

WERNER HEISENBERG

PHYSIQUE ET
PHILOSOPHIEA black and white portrait of Werner Heisenberg is the central focus. Overlaid on the image are various mathematical expressions in a handwritten style, including $y = x^2 e^{3-2x}$, $(uv)'$, $u = x^2 e^3$, $y' = (x^2 e^{3-2x})'$, $\log_2 x + x^2$, and $(x^2)'$. A network diagram with nodes and connecting lines is also superimposed, particularly around the portrait. The overall theme is the intersection of physics and philosophy.

ESPACES
libres

WERNER HEISENBERG

Prix Nobel

PHYSIQUE
ET PHILOSOPHIE

La science moderne en révolution

*Traduit de l'anglais
par Jacqueline Hadamard*

Albin Michel

Pour cette édition au format de poche

© Albin Michel, 2022

Traduction française

© Albin Michel, 1961 et 1971

Édition originale

PHYSICS AND PHILOSOPHY

THE REVOLUTION IN MODERN SCIENCE

© Werner Heisenberg, 1958

Harper & Brothers, New York

ISBN : 978-2-226-47586-2

Ce document numérique a été réalisé par [Nord Compo](#).

ESPACES
libres ■

Sciences

1.

Tradition ancienne et tradition nouvelle

Quand on parle aujourd'hui de physique¹, la première pensée va aux armes atomiques. Leur immense influence sur la structure politique du monde dans lequel nous vivons n'est discutée par personne et l'influence de la physique est, de l'avis général, plus forte que jamais. Mais l'aspect politique de la physique moderne est-il réellement l'aspect le plus important ? Que subsistera-t-il de cette influence quand le monde aura adapté sa structure politique aux nouvelles possibilités techniques ?

Pour répondre à ces questions, il faut se souvenir que tout instrument porte en lui l'esprit dans lequel il a été créé. Chaque nation, chaque groupe politique, où qu'il se situe et quelle que soit sa tradition culturelle, est bien obligé de se préoccuper de ces armes nouvelles, de sorte que l'esprit de la physique moderne pénétrera dans les esprits d'un grand nombre de gens s'imbriquant de diverses manières dans les traditions anciennes. Quel sera l'effet de cet impact d'un domaine particulier des sciences actuelles sur ces diverses traditions, si enracinées et si puissantes ? Dans les parties du monde où s'est élaborée la science moderne, l'intérêt principal a depuis longtemps été porté vers l'activité pratique, vers l'industrie et la technique, en même temps que vers une analyse rationnelle des conditions externes et internes de cette activité. Dans ces pays-là, les gens n'auront guère de peine

à adopter les idées neuves, car ils ont eu le temps de s'adapter insensiblement, palier par palier, aux méthodes de pensée de la science moderne. Mais dans d'autres parties du monde, ces idées se heurteront aux fondements religieux et philosophiques de la culture locale. Or les résultats obtenus par la physique moderne touchent effectivement à des concepts aussi fondamentaux que l'idée de réalité, celle d'espace et de temps, et cette confrontation peut conduire à une évolution entièrement nouvelle que nous ne pouvons encore prévoir. Cette rencontre entre la science moderne et les anciennes méthodes de pensée aura comme caractère spécifique son aspect absolument international. Dans ce heurt d'idées, un camp – l'ancienne tradition – aura des points de vue différents dans les diverses régions du monde, alors que l'autre camp aura partout les mêmes conceptions, de sorte que les résultats de cette controverse se répandront dans toutes les régions où se poursuivra la discussion.

C'est pour des raisons de ce genre qu'essayer de discuter les idées de physique moderne dans un langage qui ne soit pas exagérément technique, étudier leurs conséquences philosophiques, les comparer avec certaines des traditions anciennes est une tâche qu'on peut considérer comme importante.

La meilleure manière d'aborder les problèmes de physique moderne est peut-être de retracer l'historique du chemin suivi par la théorie quantique. Il est vrai que celle-ci ne représente qu'une très petite partie de la science moderne ; mais c'est dans cette théorie que se sont produits les changements les plus fondamentaux et c'est sous la forme finale de la mécanique quantique que les idées nouvelles de physique atomique se sont concentrées et cristallisées. Ce secteur de la science moderne montre un autre aspect très impressionnant, celui de l'énorme équipement expérimental extrêmement complexe qu'exige la recherche en physique nucléaire. Mais si l'on ne considère que la technique expérimentale, la physique nucléaire représente l'aboutissement extrême d'une méthode de recherche qui a déterminé le développement de la science moderne depuis

Huyghens, Volta et Faraday. De même, on peut dire que la complexité décourageante de certaines parties de la mécanique quantique représente la conséquence extrême des méthodes de Newton, de Gauss ou de Maxwell. Mais le changement apporté au concept de réalité, tel qu'il se manifeste en mécanique quantique, n'est pas seulement une continuation du passé : il semble qu'il y ait rupture réelle dans la structure de la science. C'est pourquoi le chapitre suivant sera consacré à l'étude du développement historique de la théorie des quanta.

2.

Historique de la théorie des quanta

L'origine de la théorie des quanta touche à un phénomène bien connu et qui n'appartient pas au cœur de la physique atomique. Tout morceau de matière, quand on l'échauffe, commence à rayonner, à passer au rouge puis au blanc au fur et à mesure que sa température s'élève. Ce changement de couleur ne dépend guère de la nature de sa surface et, pour un corps noir, la couleur ne dépend que de la température. Par conséquent, le rayonnement émis par ce corps noir aux hautes températures est un sujet normal de recherches physiques ; il s'agit là d'un phénomène simple qui devrait admettre une explication simple par les lois bien connues du rayonnement et de la chaleur. Or la tentative d'explication avancée par lord Rayleigh et Jeans au début du XIX^e siècle échoua et révéla de sérieuses difficultés qu'il serait impossible de décrire ici en termes faciles à comprendre. Il faut nous contenter de déclarer que l'application des lois connues ne conduisit à aucun résultat raisonnable. Quand Planck entreprit ce genre de recherches en 1895, il essaya de faire passer le problème du domaine du rayonnement à celui de l'atome émetteur de rayonnement. Ce transfert n'élimina aucune des difficultés inhérentes au problème, mais il simplifia l'interprétation des faits empiriques. C'est justement à ce moment-là, durant l'été 1900, que Kurlbaum et Rubens firent à Berlin de nouvelles mesures très précises du

spectre de rayonnement thermique. Quand Planck eut connaissance de ces résultats, il tenta de les représenter par des formules mathématiques simples qui semblaient raisonnables d'après ses recherches sur les relations générales entre chaleur et rayonnement. Planck et Rubens se retrouvèrent un jour pour prendre le thé chez Planck et comparèrent les derniers résultats de Rubens avec une nouvelle formule proposée par Planck. Cette comparaison montra un accord total. C'est ainsi qu'eut lieu la découverte de la loi de Planck sur le rayonnement thermique.

Ce fut en même temps pour Planck le début d'un intense travail théorique. Quelle était l'interprétation physique correcte de la nouvelle formule ? Étant donné que Planck, grâce à son travail antérieur, pouvait aisément traduire sa formule en une expression mathématique concernant l'atome rayonnant (appelé oscillateur), il a dû rapidement découvrir que, d'après sa formule, tout se passait comme si l'oscillateur ne pouvait posséder que des quanta discrets d'énergie – résultat qui différait tellement de tout ce qu'on connaissait en physique classique qu'il a certainement dû au début se refuser à le croire. Mais au cours d'une période de travail intense durant l'été 1900, il finit par se convaincre qu'on ne pouvait échapper à cette conclusion. Le fils de Planck a raconté que son père lui parla de ses nouvelles idées pendant une longue marche à travers le Grunewald, bois des environs de Berlin. Pendant cette promenade, il expliqua qu'il avait le sentiment d'avoir fait une découverte peut-être de premier plan, comparable seulement aux découvertes de Newton. Planck a donc dû se rendre compte dès ce moment-là que sa formule touchait aux fondements de notre description de la Nature et que ces fondements commenceraient un jour à glisser de leur emplacement classique actuel pour aller vers une nouvelle position stable encore inconnue. Planck était en général d'esprit conservateur et cette conséquence ne lui plaisait aucunement, mais il publia quand même son hypothèse du quantum en décembre 1900.

L'idée que l'énergie ne pouvait être émise ou absorbée que par quanta discrets d'énergie était si nouvelle qu'il était impossible de la faire entrer dans le cadre classique de la physique. Planck tenta de concilier sa nouvelle hypothèse avec les anciennes lois du rayonnement, mais il échoua sur les points essentiels. Il fallut cinq ans pour qu'on fasse un pas de plus dans la nouvelle direction.

Cette fois-ci, ce fut le jeune Albert Einstein, génie révolutionnaire parmi les physiciens, qui ne craignit point de s'écarter davantage des anciennes conceptions. Deux problèmes lui permirent d'utiliser les idées nouvelles : l'un était ce qu'on appelle l'effet photoélectrique, à savoir l'émission d'électrons par les métaux sous l'effet de la lumière ; les expériences, surtout celles de Lenard, avaient montré que l'énergie des électrons émis ne dépendait pas de l'intensité de la lumière utilisée, mais uniquement de sa couleur ou, plus exactement, de sa fréquence. Cela ne pouvait se comprendre d'après la théorie classique du rayonnement. Or Einstein a pu expliquer ces observations en interprétant l'hypothèse de Planck comme signifiant que la lumière consiste en quanta d'énergie se déplaçant dans l'espace ; pour être d'accord avec les hypothèses de Planck, l'énergie d'un quantum lumineux devait être égale à la fréquence de la lumière multipliée par la constante de Planck.

L'autre problème concernait la chaleur spécifique des solides. La théorie classique conduisait pour celle-ci à des valeurs correctes pour les températures élevées, mais qui étaient en désaccord avec les faits pour les basses températures. Là encore, Einstein put montrer qu'on pouvait comprendre le phénomène en appliquant l'hypothèse des quanta aux vibrations élastiques des atomes du solide. Ces deux résultats marquaient un progrès très important, car ils révélaient la présence du quantum d'action de Planck – nom que les physiciens donnent à sa constante – dans plusieurs phénomènes qui n'avaient aucun rapport immédiat avec le rayonnement thermique. Ils révélaient en même temps le caractère profondément

révolutionnaire de la nouvelle hypothèse, puisque le premier résultat conduisait à une description de la lumière qui différait complètement de l'image classique des ondes lumineuses. On pouvait interpréter la lumière comme consistant soit en ondes électromagnétiques d'après la théorie de Maxwell, soit en quanta de lumière, en paquets d'énergie parcourant l'espace à grande vitesse. Mais pouvait-elle être les deux à la fois ? Einstein savait naturellement que les phénomènes bien connus de la diffraction et des interférences s'expliquaient en ne se servant que de la représentation ondulatoire. Il ne pouvait contester la totale contradiction entre la représentation ondulatoire et l'idée des quanta de lumière. Il ne tenta pas même d'éliminer le manque de cohérence de son interprétation. Il accepta tout simplement cette contradiction comme une chose qu'on ne comprendrait probablement que beaucoup plus tard.

