, a une double face : elle se tourne vers le passé de même que vers le futur. Si nous ne possédons que des mesures faites à un certain moment, nous ne pouvons calculer ni les valeurs passées ni les valeurs futures des quantités. S'il n'en est pas de même dans notre exemple, c'est parce que nous avons enregistré les résultats des mesures passées. Nous devons donc notre connaissance du passé, non pas à des méthodes quantiques, mais à des méthodes macroscopiques, aux méthodes employées dans l'utilisation de l'appareil enregistreur.

Mais voici la conclusion surprenante de cette considération. L'analyse de la physique classique nous a montré qu'on peut enregistrer le passé, mais non pas l'avenir. La combinaison de ce résultat avec l'incertitude

de Heisenberg nous amène à la conséquence qu'on peut connaître le passé, mais qu'on ne peut pas prévoir l'avenir.

Pour comprendre la signification de ce résultat, retournons un moment au déterminisme de Laplace. Pour une intelligence supérieure à l'homme, dit Laplace « rien ne serait incertain, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux ». Ce ne sont pas les expériences de chaque jour qui donnent naissance à cette thèse; au contraire, c'est l'opinion de l'homme de la rue que le passé seul est déterminé, tandis que l'avenir est indéterminé. Laplace a tiré sa thèse de la physique classique, et si la science a parlé, le bon sens doit se taire. Cependant, la science moderne a changé de côté; elle s'est rangée du côté du bon sens et nous fournit précisément la différence entre le passé et l'avenir que la physique de Laplace ne pouvait pas reconnaître.

Il est vrai, la physique de Boltzmann, si nous y ajoutons l'hypothèse des systèmes d'embranchement, nous donne une certaine différence de structure entre le passé et l'avenir, différence qui s'exprime dans les inférences dirigées, ou vers des faits passés, ou vers des faits futurs. Nous avons discuté le fait que l'effet partiel admet une inférence à la cause totale, tandis que la cause partielle, en général, n'admet pas une inférence à l'effet total. Mais cette différence, quoiqu'elle nous permit de distinguer entre le passé et l'avenir, n'était pas associée à une différence de détermination : quoiqu'on ne puisse enregistrer l'avenir, on peut le prévoir, en basant la prédiction sur la totalité des causes. On ne peut donc pas appeler le futur indéterminé; ou, du moins, si on le considère comme indéterminé parce qu'une prédiction n'est jamais absolument certaine, on aura à appliquer la même conception au passé, qui non plus ne peut être déduit avec certitude absolue. Pour ce qui concerne la question de la certitude, il existe une symétrie entre le passé et l'avenir, aussi longtemps qu'on reste dans la physique classique.

Il n'en est plus de même en physique quantique. Il est vrai qu'il existe des faits passés qu'on ne peut plus connaître parce qu'on ne les a pas enregistrés; et il y a des faits futurs qu'on peut prévoir très bien, comme les mouvements des planètes, qui sont exempts de l'incertitude des quanta. Mais voilà la différence : il existe des faits futurs qu'il est impossible de prévoir, tandis qu'il n'y a pas de faits du passé qu'il soit impossible de connaître. En principe, on peut toujours les enregistrer. Et j'aimerais supposer que le nombre des événements futurs dépendant,

par des relations de déclenchement, de phénomènes quantiques imprévisibles soit plus grand qu'on le croit. Je ne serais pas surpris si l'on pouvait démontrer qu'un grand nombre d'actions humaines sont de ce genre.

La distinction entre l'indéterminisme de l'avenir et la détermination du passé a trouvé, en fin de compte, une expression dans les lois de la physique. Voici le résultat important découlant de l'union de la statistique classique avec la relation d'incertitude de la physique des quanta. Les conséquences pour le temps de notre expérience, pour le temps de chaque jour, sont évidentes. Le concept de « devenir » acquiert une signification dans la physique : le présent qui sépare l'avenir du passé, est le moment où ce qui était indéterminé devient déterminé, et « devenir » signifie la même chose que « devenir déterminé ».