Pendant ce temps, les expériences de Becquerel, de Curie et de Rutherford avaient apporté une certaine clarification sur la structure de l'atome. En 1911, les observations de Rutherford sur l'interaction des rayons X pénétrants dans la matière avaient abouti à son célèbre modèle d'atome : un noyau chargé positivement et contenant presque toute la masse de l'atome, et des électrons tournant autour du noyau comme les planètes autour du Soleil. La liaison chimique entre atomes d'éléments différents s'explique en tant qu'interaction entre électrons extérieurs d'atomes voisins ; elle ne concerne pas directement le noyau atomique. C'est le noyau qui détermine le comportement chimique de l'atome par sa charge qui, à son tour, fixe le nombre d'électrons de l'atome neutre. Initialement, ce modèle d'atome ne pouvait expliquer la caractéristique la plus frappante de l'atome, son énorme stabilité : aucun système planétaire qui suit les lois de la mécanique de Newton ne retournerait jamais à sa configuration initiale après une collision avec un autre système de ce genre ; or l'atome de l'élément-carbone, par exemple, reste un atome de carbone après n'importe quel choc ou interaction due à une liaison chimique.

L'explication de cette étonnante stabilité fut donnée par Bohr en 1913, en appliquant l'hypothèse de Planck. Si l'atome ne peut changer son énergie que par quanta discrets, cela doit signifier que l'atome ne peut exister que sous des états stationnaires discontinus, dont l'état à plus basse énergie est l'état normal de l'atome. Par conséquent, après n'importe quel genre d'interaction, l'atome finira toujours par retomber dans son état normal.

En appliquant ainsi la théorie quantique au modèle atomique, Bohr put non seulement expliquer la stabilité de l'atome, mais aussi, pour quelques cas simples, donner une interprétation théorique du spectre de raies émises par les atomes quand ils ont été excités par une décharge électrique ou par une élévation de température. Sa théorie du mouvement des électrons reposait sur une combinaison de mécanique classique et de conditions quantiques se substituant aux mouvements classiques pour définir les états stationnaires discontinus du système. Une formulation mathématique cohérente de ces conditions fut plus tard donnée par Sommerfeld. Bohr se rendait bien compte que les conditions quantiques altéraient en quelque sorte la cohérence de la mécanique newtonienne. Dans le cas simple de l'atome d'hydrogène, on pouvait calculer par la théorie de Bohr les fréquences des raies émises par l'atome et l'accord avec les observations était parfait ; et cependant, ces fréquences étaient différentes des fréquences et des harmoniques des orbites des électrons tournant autour du noyau ; ce fait montrait immédiatement que la théorie était encore pleine de contradictions. Mais elle contenait une part essentielle de vérité : elle expliquait qualitativement le comportement chimique des atomes et leurs spectres de raies. L'existence d'états stationnaires discontinus fut plus tard vérifiée par les expériences de Franck et Hertz, de Stern et Gerlach.

La théorie de Bohr avait ouvert une nouvelle perspective de recherches. On pouvait maintenant utiliser la grande quantité de résultats expérimentaux recueillis en spectroscopie durant plusieurs décennies comme source de renseignements sur les étranges lois quantiques régissant

les mouvements des électrons dans l'atome. Les nombreuses expériences de chimie pouvaient également y contribuer. C'est à partir de cette époque que les physiciens apprirent à poser les questions qu'il fallait ; et poser la question juste, c'est fréquemment avoir fait plus de la moitié du chemin vers la solution d'un problème.

Quelles étaient ces questions ? Pratiquement toutes concernaient les étranges contradictions qui semblaient surgir entre les résultats d'expériences diverses. Comment se faisait-il que le même rayonnement qui produisait des franges d'interférences – et devait donc être constitué d'ondes – produisait aussi l'effet photoélectrique et devait donc consister en corpuscules en mouvement ? Comment se faisait-il que la fréquence du mouvement orbital des électrons atomiques n'apparaissait pas dans la fréquence des rayonnements émis ? Cela signifiait-il qu'il n'y avait pas de mouvement orbital ? Mais si la notion de mouvement sur l'orbite était incorrecte, que devenaient les électrons à l'intérieur de l'atome ? Les électrons se déplacent à travers une chambre de Wilson et, parfois, ils sont arrachés d'un atome ; pourquoi ne se déplaceraient-ils pas dans l'atome même ? Il est vrai qu'ils pouvaient être au repos dans l'état normal de l'atome, c'est-à-dire l'état de plus faible énergie ; mais il existe beaucoup d'états à énergie plus élevée où les couches électroniques ont un moment angulaire (moment de la quantité de mouvement). Par conséquent, les électrons ne peuvent être au repos. On pouvait ajouter un certain nombre d'exemples similaires. Chaque fois, on constatait que la tentative pour décrire à l'aide de la physique classique ce qui se passe dans l'atome menait à des contradictions.

Peu à peu, au cours des années qui ont suivi 1920, les physiciens s'habituaient à ces difficultés, acquirent une certaine connaissance des points où ils s'y heurteraient et apprirent à éviter les contradictions ; ils savaient quelle description d'un phénomène atomique serait correcte pour une expérience déterminée. Cela ne suffisait pas pour formuler une image

générale cohérente de ce qui se passait dans ce processus quantique, mais cela changea à tel point la mentalité des physiciens qu'ils se mirent en quelque sorte dans l'esprit de la théorie quantique. De ce fait, et même un certain temps avant de disposer d'une formulation cohérente de la théorie quantique, le physicien savait plus ou moins quel serait le résultat d'une expérience donnée.

On discutait fréquemment de ce qu'on appelait « l'expérience idéale » : « idéale », en ce sens qu'elle permettrait de répondre à une question très cruciale sans qu'on sache si, oui ou non, on pourrait réellement faire cette expérience. Naturellement, il était important qu'il soit en principe possible de réaliser ladite expérience, mais la technique pouvait en être très compliquée. Ces expériences idéales pouvaient être très utiles pour clarifier certains problèmes ; s'il n'y avait pas accord entre les physiciens sur le résultat que donnerait une expérience idéale type, on pouvait fréquemment trouver une expérience analogue, mais plus simple, qu'on pourrait vraiment faire afin que la réponse expérimentale puisse contribuer de façon essentielle à la clarification de la théorie quantique.

Le plus étrange de ces années-là fut que les paradoxes de la théorie des quanta ne disparurent pas pendant ce processus de clarification ; au contraire, ils devinrent encore plus marqués et passionnants. Il y eut par exemple l'expérience de Compton sur la diffusion des rayons X : d'après des expériences antérieures sur les interférences en lumière diffusée, il ne pouvait subsister le moindre doute sur le fait que la diffusion se produit essentiellement de la manière suivante : l'onde de lumière incidente fait vibrer, avec sa fréquence incidente, un électron situé dans le faisceau lumineux ; l'électron oscillant émet alors une onde sphérique de même fréquence et produit donc de la lumière diffusée. Mais Compton découvrit en 1923 que la fréquence des rayons X diffusés était différente de la fréquence des rayons X incidents. Ce changement de fréquence pouvait en principe se comprendre en supposant que la diffusion doit être décrite

comme un choc d'un quantum lumineux et d'un électron ; l'énergie du quantum lumineux est changée par ce choc ; et, étant donné que le produit de la fréquence par la constante de Planck devrait être égal à l'énergie du quantum lumineux, la fréquence devrait également changer. Mais que se passe-t-il si on interprète ainsi l'onde lumineuse ? Les deux expériences – celle sur les interférences en lumière diffusée et celle sur la variation de fréquence de la lumière diffusée – semblaient se contredire sans la moindre possibilité de compromis.

Mais dès ce moment-là, de nombreux physiciens étaient convaincus que ces contradictions apparentes appartenaient à la structure intrinsèque de la physique atomique. C'est pourquoi, en 1924, L. de Broglie essaya d'étendre le dualisme entre description ondulatoire et description corpusculaire aux particules élémentaires de la matière et surtout aux électrons. Il montra qu'une certaine onde de matière pouvait « correspondre » à un électron en mouvement, exactement comme une onde lumineuse correspond à un quantum lumineux en mouvement. À cette époque, on ne discernait pas clairement ce que signifiait le mot « correspondre » dans ce contexte. Mais L. de Broglie suggéra que la condition quantique de la théorie de Bohr devait s'interpréter comme un postulat sur les ondes corpusculaires. Une onde tournant autour d'un atome peut, pour des raisons géométriques, n'être qu'une onde stationnaire ; et le périmètre de l'orbite doit forcément être un multiple entier de la longueur d'onde. De cette manière, l'idée de L. de Broglie reliait la quantité quantique – laquelle avait toujours été un élément étranger dans la mécanique de l'électron – avec le dualisme entre ondes et particules.

Dans la théorie de Bohr, le désaccord entre fréquence orbitale des électrons (telle qu'elle se calculait) et fréquence du rayonnement émis devait s'interpréter comme une limitation du concept d'orbite électronique, concept qui avait été quelque peu douteux dès l'origine. Mais pour les ondes à plus haute énergie, les électrons devaient se déplacer à une grande

distance du noyau exactement comme lorsqu'on observe leurs trajectoires dans une chambre de Wilson : on devait parler là d'ondes électroniques. Il fut donc très satisfaisant de constater que, pour les orbites les plus grandes, les fréquences de rayonnement émis approchaient de la fréquence d'orbite et de ses harmoniques les plus élevés. De même, Bohr avait déjà suggéré dans ses premiers articles que les intensités des raies spectrales émises tendaient vers les intensités des harmoniques correspondants. Ce principe de correspondance s'était montré très fécond pour le calcul approché des intensités des raies spectrales. On avait donc ainsi l'impression que la théorie de Bohr donnait une description qualitative, mais non quantitative, de ce qui se passe dans l'atome ; et qu'une caractéristique nouvelle du comportement de la matière était exprimée qualitativement par les conditions quantiques, lesquelles, à leur tour, étaient liées au dualisme entre ondes et particules.

L'énoncé mathématique précis de la théorie quantique progressa finalement par deux voies différentes. L'une partait du principe de correspondance de Bohr. Il fallait abandonner le concept d'orbite électronique, tout en le gardant pour les cas-limites des nombres quantiques élevés, c'est-à-dire pour les grandes orbites. Dans ce dernier cas, le rayonnement émis donne, par ses fréquences et ses intensités, une image de l'orbite électronique ; il représente ce que les mathématiciens appellent un développement en série de Fourier de l'orbite. L'idée se suggérait d'elle-même qu'on devait écrire les lois mécaniques, non en fonction des positions et des vitesses des électrons, mais en fonction des fréquences et des amplitudes de leur développement en série de Fourier. En partant des équations ainsi obtenues et en ne les modifiant que très peu, on pouvait espérer aboutir à des relations entre ces quantités donnant les fréquences et intensités du rayonnement, même pour les petites orbites et pour l'état fondamental de l'atome. Ce plan d'action put se réaliser en fait : il conduisit durant l'été 1925 à un formalisme mathématique appelé mécanique

matricielle ou, plus généralement, mécanique quantique. Les équations du mouvement en mécanique newtonienne furent remplacées par des équations analogues entre matrices. Ce fut une expérience étrange que de constater que nombre des anciens résultats de la mécanique newtonienne, comme la conservation de l'énergie, etc., pouvaient également se déduire de la nouvelle mécanique.

Plus tard, les recherches de Born, de Jordan et de Dirac montrèrent que les matrices représentant la position et la quantité de mouvement de l'électron ne commutaient pas. Ce dernier fait démontra clairement la différence essentielle entre la mécanique quantique et la mécanique classique.

L'autre voie se déduisit de l'idée d'ondes corpusculaires énoncée par L. de Broglie. Schrödinger essaya de mettre au point une équation ondulatoire pour les ondes stationnaires de L. de Broglie autour du noyau. Au début de 1926, il réussit à déduire pour l'atome d'hydrogène les valeurs énergétiques des états stationnaires en tant que valeurs propres de sa fonction d'onde et put donner une méthode plus générale pour transformer un ensemble donné d'équations classiques du mouvement en une équation ondulatoire correspondante dans un espace à plusieurs dimensions. Plus tard, il put démontrer que son formalisme de mécanique ondulatoire équivalait mathématiquement au formalisme antérieur de la mécanique classique.

On se trouvait donc finalement devant un formalisme mathématique cohérent qu'on pouvait définir de deux manières équivalentes en partant soit des relations entre matrices, soit des fonctions d'ondes. Ce formalisme donnait les valeurs énergétiques correctes pour l'atome d'hydrogène et il fallut moins d'un an pour montrer qu'il aboutissait aussi aux résultats corrects pour l'atome d'hélium et pour les problèmes plus complexes des atomes plus lourds. Mais comment le nouveau formalisme décrivait-il l'atome ? Les paradoxes du dualisme entre image ondulatoire et image

corpusculaire n'étaient pas résolus : on les avait en quelque sorte dissimulés dans l'édifice mathématique.

Un premier pas fort intéressant vers une réelle compréhension de la théorie quantique fut accompli par Bohr, Kramers et Slater en 1924. Ces auteurs tentèrent de résoudre la contradiction apparente entre l'image ondulatoire et l'image corpusculaire par le concept de l'onde de probabilité. Les ondes électromagnétiques furent interprétées, non comme des ondes « réelles », mais comme des ondes de probabilité dont l'intensité détermine en chaque point la probabilité d'absorption (ou d'émission induite) d'un quantum lumineux par un atome. Cette idée amena à conclure que des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement n'étaient pas nécessairement vraies pour un phénomène isolé, qu'elles n'étaient que des lois statistiques, valables uniquement pour la moyenne statistique. Cette conclusion n'était cependant pas correcte et les rapports entre l'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire des rayonnements étaient encore plus compliqués que cela.

Mais l'article de Bohr, Kramers et Slater mit en lumière un aspect essentiel de l'interprétation correcte de la théorie quantique. Ce concept d'onde de probabilité était quelque chose d'entièrement nouveau en physique théorique depuis Newton. La signification d'une probabilité en mathématique ou en mécanique statistique, c'est l'énoncé de notre degré de connaissance de la situation objective : en jetant des dés, nous ignorons les minuscules détails du mouvement de nos mains qui déterminent la manière dont tombe le dé et, par conséquent, nous disons que la probabilité pour faire apparaître un nombre donné est exactement d'un sixième. L'onde de probabilité de Bohr, Kramers et Slater, elle, signifiait davantage : elle signifiait une tendance à quelque chose. C'était une version quantitative de l'ancien concept de *potentia* de la philosophie d'Aristote. Elle introduisait quelque chose se situant au milieu entre l'idée d'un phénomène et ce

phénomène lui-même, une étrange sorte de réalité physique à égale distance entre la possibilité et la réalité.

Plus tard, une fois le cadre mathématique de la théorie quantique fixé, Born reprit cette idée de l'onde de probabilité et donna une définition claire de la quantité mathématique qu'il fallait interpréter comme l'onde de probabilité dans cette formulation. Ce n'était pas une onde à trois dimensions comme les ondes élastiques ou les ondes hertziennes, mais une onde dans un espace de configuration à grand nombre de dimensions, donc une quantité mathématique assez abstraite.

Même à cette époque – l'été 1926 –, on ne voyait pas clairement dans chaque cas comment on devait utiliser ce formalisme mathématique pour décrire une situation expérimentale donnée. On savait seulement comment décrire les états stationnaires de l'atome, mais on ne savait pas comment décrire un phénomène bien plus simple, comme le passage d'un électron à travers une chambre de Wilson.

Quand Schrödinger eut montré cet été-là que sa formulation de mécanique ondulatoire était mathématiquement équivalente à la mécanique quantique, il essaya pendant un certain temps d'abandonner complètement l'idée des quanta et des « sauts quantiques » et de remplacer tout simplement les électrons de l'atome par ses ondes corpusculaires à trois dimensions. Il fut poussé à cette tentative par le résultat qu'il avait obtenu, à savoir que, dans sa théorie, les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène semblaient n'être que les valeurs propres des ondes corpusculaires stationnaires. Par conséquent, il pensa que c'était une erreur de les appeler énergies, elles n'étaient que des fréquences. Mais dans les discussions qui eurent lieu pendant l'automne 1926 à Copenhague entre Bohr, Schrödinger et les physiciens du groupe de Copenhague, il apparut rapidement qu'une telle interprétation ne suffirait même pas à expliquer la formule de Planck pour le rayonnement thermique.

Durant les mois qui suivirent ces discussions, une étude poussée de toutes les questions concernant l'interprétation de Copenhague de la théorie quantique conduisit finalement à une clarification complète et – comme de nombreux physiciens le croient – satisfaisante. Mais ce n'était pas une solution qu'on puisse accepter facilement ; je me souviens de discussions avec Bohr se poursuivant pendant de nombreuses heures et menant très tard dans la nuit pour aboutir presque au désespoir ; et quand, à la fin de la discussion, je partais seul arpenter le parc avoisinant, je me répétais sans cesse la même question : la Nature peut-elle vraiment être aussi absurde qu'elle nous semble l'être dans ces expériences atomiques ?

On approcha de la solution finale par deux manières différentes. L'une consistait à tourner autour de la question : au lieu de demander comment on pouvait exprimer une situation expérimentale donnée dans le schéma connu, on posait une autre question : serait-il vrai que ne peuvent se produire dans la Nature que les seules situations expérimentales pouvant s'exprimer par le formalisme mathématique ? Supposer cela conduisait en fait à des limitations de l'utilisation des concepts mêmes qui avaient été la base de la physique classique depuis Newton. On pouvait parler de la position et de la vitesse d'un électron comme dans la mécanique newtonienne et on pouvait observer et mesurer ces quantités ; mais on ne pouvait fixer ces deux quantités simultanément avec une précision arbitrairement élevée. Il se révéla qu'en fait le produit de ces deux imprécisions ne pouvait être inférieur à la constante de Planck divisée par la masse de la particule. Et des relations similaires pouvaient être formulées pour d'autres cas expérimentaux. On leur donne en général le nom de relations d'incertitude ou de principe d'indétermination. On avait appris que les vieux concepts ne s'adaptaient à la Nature qu'avec une certaine imprécision.

L'autre voie d'approche fut le concept de complémentarité de Bohr. Schrödinger avait décrit l'atome comme un système consistant non pas en

un noyau et des électrons, mais en un noyau plus des ondes corpusculaires, et cette image des ondes corpusculaires contenait certainement aussi un élément de vérité. Bohr considéra les deux images – image corpusculaire et image ondulatoire – comme deux descriptions complémentaires de la même réalité. Chacune de ces deux descriptions ne peut être que partiellement vraie, il y a forcément des limitations à l'emploi du concept corpusculaire aussi bien qu'à celui du concept ondulatoire ; sinon, on ne pouvait éviter des contradictions. Si l'on tenait compte des limitations pouvant s'exprimer par les relations d'incertitude, ces contradictions disparaissaient.

C'est ainsi que, depuis le printemps 1927, on a disposé d'une interprétation cohérente de la théorie quantique, fréquemment appelée « interprétation de Copenhague ». Cette interprétation subit son test crucial durant l'automne 1927 à la conférence Solvay à Bruxelles. Les expériences qui avaient toujours conduit aux pires paradoxes furent discutées maintes et maintes fois dans tous leurs détails, en particulier par Einstein. On inventa de nouvelles expériences idéales pour déceler toute incohérence possible de la théorie ; mais celle-ci se montra cohérente et semblait s'adapter aux expériences, pour autant qu'on pouvait voir.

Les détails de cette interprétation de Copenhague seront le sujet du chapitre suivant. Il faudrait souligner ici qu'il a fallu plus d'un quart de siècle pour passer de la première idée de quanta d'énergie à une vraie compréhension des lois quantiques théoriques. Cela indique qu'un changement considérable dans les concepts fondamentaux de réalité était indispensable avant qu'on puisse comprendre la situation nouvelle.

3.

L'interprétation de Copenhague

L'interprétation de Copenhague de la théorie quantique prend naissance dans un paradoxe. Toute expérience de physique, qu'il s'agisse de phénomènes de la vie quotidienne ou de phénomènes atomiques, se décrit forcément en termes de physique classique. Les concepts de physique classique forment le langage grâce auquel nous décrivons les conditions dans lesquelles se déroulent nos expériences et communiquons leurs résultats. Il nous est impossible de remplacer ces concepts par d'autres et nous ne devrions pas le tenter. Or l'application de ces concepts est limitée par les relations d'incertitude et, quand nous utilisons ces concepts classiques, nous ne devons jamais perdre de vue leur portée limitée, sans pour cela pouvoir ou devoir essayer de les améliorer.

Pour mieux comprendre ce paradoxe, il est bon de comparer les processus employés pour l'interprétation théorique d'une expérience en physique classique ou en mécanique quantique. Prenons un exemple : en mécanique newtonienne, on peut commencer par mesurer la position et la vitesse d'une planète dont nous allons étudier le mouvement et tirer de cette observation les valeurs à un instant donné des coordonnées et de la quantité de mouvement de cette planète, résultats qu'on fournit à l'appareil mathématique ; puis, utilisant les équations du mouvement, on en tire les

valeurs des coordonnées, et des quantités de mouvement ou de toutes les autres propriétés du système à un moment ultérieur. C'est ainsi que l'astronome peut prévoir les propriétés successives du système et, par exemple, le moment exact d'une éclipse de lune.