Il nous reste une question à discuter. Quelle est la relation entre le temps de la physique et le temps de notre expérience ? Pourquoi le flux du temps psychologique est-il identique à la direction de l'entropie croissante ?

La réponse est simple : l'homme est une partie de la nature et sa mémoire est un instrument enregistreur sujet aux lois de la théorie de l'information. L'accroissement de l'information définit la direction du temps subjectif. Les expériences d'hier sont enregistrées dans notre mémoire, celles de demain ne le sont pas, et elles ne peuvent pas être enregistrées avant que le « demain » soit devenu « aujourd'hui ». Le temps de notre expérience est le temps qui se manifeste à un instrument enregistreur. Ce n'est pas le privilège de l'homme de définir un flux de temps ; chaque instrument enregistreur fait la même chose. Ce que nous appelons direction du temps, direction du devenir, est une relation entre un instrument enregistreur et ses environs ; et l'isotropie statistique de l'univers nous garantit que cette relation est la même pour tous les instruments de ce genre, la mémoire humaine incluse.

Ajoutons un mot concernant le terme « maintenant ». La logique symbolique nous enseigne qu'il faut distinguer entre le signe individuel et la classe des signes, appelée symbole. Quant à beaucoup de mots, on peut négliger le signe individuel ; le mot « maison », par exemple, a la même signification dans tous ces exemplaires. Il est différent pour des mots comme « maintenant », « ici », « moi », dont la signification change avec les signes individuels. Permettez-moi de parler, en ce cas,

de *signes réfléchis*, et d'une *signification réfléchie au signe*, en employant le mot « signe » dans le sens de « signe individuel » ⁽¹⁰⁾.

Un acte de pensée est un événement et définit donc une position dans le temps. Si nos expériences se produisent toujours dans le cadre d'un « maintenant », cela veut dire que chaque acte de pensée définit un point de référence. Nous ne pouvons pas échapper au « maintenant » parce que la tentative d'y échapper signifie un acte de pensée et donc définit un « maintenant ». Une pensée sans point de référence n'existe pas, parce que la pensée elle-même le définit. La grammaire exprime ce fait par la règle que chaque proposition doit contenir un verbe, c'est-à-dire un signe réfléchi indiquant le temps de l'événement dont on parle; car le temps du verbe a une signification réfléchie.

Une signification réfléchie s'applique aussi aux concepts « déterminé » et « indéterminé ». Le mot « détermination » dénote une relation entre deux situations A et B; la situation A détermine, ou ne détermine pas, la situation B. Il est dénué de sens de dire que la situation B, considérée séparément, soit déterminée. Si nous disons que le passé est déterminé, ou que l'avenir est indéterminé, il est sous-entendu qu'on se rapporte à la situation présente; c'est par rapport au « maintenant » que le passé est déterminé, et que l'avenir ne l'est pas. Ces mots, et beaucoup d'autres, ont donc une signification réfléchie. Il est vrai, quand même, que ces mots expriment une relation objective; car c'est un fait physique que, si A est la situation définie par l'acte de parler, une situation précédant A est déterminée par rapport à A, tandis qu'une situation qui suit A ne l'est pas.

Il y aurait beaucoup à ajouter, mais il est temps de s'arrêter; et le sujet de cet article étant limité à la physique, je me permets de renoncer à entrer plus avant dans la discussion des problèmes du temps subjectif. C'était mon intention de montrer que la physique des quanta n'a rien à craindre de la logique; qu'une analyse logique de ce chapitre de la physique peut être donnée sans sacrifier ni la précision ni la rigueur;

⁽¹⁰⁾ Je propose cette traduction pour le mot anglais « token-reflexive »; voir mon livre *Elements of Symbolic Logic*, New-York, 1947, p. 284.

et qu'on n'a pas besoin d'une excursion dans le domaine de la philosophie spéculative pour comprendre la théorie des quanta. Je crois, par contre, que la science nous demande la construction d'une philosophie scientifique, et qu'une telle philosophie ne peut exister que par une coopération intime avec la physique.