En théorie quantique, le processus est légèrement différent. Supposons que nous nous intéressions au mouvement d'un électron dans une chambre de Wilson et qu'on puisse, par une observation d'un genre quelconque, déterminer la position et la vitesse initiale de cet électron. Or cette détermination ne sera pas précise ; elle comportera au minimum les imprécisions provenant des relations d'incertitude et comportera probablement des erreurs plus fortes, vu les difficultés de l'expérience. La première de ces imprécisions nous permet de traduire le résultat de notre observation dans le schéma mathématique de la théorie quantique. On écrit une fonction de probabilité qui représente la situation expérimentale au moment de la mesure et qui comprend même les erreurs de mesure possibles.

Cette fonction de probabilité représente un mélange : elle est en partie un fait et en partie notre connaissance d'un fait, elle représente un fait dans la mesure où elle assigne à l'instant initial 100 % de probabilité (c'est-à-dire la certitude complète) pour la situation initiale, à savoir l'électron passant par la position observée avec la vitesse observée – « observée » signifiant observée dans les limites de la précision de l'expérience. La fonction de probabilité représente notre connaissance du fait, dans la mesure où un autre observateur pourrait connaître la position de l'électron avec davantage de précision. L'erreur expérimentale ne représente pas – du moins jusqu'à un certain point – une propriété de l'électron, mais le fait que nous avons une connaissance incomplète de cet électron, déficience qui est également exprimée dans la fonction de probabilité.

En physique classique, pour une mesure soignée, il faut également considérer l'erreur d'observation, ce qui donnerait une distribution de

probabilité pour les valeurs initiales des coordonnées et des vitesses, donc quelque chose de très analogue à la fonction de probabilité de la mécanique quantique. Seule l'incertitude indispensable aux relations d'incertitude n'existe pas en physique classique.

En mécanique quantique, une fois déterminée la fonction de probabilité à l'instant initial (grâce à l'observation), on peut calculer par les lois de la théorie quantique la fonction de probabilité à un instant ultérieur quelconque, donc déterminer la probabilité qu'une mesure donne une valeur spécifiée de la quantité mesurée ; nous pouvons par exemple prévoir la probabilité de trouver l'électron à un moment ultérieur fixé en un point donné de la chambre de Wilson. Mais il faut souligner que la fonction de probabilité ne représente pas en elle-même le déroulement du phénomène dans le temps : elle représente une tendance des phénomènes et de notre connaissance de ces phénomènes. La fonction de probabilité ne peut être reliée à la réalité que si une condition essentielle est remplie, à savoir si une nouvelle mesure est faite pour déterminer une certaine propriété du système. Ce n'est qu'alors que la fonction de probabilité nous permet de calculer le résultat probable de la nouvelle mesure, résultat qui sera de nouveau exprimé en termes de physique classique.

Par conséquent, l'interprétation théorique de l'expérience présente trois stades distincts : 1. traduire la situation expérimentale initiale en une fonction de probabilité ; 2. suivre l'évolution de cette fonction avec le temps ; 3. énoncer quelle est la nouvelle mesure du système qu'on va faire et dont on peut alors calculer le résultat à partir de la fonction de probabilité. Pour le premier stade, la condition nécessaire est de satisfaire aux relations d'incertitude. Le deuxième stade ne peut se décrire à l'aide des concepts classiques ; il n'existe aucune description de ce que devient le système dans l'intervalle entre l'observation initiale et la mesure suivante. Ce n'est que dans le troisième stade que nous passons de nouveau du « possible » au « réel ».

Illustrons ces trois stades par une expérience idéale simple. On a dit que l'atome consistait en un noyau et des électrons tournant autour de ce noyau ; on a également déclaré que le concept d'orbite électronique était douteux. On pourrait prétendre qu'il devrait être possible (du moins en principe) d'observer l'électron sur son orbite : il suffirait d'observer l'atome avec un microscope à très fort pouvoir de résolution et l'on verrait l'électron se déplacer sur son orbite. Or un microscope utilisant la lumière ordinaire ne nous donnerait certainement pas un pouvoir de résolution suffisamment élevé, car l'imprécision sur la mesure de la position ne peut jamais être inférieure à la longueur d'onde de la lumière employée. Mais un microscope à rayons γ , avec une longueur d'onde inférieure à la dimension de l'atome, conviendrait. On n'a pas encore construit de microscope de ce genre, mais cela ne doit pas nous empêcher de discuter de cette expérience idéale.

Le premier stade (traduction du résultat de l'observation en fonction de probabilité) est-il possible ? Il ne l'est que si la relation d'incertitude est satisfaite après l'observation. La position de l'électron sera connue avec une précision donnée par la longueur d'onde des rayons γ utilisés. L'électron a pu être pratiquement au repos avant l'observation ; mais au cours de cette observation il a fallu qu'il passe au moins un quantum lumineux de rayons γ dans le microscope et ce quantum a forcément été dévié par l'électron ; par conséquent, l'électron a été poussé par le quantum lumineux, il a changé de quantité de mouvement et de vitesse et on peut montrer que l'incertitude sur ce changement est juste assez grande pour garantir la validité des relations d'incertitude. Donc, le premier stade ne présente pas de difficultés.

En même temps, on peut facilement voir qu'il n'existe aucun moyen d'observer l'orbite de l'électron autour du noyau. Le second stade nous montre un paquet d'ondes se déplaçant non autour du noyau, mais en s'écartant de l'atome, car le premier quantum lumineux aura arraché l'électron de l'atome. La quantité de mouvement du quantum lumineux est

beaucoup plus grande que la quantité de mouvement initiale de l'électron, bien que la longueur d'onde des rayons γ soit très inférieure à la dimension de l'atome. Par conséquent, le quantum lumineux suffit pour arracher l'électron de l'atome et l'on ne pourra jamais observer plus d'un point de l'orbite de l'électron ; donc, au sens ordinaire du terme, il n'y a pas d'orbite.

L'observation suivante – le troisième stade – montrera l'électron sur sa trajectoire s'écartant de l'atome. D'une façon tout à fait générale, il n'existe aucun moyen pour décrire ce qui se passe entre deux observations consécutives. Il est naturellement tentant de dire que l'électron a bien dû être quelque part entre ces deux observations et que, par conséquent, il a dû décrire une trajectoire ou une orbite quelconque, même s'il est peut-être impossible de la connaître. Cela serait un argument raisonnable en physique classique ; mais en théorie quantique, ce serait un abus de langage qui, nous le verrons plus tard, ne saurait se justifier. Nous ne discuterons pas pour le moment de savoir si cette mise en garde représente un énoncé de la manière dont nous devrions parler des phénomènes atomiques ou un énoncé des phénomènes eux-mêmes, s'il s'agit d'épistémologie ou d'ontologie. De toute manière, il nous faut être très prudents quant à la phraséologie d'une déclaration quelconque concernant le comportement des particules atomiques.

En fait, nous n'avons aucunement besoin de parler de particules. Pour de nombreuses expériences, il est plus commode de parler d'ondes corpusculaires, par exemple d'ondes corpusculaires stationnaires autour du noyau atomique. Une telle description serait en contradiction directe avec l'autre description si l'on négligeait les limitations apportées par les relations d'incertitude, grâce auxquelles on évite la contradiction. L'emploi de l'expression « ondes corpusculaires » est commode, par exemple quand on s'occupe du rayonnement émis par l'atome ; par ses fréquences et ses intensités, ce rayonnement donne des renseignements sur la distribution de

charge oscillante dans l'atome et, sur ce point, l'image ondulatoire est bien plus proche de la vérité que l'image corpusculaire. C'est pourquoi Bohr a préconisé l'utilisation des deux images qu'il a appelées « complémentaires ». Ces dernières s'excluent naturellement l'une l'autre, car une chose donnée ne peut être en même temps une particule (c'est-à-dire une substance enfermée sous un très petit volume) et une onde (c'est-à-dire un champ qui s'étend sur un grand espace), mais les deux sont complémentaires. En jouant des deux images, en passant de l'une à l'autre et en revenant à la première, nous obtenons finalement l'impression juste sur l'étrange sorte de réalité qui se cache derrière nos expériences atomiques. Bohr utilise le concept de « complémentarité » en plusieurs endroits pour interpréter la théorie quantique : la connaissance de la position d'une particule est complémentaire de la connaissance de sa vitesse ou de sa quantité de mouvement ; si nous connaissons l'une avec une haute précision, nous ne pouvons connaître l'autre avec la même précision élevée, et cependant nous devons connaître les deux pour déterminer le comportement du système. La description dans l'espace-temps des phénomènes atomiques est complémentaire de leur description déterministe. La fonction de probabilité obéit à une équation du mouvement comme le faisaient les coordonnées en mécanique newtonienne ; son changement avec le temps est complètement déterminé par l'équation de mécanique quantique, mais ne nous permet pas une description dans l'espace et le temps. L'observation, d'autre part, impose la description dans l'espace et le temps, mais rompt la continuité déterminée de la fonction de probabilité, en changeant notre connaissance du système.

En général, le dualisme entre les deux descriptions différentes de la même réalité n'est plus une difficulté, car nous savons que la formulation mathématique de la théorie nie cette contradiction. Le dualisme entre ces deux images complémentaires – ondes et particules – apparaît clairement aussi dans la souplesse de l'ensemble mathématique. Le formalisme s'écrit

normalement de manière à ressembler à la mécanique newtonienne, avec des équations de mouvement dont les variables sont les coordonnées et les quantités de mouvement des particules ; mais, par une transformation simple, on peut le récrire de manière qu'il ressemble à une équation ondulatoire pour une onde corpusculaire ordinaire à trois dimensions. Donc, cette possibilité de jouer avec des images complémentaires différentes a son analogue dans les différentes transformations de l'ensemble mathématique ; elle ne conduit à aucune difficulté dans l'interprétation de Copenhague de la théorie quantique.

Mais une réelle difficulté intervient dans la compréhension de cette interprétation quand on pose la célèbre question : que se passe-t-il « réellement » au cours d'un phénomène atomique ? Nous avons déjà dit que le mécanisme et le résultat d'une observation peuvent toujours s'exprimer à l'aide des concepts classiques. Mais ce qu'on déduit d'une observation, c'est une fonction de probabilité, une expression mathématique qui combine des énoncés sur les possibilités ou tendances avec des énoncés sur notre connaissance des faits. De sorte que nous ne pouvons rendre complètement objectif le résultat d'une observation, nous ne pouvons décrire ce qui « se passe » entre cette observation et la suivante. Nous semblons donc avoir introduit un élément subjectif dans la théorie, comme si nous voulions dire : ce qui se passe dépend de notre manière de l'observer ou du fait que nous l'observons. Avant de discuter de ce problème de subjectivité, il est nécessaire d'expliquer très clairement pourquoi l'on rencontrerait des difficultés désespérantes si l'on essayait de décrire ce qui se passe entre deux observations consécutives.

Pour cela, il est commode de discuter de l'expérience idéale suivante : supposons qu'un écran noir avec deux petits trous soit éclairé par une petite source de lumière monochromatique ; le diamètre des trous peut ne pas être très supérieur à la longueur d'onde de la lumière, mais leur écartement sera beaucoup plus grand. À une certaine distance derrière l'écran, une plaque

photographique enregistrera la lumière qui lui parvient. Si l'on décrit l'expérience en termes ondulatoires, on dit que l'onde incidente pénètre par les deux trous, qu'il se produit des ondes secondaires sphériques partant des trous, qu'elles interfèrent entre elles et que ces interférences produisent un réseau d'intensité variable sur la plaque photographique (franges d'interférences).

Or le noircissement de la plaque photographique est un processus quantique, une réaction chimique produite par des quanta lumineux individuels ; par conséquent, il devrait être possible de décrire l'expérience à l'aide de quanta lumineux. Si l'on avait le droit de dire ce qui arrive à un quantum lumineux individuel entre son émission par la source et son absorption par la plaque, on pourrait tenir le raisonnement suivant : ce quantum lumineux passe soit par le premier trou, soit par le second. S'il passe par le premier et qu'il y est diffracté, sa probabilité d'être absorbé en un point donné de la plaque photographique ne peut dépendre du fait que le second trou est ouvert ou fermé ; la distribution de probabilité sur la plaque sera la même que si seul le premier trou était ouvert. Si l'on répète de nombreuses fois l'expérience et qu'on rassemble tous les cas où le quantum lumineux a passé par le premier trou, le noircissement de la plaque dû à ces cas correspondra à la distribution de probabilité. Si l'on ne considère que les quanta lumineux passant par le second trou, le noircissement devrait correspondre à une distribution de probabilité venant de l'hypothèse que seul le second trou est ouvert. Par conséquent, le noircissement total ne devrait être que la somme des noircissements pour les deux cas ; en d'autres termes, il ne devrait pas y avoir de franges d'interférences. Mais nous savons que cela est faux et que l'expérience donne des franges d'interférences. De ce fait, déclarer que tout quantum lumineux doit forcément passer soit par le premier, soit par le second trou, est problématique et mène à des contradictions. Cet exemple montre très clairement que le concept de la fonction de probabilité ne permet pas de

décrire ce qui se passe entre deux observations. Toute tentative pour trouver une telle description mènerait à des contradictions, ce qui signifie forcément que le terme « se passe » est restreint à l'observation.

Or ce résultat est fort étrange, car il semble indiquer que l'observation joue un rôle décisif dans un phénomène et que la réalité varie selon que nous l'observons ou non. Pour voir les choses plus clairement, il nous faut analyser de façon plus serrée le processus d'observation.

Pour commencer, il est important de ne pas oublier qu'en sciences expérimentales nous ne nous intéressons pas à l'univers envisagé comme un tout – y compris nous-mêmes – mais que nous dirigeons notre attention sur une certaine partie de cet univers et en faisons l'objet de notre étude. En physique atomique, cette partie est en général un très petit objet, une particule atomique ou un groupe de ces particules, mais est parfois beaucoup plus vaste ; la dimension en importe peu. Ce qui importe, c'est qu'une grande partie de l'univers – y compris nous-mêmes – n'appartient *pas* à cet objet.

Or l'interprétation théorique d'une expérience commence par les deux stades que nous avons discutés. Dans le premier stade, il nous faut décrire les conditions de l'expérience finalement combinées avec une première observation, et cela en termes de physique classique ; puis traduire cette description en fonction de probabilité. Celle-ci suit les lois de la mécanique quantique et son évolution avec le temps – qui est continue – peut se calculer à partir des conditions initiales : c'est là le second stade. La fonction de probabilité combine des éléments objectifs et des éléments subjectifs : elle contient des énoncés sur les possibilités ou sur les tendances les plus probables (*potentia*, dans la philosophie d'Aristote), et ces énoncés sont complètement objectifs et ne dépendent aucunement de l'observateur ; et elle contient des énoncés concernant ce que nous connaissons du système, lesquels sont naturellement subjectifs dans la mesure où ils peuvent différer d'un observateur à un autre. Dans les cas idéaux, l'élément

subjectif de la fonction de probabilité peut être pratiquement négligeable comparé à l'élément objectif ; le physicien déclare alors qu'il s'agit d'un « cas pur ».

Quand nous passons à l'observation suivante (dont le résultat devrait se prévoir d'après la théorie), il est très important de se rendre compte que notre objet a forcément été en contact avec les autres parties du monde, à savoir les conditions expérimentales, l'appareil de mesure, etc., avant l'observation et, au minimum, pendant l'observation. Cela signifie que l'équation du mouvement pour la fonction de probabilité contient maintenant l'influence de l'interaction avec le dispositif de mesure. Cette influence introduit un nouvel élément d'incertitude, puisque le dispositif de mesure est forcément décrit en termes de physique classique et qu'une telle description comporte toutes les incertitudes concernant la structure microscopique du dispositif que nous connaissons par la thermodynamique ; et puisque le dispositif est en relation avec le reste du monde, il contient en fait les incertitudes sur la structure microscopique du monde entier. On peut dire que ces incertitudes sont objectives dans la mesure où elles ne sont qu'une conséquence de la description à l'aide de la physique classique et ne dépendent aucunement de l'observateur ; et on peut dire qu'elles sont subjectives dans la mesure où elles se réfèrent à notre connaissance incomplète de ce monde.

Une fois que cette interaction a eu lieu, la fonction de probabilité contient l'élément objectif de tendance et l'élément subjectif de connaissance incomplète, même s'il s'était agi avant d'un « cas pur ». C'est pour cette raison qu'on ne peut en général prévoir avec certitude le résultat de l'observation ; ce qu'on peut annoncer, c'est la probabilité d'un certain résultat de l'observation, laquelle peut se vérifier en répétant un grand nombre de fois l'expérience. La fonction de probabilité, à la différence du processus ordinaire en mécanique newtonienne, ne décrit pas un certain

phénomène, mais tout un ensemble de phénomènes possibles – du moins durant le processus d'observation.

L'observation elle-même change de façon discontinue la fonction de probabilité ; elle choisit entre tous les phénomènes possibles celui qui a eu lieu en fait. Étant donné que, par l'observation, notre connaissance du système a changé de façon discontinue, sa représentation mathématique a également subi un changement discontinu, et nous parlons de saut « quantique ». Quand on utilise le vieil adage « *Natura non facit saltus* » (« la Nature ne fait pas de sauts ») comme point de départ pour critiquer la théorie quantique, nous pouvons répliquer que notre connaissance peut certes changer de façon soudaine et que ce fait justifie le terme « saut quantique ».

Par conséquent, la transition du « possible » au « réel » a lieu pendant l'acte d'observer. Si nous voulons décrire ce qui se passe au cours d'un phénomène atomique, il faut que nous nous rendions compte que le terme « se passe » ne s'applique qu'à l'observation et non à l'état de choses entre deux observations ; il s'applique à l'acte physique d'observer et non à l'acte psychologique et nous pouvons dire que la transition du « possible » au « réel » se produit dès que l'interaction de l'objet avec la jauge de mesure (donc avec le reste du monde) est entrée en jeu ; le terme « se passe » n'a aucun lien avec l'acte d'enregistrement du résultat par le cerveau de l'observateur. Mais le changement discontinu de la fonction de probabilité se produit en même temps que l'acte d'enregistrer, car c'est le changement discontinu de notre connaissance au moment de l'enregistrement qui a son reflet dans le changement discontinu de la fonction de probabilité.

Jusqu'à quel point sommes-nous donc finalement parvenus à une description objective du monde, et en particulier du monde atomique ? En physique classique, la science partait de la croyance – ou devrait-on dire de l'illusion ? – que nous pouvions décrire le monde (tout au moins en partie) sans nous faire en rien intervenir nous-mêmes. C'est effectivement possible

dans une large mesure : nous savons que la ville de Londres existe, que nous puissions la voir ou non. On peut dire que la physique classique est justement cette idéalisation nous permettant de parler de fractions du monde sans que notre personne entre en jeu. Les succès remportés par cette thèse ont conduit à l'idée générale d'une description objective du monde ; l'objectivité était devenue le premier critère de la valeur d'un résultat scientifique. Mais l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique correspond-elle encore à cet idéal ? Dans la mesure du possible, pourrions-nous dire. La théorie quantique ne comporte certes pas de caractéristiques vraiment subjectives, car elle n'introduit pas l'esprit du physicien comme faisant partie d'un phénomène atomique ; mais elle part de la division du monde entre « objet » et reste du monde, ainsi que du fait que nous utilisons pour notre description les concepts classiques, du moins en ce qui touche le reste du monde. Cette division est arbitraire et découle historiquement et directement de notre méthode scientifique ; l'emploi des concepts classiques est en définitive une conséquence de la manière générale de penser de l'humanité. Or c'est déjà là une référence à nous-mêmes et, en cela, notre description n'est pas complètement objective.

Nous avons dit au début que l'interprétation de Copenhague partait d'un paradoxe, à savoir que nous décrivons nos expériences en termes de physique classique, tout en sachant en même temps que ces concepts ne s'adaptent pas parfaitement à la Nature. Le désaccord entre ces deux points de départ est à la racine du caractère statistique de la mécanique quantique. C'est pourquoi l'on a parfois suggéré qu'il faudrait s'écarter totalement des concepts classiques et qu'un changement révolutionnaire des concepts utilisés pour décrire les expériences pourrait peut-être nous ramener à une description non statistique et complètement objective de la Nature.

Mais cette hypothèse repose sur une erreur d'interprétation. Les concepts de physique classique ne sont qu'un raffinement des concepts de la vie journalière et sont une partie essentielle du langage qui forme la base

de toutes les sciences de la Nature. Notre situation en science est telle que nous utilisons *en fait* les concepts classiques pour décrire les expériences ; et le problème posé à la mécanique quantique était de découvrir sur cette base une interprétation théorique des expériences. Il est inutile de discuter de ce qui pourrait se faire si nous étions d'autres êtres ; nous en sommes arrivés à comprendre que, comme l'a dit Weizsäcker, « la Nature a précédé l'homme, mais l'homme a précédé les sciences de la Nature ». La première partie de la phrase justifie la physique classique avec son idéal de complète objectivité ; la seconde partie nous dit pourquoi nous ne pouvons échapper au paradoxe de la théorie quantique, à savoir la nécessité d'utiliser les concepts classiques.

Il nous faut ajouter quelques commentaires sur le processus utilisé pour l'interprétation quantique des phénomènes atomiques. Nous avons dit que nous partions toujours d'une division du monde en objet (celui que nous allons étudier) et reste du monde ; et que cette division était jusqu'à un certain point arbitraire. Effectivement, si nous ajoutions à cet objet de l'expérience une partie ou l'ensemble du dispositif de mesure, par exemple, et que nous appliquions les lois quantiques à cet objet plus complexe, cela ne devrait aucunement changer le résultat final. On peut montrer qu'une telle modification du raisonnement théorique ne changerait pas les prévisions concernant une expérience donnée : cela s'ensuit mathématiquement du fait que les lois quantiques sont presque identiques aux lois classiques pour les phénomènes dans lesquels la constante de Planck peut être considérée comme très petite. Mais ce serait une erreur de croire que cette application des lois quantiques au dispositif de mesure pourrait nous aider à éviter le paradoxe fondamental de la théorie quantique.

Le dispositif de mesure ne mérite ce nom que s'il est en contact étroit avec le reste du monde, s'il y a interaction entre lui et l'observateur. De ce fait, l'incertitude sur le comportement microscopique du monde apparaîtra

dans le système quantique pour ce cas aussi bien que pour la première interprétation. Si le dispositif de mesure était isolé du reste du monde, il ne serait pas un dispositif de mesure et l'on serait dans l'incapacité totale de le décrire à l'aide de la physique classique.

À ce sujet, Bohr a souligné qu'il est plus réaliste de dire que la division entre l'objet et le reste du monde n'est pas arbitraire. En fait, quand nous faisons de la recherche atomique, nous nous trouvons en général devant la situation suivante : nous désirons comprendre un certain phénomène et nous désirons savoir comment ce phénomène se déduit des lois générales de la Nature. Par conséquent, la portion de matière ou de rayonnement qui participe au phénomène est « l'objet » naturel auquel appliquer le mécanisme quantique et devrait en ce sens être séparé des instruments utilisés pour étudier le phénomène. Cela souligne à nouveau un élément subjectif de la description des phénomènes atomiques, puisque le dispositif de mesure a été construit par l'observateur ; et il faut nous rappeler que ce que nous observons, ce n'est pas la Nature en soi, mais la Nature exposée à notre méthode d'investigation. En physique, notre travail consiste à poser des questions concernant la Nature dans le langage que nous possédons et à essayer de tirer d'une expérience une réponse grâce aux moyens dont nous disposons. C'est ainsi que la théorie quantique nous ramène, comme l'a dit Bohr, à la vieille sagesse qui veut que, quand on cherche à introduire l'harmonie dans la vie, il ne faille jamais oublier que, dans la tragédie de l'existence, nous sommes à la fois acteurs et spectateurs. Il est compréhensible que dans nos relations scientifiques avec la Nature notre propre action prenne une grande importance chaque fois qu'il s'agit de ces domaines de la Nature dans lesquels nous ne pouvons pénétrer que grâce à l'emploi des instruments les plus perfectionnés.

4.

La théorie quantique et les racines de la science atomique

Le concept d'atome a pris naissance bien avant que la science moderne débute au XVII^e siècle ; il a son origine dans l'ancienne philosophie grecque. À cette époque reculée, il représentait le concept central du matérialisme enseigné par Leucippe et Démocrite. D'autre part, l'interprétation actuelle des faits atomiques a fort peu de ressemblance avec une philosophie matérialiste proprement dite ; en fait, on peut dire que la physique atomique a détourné la science de la tendance matérialiste qu'elle avait adoptée durant le XIX^e siècle. Il est donc intéressant de comparer l'évolution vers le concept d'atome de la philosophie et l'aspect actuel de ce concept en physique.

L'idée des « briques » de matière d'une petitesse ultime, insécables, est apparue pour la première fois en liaison avec l'élaboration des concepts de Matière, d'Être et de Devenir qui ont caractérisé la première époque de la philosophie grecque. Cette période a commencé au VI^e siècle avant Jésus-Christ avec Thalès, fondateur de l'École de Milet, à qui Aristote attribue le postulat suivant : « L'eau est la cause matérielle de toutes choses. » Cette déclaration, si étrange qu'elle nous paraisse, exprime, comme l'a fait

remarquer Nietzsche, trois idées qui sont fondamentales en philosophie : *primo*, la question de la cause matérielle de toutes choses est posée ; *secundo*, on exige qu'elle soit résolue conformément à la raison, sans recours aux mythes ou au mysticisme ; *tertio*, on postule qu'il doit être finalement possible de réduire toutes choses à un principe unique. Cette affirmation de Thalès a été la première expression de l'idée d'une substance fondamentale dont toutes les autres choses ne seraient que des formes passagères. À cette époque, le mot « substance » ainsi utilisé n'était certes pas interprété dans le sens purement matérialiste que nous lui donnons fréquemment à l'heure actuelle ; la vie était liée à cette substance ou lui était inhérente et Aristote attribue aussi à Thalès l'axiome suivant : toutes les choses sont pleines de dieux. Mais il reste que la question de la cause matérielle de toutes choses était posée et on imagine sans difficulté que Thalès a dû adopter ce point de vue principalement pour des raisons météorologiques ; parmi toutes les choses que nous connaissons, l'eau est celle qui peut prendre les formes les plus variées : en hiver, elle peut être glace ou neige, elle peut se transformer en vapeur et elle peut former des nuages ; elle semble devenir de la terre là où les rivières forment des deltas, et elle peut jaillir de la terre ; l'eau est la condition de la vie. Par conséquent, si une telle substance fondamentale existait, il était naturel de penser tout d'abord à l'eau.

L'idée de substance fondamentale fut ensuite poussée plus loin par Anaximandre, élève de Thalès, qui vivait dans la même ville. Anaximandre nia que la substance fondamentale fût l'eau ou aucune substance connue ; il enseigna que la substance primordiale était infinie, éternelle, sans âge, et qu'elle embrassait le monde. Cette substance primordiale se transforme en les diverses substances qui nous sont familières. D'après Théophraste, Anaximandre aurait dit : « Là d'où naissent les choses, elles retournent comme il est juste, car elles s'octroient réparation et satisfaction l'une à l'autre pour leur injustice, suivant l'ordre du temps. » Dans cette

philosophie, c'est l'antithèse de l'Étant et du Devenir qui joue le rôle fondamental ; la substance primordiale, infinie et sans âge, l'Étant non différencié, dégénère sous des formes variées qui mènent à des luttes sans fin. Le processus du Devenir est considéré comme une dégradation de l'Étant infini, une désintégration dans la lutte, sanctionnée en fin de compte par le retour à ce qui n'a ni forme ni caractère. La lutte ainsi évoquée, c'est l'opposition entre le chaud et le froid, le feu et l'eau, l'humide et le sec, etc. La victoire passagère de l'un sur l'autre est l'injustice qu'ils expient finalement au cours du temps. D'après Anaximandre, il y a « mouvement éternel », création et disparition de mondes, passant de l'infinitude à l'infinitude.

Il peut être intéressant de noter là que ce problème – indépendamment de savoir si la substance primordiale est une des substances connues ou doit être quelque chose d'essentiellement différent – se présente sous une forme quelque peu différente dans l'aspect le plus moderne de la physique atomique. Les physiciens essaient aujourd'hui de trouver une loi fondamentale du mouvement de la matière dont on puisse tirer mathématiquement toutes les particules élémentaires et leurs propriétés. Cette équation du mouvement peut concerner soit des ondes d'un type connu, ondes protoniques ou mésoniques, soit des ondes d'un caractère essentiellement différent n'ayant rien à voir avec aucune des ondes ou particules élémentaires connues. Dans le premier cas, cela signifierait que toutes les particules élémentaires peuvent se réduire d'une manière quelconque à un certain nombre d'espèces de particules élémentaires « fondamentales » ; en fait, c'est cette voie de recherche que la physique théorique a en grande partie suivie durant les deux dernières décennies. Dans le second cas, toutes les particules élémentaires pourraient se réduire à une substance universelle que nous pouvons appeler énergie ou matière ; mais aucune de ces diverses particules ne pourrait être préférée aux autres comme étant plus fondamentale. Ce dernier point de vue correspond

naturellement à la doctrine d'Anaximandre, et je suis convaincu qu'en physique moderne c'est ce point de vue qui est le bon. Mais revenons à la philosophie grecque.

Le troisième des philosophes de Milet, Anaximène, aux côtés d'Anaximandre, enseignait que l'air est la substance première : « Tout comme notre âme, étant de l'air, assure notre cohésion, la respiration et l'air embrassent le monde entier. » Anaximène introduisait dans la philosophie milésienne l'idée que le processus de condensation ou de raréfaction est la cause de la transformation de la substance primordiale en autres substances. La condensation de vapeur d'eau en nuages était un exemple évident et l'on ignorait naturellement à cette époque la différence entre vapeur d'eau et air.

Dans la philosophie d'Héraclite d'Éphèse, le concept du Devenir occupe la première place. Il considérait ce qui évolue, le feu, comme l'élément primordial. La difficulté, à savoir concilier l'idée d'un seul principe fondamental avec la variété infinie des phénomènes, il la résout en reconnaissant que la lutte des contraires est en réalité un genre d'harmonie. Pour Héraclite, le monde est à la fois un et multiple ; c'est tout simplement « l'électricité contraire » des contraires qui constitue l'unité de ce monde unique. Il déclare : « Nous devons savoir que la guerre est commune à toutes choses, que la lutte est la justice et que toutes choses naissent et disparaissent par la lutte. »

Jetant un coup d'œil en arrière sur le développement de la philosophie grecque jusqu'à ce stade, on comprend que c'est la tension entre l'Un et le Multiple qui a été son guide. Vis-à-vis de nos sens, le monde consiste en une variété infinie de choses et de phénomènes, de couleurs et de sons. Mais pour le comprendre, il nous faut introduire une sorte quelconque d'ordre, et l'ordre signifie qu'on reconnaît ce qui est égal, il signifie une certaine sorte d'unité. De là sort la croyance qu'il existe un principe fondamental, mais en même temps la difficulté d'en tirer l'infinie variété des choses. Qu'il y ait une cause matérielle à toutes choses était un point de

départ naturel, puisque le monde est fait de matière. Mais quand on poursuit l'idée de l'unité fondamentale jusqu'au bout, on en arrive à cet « Étant » indifférencié, infini et éternel qui, matériel ou non, ne pouvait par lui-même expliquer la variété infinie des choses. Cela conduit à l'antithèse de l'Être et du Devenir et, finalement, à la solution d'Héraclite, à savoir que c'est le changement lui-même qui est le principe fondamental, ce « changement impérissable », comme ont dit les poètes. Mais le changement en lui-même n'est pas une cause matérielle et, par conséquent, il est représenté dans la philosophie d'Héraclite par le feu, élément fondamental qui est à la fois matière et force motrice.

Nous pouvons ici remarquer que la physique moderne est à un certain point de vue très proche des doctrines d'Héraclite : si nous remplaçons le mot « feu » par le mot « énergie », nous pouvons presque répéter ses paroles mot pour mot, du point de vue actuel. En fait, l'énergie est la substance dont sont faites toutes les particules élémentaires, tous les atomes et, par conséquent, toutes choses, et l'énergie est ce qui fait mouvoir. L'énergie est une substance puisque sa quantité totale ne change pas et les particules élémentaires peuvent effectivement être produites à partir de cette substance, comme le montrent de nombreuses expériences sur la création de particules élémentaires. L'énergie peut se changer en mouvement, en chaleur, en lumière et en électricité. L'énergie peut être appelée la cause fondamentale de tous les changements dans le monde. Mais cette comparaison de la philosophie grecque avec les idées de la science actuelle sera discutée plus loin.

La philosophie grecque retourna pendant un certain temps aux concepts de l'Un, avec les enseignements de Parménide, lequel vivait à Élée dans le sud de l'Italie. Sa contribution la plus importante à la pensée grecque a peut-être été d'introduire un raisonnement parfaitement logique en métaphysique : « On ne peut connaître ce qui n'est pas, ni l'énoncer ; car ce qui peut être pensé et ce qui peut exister sont une même chose. » Donc, seul

l'Un existe et il n'y a ni devenir ni disparition. Pour des raisons logiques, Parménide niait l'existence du vide ; il supposait que tout changement demande un espace vide et il rejetait donc le changement comme étant une illusion.

Mais la philosophie ne pouvait pas reposer longtemps sur ce paradoxe. Empédocle, au sud de la Sicile, passe le premier du monisme au pluralisme. Pour éviter la difficulté, à savoir qu'une seule substance primordiale ne peut expliquer la variété des choses et des phénomènes, il suppose l'existence de quatre éléments fondamentaux, la terre, l'eau, l'air et le feu. Ces éléments s'unissent et se séparent sous l'action de l'Amour et de la Haine. Par conséquent, ces derniers qui, à de nombreux points de vue, sont traités comme étant aussi matériels que les quatre autres, sont responsables du changement impérissable. Empédocle décrit la formation du monde par l'image suivante : d'abord, il y a eu la sphère infinie de l'Un, comme dans la philosophie de Parménide ; mais dans la substance primordiale, les quatre « racines » sont toutes réunies par l'Amour ; puis, l'Amour disparaissant et la Haine survenant, les éléments sont partiellement séparés et partiellement combinés ; après cela, les éléments sont complètement dissociés et l'Amour est en dehors du monde ; finalement, l'Amour rassemble de nouveau les éléments et la Haine disparaît, de sorte que nous revenons à la sphère originelle.

Cette doctrine d'Empédocle représente un tournant très net de la philosophie grecque vers une vue plus matérialiste. Les quatre éléments ne sont pas tant des principes fondamentaux que des substances matérielles réelles. C'est là que s'exprime pour la première fois l'idée que le mélange et la séparation de quelques substances (fondamentalement différentes) explique l'infinie variété des choses et des phénomènes. Le pluralisme n'a jamais tenté ceux qui ont l'habitude de penser en principes fondamentaux ; mais c'est un genre de compromis raisonnable qui évite la difficulté du monisme et permet l'établissement d'un certain ordre.

Le pas suivant vers le concept de l'atome fut fait par Anaxagore, contemporain d'Empédocle, qui vécut à Athènes pendant environ trente ans, probablement durant la première moitié du ^v^e siècle avant Jésus-Christ. Anaxagore souligne l'idée de mélange, l'hypothèse que tout changement est causé par le mélange et la séparation ; il suppose l'existence d'une variété infinie de « grains » infiniment petits, qui composent toutes choses. Ces grains n'ont rien à voir avec les quatre éléments d'Empédocle, ce sont des grains d'une diversité infinie ; mais ils sont mélangés puis séparés à nouveau et c'est ainsi que se produit tout changement. La doctrine d'Anaxagore permet pour la première fois une interprétation géométrique du terme « mélange » : étant donné qu'il parle de grains infiniment petits, ce mélange peut se décrire comme le mélange de deux sortes de sables aux couleurs différentes ; ces grains peuvent changer en nombre et en position. Anaxagore part de l'hypothèse que tous les grains se trouvent dans tout, seule la proportion peut en changer d'une chose à une autre. Il dit : « Toutes choses se trouvent dans tout ; il n'est pas non plus possible qu'elles soient séparées, mais chaque chose comporte une part du tout. » L'univers d'Anaxagore est mis en mouvement non par l'Amour et la Haine, comme dans Empédocle, mais par le *Noûs*, ce que nous pouvons traduire comme étant « l'Esprit ».

De là au concept d'atome, il n'y avait qu'un pas et ce pas fut franchi par Leucippe et Démocrite d'Abdère. L'antithèse de l'Être et du Non-Être de la philosophie de Parménide est ici abandonnée pour l'antithèse du « Plein » et du « Vide ». L'Être est non seulement Un, mais il peut se répéter un nombre infini de fois : c'est l'atome, l'unité de matière la plus petite, insécable ; l'atome est éternel et indestructible, mais il a une dimension finie ; le mouvement est rendu possible par le vide entre les atomes. C'est ainsi que, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, fut énoncée l'idée de particules d'une petitesse ultime – nous dirions aujourd'hui de

particules élémentaires – formant les « briques » fondamentales avec lesquelles est construite la matière.

D'après ce nouveau concept de l'atome, la matière n'est pas seulement faite de « pleins », mais aussi de « creux », d'espace vide dans lequel évoluent les atomes. L'objection logique que Parménide opposait au Vide (à savoir que le Non-être ne peut exister) est tout simplement ignorée afin de satisfaire à l'expérience. Du point de vue actuel, nous dirions que l'espace vide entre les atomes de la philosophie de Démocrite n'était pas le néant ; il était le véhicule de la géométrie et de la cinématique, rendant possibles les diverses configurations et les divers mouvements des atomes. Mais la possibilité d'un espace vide a toujours été en philosophie un problème controversé. Dans la théorie de relativité généralisée, on donne comme réponse que la géométrie est produite par la matière ou vice versa. Cette réponse correspond d'une façon plus proche au point de vue de nombreux philosophes qui trouvent que l'espace est défini par une extension de la matière. Mais Démocrite, afin de rendre possibles changement et mouvement, s'écarte nettement de cette thèse.

Les atomes de Démocrite étaient tous faits de la même substance, laquelle avait la propriété d'exister, mais sous des formes et des dimensions différentes. Par conséquent, ces atomes étaient décrits comme sécables au sens mathématique, mais non au sens physique. Les atomes pouvaient se déplacer et occuper dans l'espace des positions différentes ; mais ils n'avaient pas d'autres propriétés physiques : ils n'avaient ni couleur, ni odeur, ni saveur. Les propriétés de la matière que perçoivent nos sens étaient supposées provenir des mouvements et des positions des atomes dans l'espace. De même qu'il est possible d'écrire soit une tragédie, soit une comédie en utilisant les mêmes lettres de l'alphabet, on peut réaliser la grande variété des phénomènes de ce monde avec les mêmes atomes, grâce aux différences de leurs configurations et de leurs mouvements. La géométrie et la cinématique, ainsi rendues possibles grâce au vide, se

montrèrent en quelque sorte plus importantes encore que l'être pur. Démocrite aurait dit : « Une chose ne fait que paraître avoir une couleur, que paraître sucrée ou amère. Seuls les atomes et le vide ont une existence réelle. »

Dans la philosophie de Leucippe, les atomes ne se déplacent pas purement au hasard. Leucippe semble avoir cru au déterminisme total, puisqu'on sait qu'il a dit : « Rien n'arrive sans raison, tout a une base ou une nécessité. » Les atomistes n'attribuaient aucune raison au mouvement initial des atomes, ce qui montre tout simplement qu'ils pensaient à une description causale du mouvement atomique : la causalité ne peut expliquer les phénomènes que par des phénomènes antérieurs, elle ne peut jamais expliquer le commencement.

Les idées fondamentales de la théorie atomique furent reprises et en partie modifiées par la philosophie grecque ultérieure. Pour faire la comparaison avec la physique atomique actuelle, il est important de mentionner l'explication de la matière que donne Platon dans son dialogue du *Timée*. Platon n'était pas un atomiste ; au contraire, Diogène de Laërte rapporte que Platon détestait tellement Démocrite qu'il aurait voulu voir brûler tous ses livres. Mais Platon combina des idées proches de l'atomisme avec les doctrines de l'école pythagoricienne et avec les enseignements d'Empédocle.

L'école pythagoricienne était un rejeton de l'orphisme, lequel remonte au culte de Dionysos. C'est là qu'a été établi le lien entre religion et mathématique, lien qui depuis lors a exercé la plus forte influence sur la pensée humaine. Les pythagoriciens semblent avoir été les premiers à comprendre la force créatrice inhérente aux formules mathématiques ; leur découverte que deux cordes vibrent en harmonie quand leurs longueurs sont dans un rapport simple démontrait quel pouvait être l'apport des mathématiques à la compréhension des phénomènes de la Nature. Pour les pythagoriciens, ce n'était pas tant une question de compréhension : d'après

eux, le simple rapport mathématique entre les longueurs des cordes *créait* l'harmonie des sons. Les doctrines de l'école pythagoricienne contenaient une forte part de mysticisme qu'il nous est difficile de comprendre. Mais en incorporant les mathématiques dans leur religion, ils touchaient à un point essentiel du développement de la pensée humaine. Citons sur ce point ce que Bertrand Russell dit de Pythagore : « Je ne connais aucun autre homme qui ait eu autant d'influence dans la sphère de la pensée. »

Platon connaissait la découverte des solides réguliers par les pythagoriciens, ainsi que la possibilité de les combiner avec les éléments d'Empédocle. Il compara les plus petits morceaux de l'élément-terre avec le cube, de l'air avec l'octaèdre, du feu avec le tétraèdre et de l'eau avec l'icosaèdre. Aucun élément ne correspond au dodécaèdre ; à ce sujet, Platon se contente de dire : « Il y avait encore une cinquième combinaison que Dieu a utilisée pour élaborer l'univers. »

Si les solides réguliers – lesquels représentent les quatre éléments – peuvent le moins du monde se comparer aux atomes, Platon montre clairement qu'ils ne sont pas insécables. Il construit les solides réguliers à partir de deux triangles fondamentaux, le triangle équilatéral et le triangle isocèle, assemblés pour former la surface des solides. Par conséquent, les éléments peuvent (du moins partiellement) se transformer les uns dans les autres ; les solides réguliers peuvent être décomposés en leurs triangles, à partir desquels on peut former de nouveaux solides réguliers : par exemple, un tétraèdre et deux octaèdres peuvent se décomposer en vingt triangles équilatéraux, lesquels peuvent se recombinaisonner pour donner un icosaèdre ; cela veut dire qu'un atome de feu et deux atomes d'air peuvent se combiner pour donner un atome d'eau. Mais les triangles fondamentaux ne peuvent être considérés comme de la matière, car ils n'ont aucune dimension dans l'espace ; c'est seulement quand ils sont assemblés pour former un solide régulier qu'une unité de matière est créée. Les plus petites parties de la matière ne sont pas les Entités fondamentales, comme dans la philosophie

de Démocrite, mais sont des formules. Là, il est tout à fait évident que la forme est plus importante que la substance qui compose cette forme.

Après avoir ainsi brièvement passé en revue la philosophie grecque jusqu'au concept d'atome, nous pouvons revenir à la physique moderne et nous demander comment nos vues actuelles sur l'atome et la mécanique quantique peuvent se comparer à ce concept ancien. Historiquement, le mot « atome » en physique et en chimie modernes a été appliqué à autre chose que son objet durant la renaissance de la science au XVII^e siècle, car les plus petites particules appartenant à ce qu'on appelle un élément chimique sont encore des systèmes assez complexes formés d'unités plus petites. On donne aujourd'hui à ces unités le nom de particules élémentaires et il est évident que, si quelque chose en physique moderne devait se comparer aux atomes de Démocrite, ce devraient être les particules élémentaires comme le proton, le neutron, l'électron, le méson.

Démocrite se rendait bien compte que même si les atomes, par leur configuration et leur mouvement, devaient *expliquer* les propriétés de la matière (couleur, odeur, saveur), ils ne pouvaient avoir eux-mêmes ces propriétés. Par conséquent, il a privé l'atome de ces qualités, ce qui en fait un morceau de matière assez abstrait. Mais Démocrite a laissé à l'atome la qualité d'« exister », d'avoir des dimensions dans l'espace, une forme, un mouvement. Il a laissé subsister ces qualités, car comment parler de l'atome si on les lui avait toutes retirées ? D'autre part, cela implique que son concept de l'atome ne peut expliquer ni la géométrie, ni les dimensions dans l'espace, ni l'existence, puisque celles-ci ne peuvent se réduire à quelque chose de plus fondamental. La position actuelle sur la particule élémentaire semble sur ce point plus cohérente et plus révolutionnaire. Prenons la question suivante : qu'est-ce qu'une particule élémentaire ? Nous parlons par exemple d'un neutron, mais nous ne pouvons donner aucune image bien définie de ce que nous entendons par ce mot : nous pouvons utiliser à ce sujet plusieurs images et le décrire une fois comme

une particule, une autre fois comme une onde ou comme un paquet d'ondes ; mais nous savons qu'aucune de ces descriptions n'est exacte. Il est certain que le neutron n'a ni couleur, ni odeur, ni saveur ; sur ce point, il ressemble à l'atome de la philosophie grecque ; mais même les autres qualités sont refusées à la particule élémentaire, du moins jusqu'à un certain point ; les concepts de géométrie et de cinématique, comme la forme et le mouvement dans l'espace, ne peuvent lui être appliqués de façon cohérente. Si l'on désire donner une description précise de la particule élémentaire – et il faut mettre là l'accent sur le mot « précise » – la seule chose qu'on puisse donner comme description, c'est une fonction de probabilité. On s'aperçoit donc que même la qualité d'exister (si l'on peut appeler cela une « qualité ») est refusée à ce qu'on décrit. Il s'agit d'une possibilité d'exister ou d'une tendance à exister. Par conséquent, la particule élémentaire de physique moderne est bien plus abstraite que l'atome des Grecs et, par là même, elle est un indice bien plus cohérent pour expliquer le comportement de la matière.

Dans la philosophie de Démocrite, tous les atomes sont faits de la même substance (si l'on a là le droit d'employer le mot « substance »). Les particules élémentaires en physique moderne ont une masse, au même sens limité dans lequel elles ont d'autres propriétés. Étant donné que masse et énergie, d'après la théorie de la relativité, sont essentiellement le même concept, nous pouvons dire que toutes les particules élémentaires consistent en énergie. Cela pourrait s'interpréter en tant que définissant l'énergie comme la substance primordiale du monde. Elle a en vérité la propriété essentielle qui appartient au mot « substance », à savoir qu'elle se conserve. Par conséquent, les vues de la physique actuelle, ainsi qu'on l'a mentionné, sont sur ce point très proches de celles d'Héraclite à condition d'interpréter son élément « feu » comme signifiant l'énergie. L'énergie est en réalité ce qui fait mouvoir ; on peut l'appeler la cause première de tout changement et l'énergie peut se transformer en matière, en chaleur ou en lumière. On peut

trouver la lutte des contraires de la philosophie d'Héraclite dans la lutte entre deux formes d'énergie.

Dans la philosophie de Démocrite, les atomes sont des unités de matière indestructibles et éternelles qui ne peuvent jamais se transformer l'une dans l'autre. Sur ce point, la physique actuelle prend nettement position contre le matérialisme de Démocrite et pour le point de vue de Platon et des pythagoriciens. Les particules élémentaires ne sont certainement pas d'éternelles et indestructibles unités de matière, elles peuvent effectivement se transformer l'une dans l'autre ; en fait, si deux particules de ce genre, parcourant l'espace avec une très grande énergie cinétique, se heurtent, il peut se créer de nombreuses particules élémentaires nouvelles à partir de l'énergie disponible et les particules initiales peuvent disparaître dans la collision. De tels phénomènes s'observent fréquemment et apportent la meilleure preuve que toutes les particules sont faites de la même substance, à savoir d'énergie. Mais l'on peut pousser un peu plus loin la ressemblance de ces vues modernes avec celles de Platon et des pythagoriciens : les particules élémentaires dans le *Timée* de Platon sont finalement non de la substance, mais des formes mathématiques. La formule « Toute chose est nombre » est attribuée à Pythagore. Les seules formes mathématiques dont on disposait à l'époque étaient des formes géométriques comme les solides réguliers ou les triangles définissant leur surface ; en théorie quantique actuelle, il ne peut y avoir de doute que les particules élémentaires seront également pour finir des formes mathématiques, mais d'une nature bien plus complexe. Les philosophes grecs pensaient à des formes statiques et les découvraient dans les solides réguliers ; mais la science moderne est partie dès son début, au XVI^e et au XVII^e siècle, du problème dynamique. L'élément constant en physique depuis Newton, ce n'est pas une configuration ou une forme géométrique, mais une loi dynamique ; l'équation du mouvement se maintient à travers tous les temps, elle est en ce sens éternelle, alors que les formes géométriques (comme les orbites)

changent. Par conséquent, les formes mathématiques qui représentent les particules élémentaires seront des solutions de quelque éternelle loi du mouvement de la matière. Ce problème n'a en fait pas encore été résolu : la loi fondamentale du mouvement de la matière n'est pas encore connue et l'on ne peut en déduire mathématiquement les propriétés des particules élémentaires. Mais la physique théorique, dans son état actuel, ne semble pas très loin de ce but et nous pouvons du moins dire à quel genre de loi nous devons nous attendre. L'équation définitive du mouvement de la matière sera probablement une équation ondulatoire non linéaire et quantifiée pour un champ ondulatoire d'opérateurs qui ne représentera que la matière et non une onde ou particule spécifique. Cette équation ondulatoire sera probablement équivalente à des ensembles assez complexes d'équations intégrales ayant des valeurs « propres » et des solutions « propres », comme les appellent les physiciens. Ces solutions propres représenteront finalement les particules élémentaires et seront les formes mathématiques qui remplaceront les solides réguliers des pythagoriciens. Nous pourrions mentionner ici que ces solutions « propres » se déduiront de l'équation fondamentale de la matière par un processus mathématique ressemblant beaucoup à celui par lequel les vibrations harmoniques des cordes vibrantes de Pythagore se déduisent de l'équation différentielle de la corde vibrante. Mais, comme nous venons de le dire, ces problèmes ne sont pas encore résolus.

Si nous suivons la ligne de pensée pythagoricienne, nous pouvons espérer que la loi fondamentale du mouvement se montrera une loi mathématiquement simple, même si son application aux états propres peut se montrer fort compliquée. Il est difficile d'étayer cet espoir de simplicité par le moindre argument solide, sauf le fait que, jusqu'à présent, il a toujours été possible d'écrire les équations fondamentales de la physique sous des formes mathématiques simples. Ce fait s'accorde avec la religion pythagoricienne et de nombreux physiciens partagent leur conviction à ce

sujet, mais on n'a encore trouvé aucun argument convaincant pour montrer qu'il doive en être ainsi.

Nous pouvons ajouter ici un argument concernant une question que posent souvent les profanes sur le concept de particules élémentaires en physique moderne : pourquoi les physiciens proclament-ils que leurs particules élémentaires ne peuvent se subdiviser en morceaux plus petits ? La réponse à cette question montre clairement à quel point la science moderne est plus abstraite que la philosophie grecque. Le raisonnement est le suivant : comment diviser une particule élémentaire ? On ne pourrait sûrement le faire qu'avec des forces extrêmes et des outils très affinés ; les seuls outils dont nous disposons sont d'autres particules élémentaires. Par conséquent, le choc entre deux particules élémentaires à énergies extrêmement élevées serait le seul processus par lequel on pourrait finalement subdiviser les particules. En fait, elles *peuvent* être subdivisées par des processus de ce genre, et parfois en très petits fragments ; mais ces fragments sont de nouveau des particules élémentaires et non des morceaux plus petits de ces particules, et les masses de ces fragments résultent de la très grande énergie cinétique des deux particules entrant en collision. En d'autres termes, c'est la transmutation d'énergie en matière qui rend possible aux fragments de particules élémentaires d'être de nouveau ces mêmes particules.

Après avoir ainsi comparé la philosophie grecque avec les vues actuelles de la physique atomique, il nous faut mettre le lecteur en garde contre une interprétation erronée de cette comparaison : à première vue, il pourrait sembler que les philosophes grecs, par une sorte d'ingénieuse intuition, soient parvenus aux mêmes conclusions ou à des conclusions très semblables à celles obtenues par plusieurs siècles de travail acharné, tant expérimental que mathématique ; mais cette interprétation de notre comparaison serait complètement trompeuse. Il existe une énorme différence entre la science actuelle et la philosophie grecque, différence qui

réside précisément dans l'attitude empirique de la science moderne. Depuis l'époque de Galilée et de Newton, la science a été fondée sur une étude détaillée de la Nature et sur le postulat qu'il ne faut rien poser qui n'ait été vérifié ou qui du moins ne puisse se vérifier par l'expérience. L'idée qu'on puisse isoler certains phénomènes de la Nature grâce à une expérience afin d'en étudier les détails et de découvrir quelle est la loi constante dans le changement continu, cette idée n'est pas venue aux philosophes grecs. De ce fait, dès son point de départ, la science moderne s'est tenue sur une base bien plus modeste mais aussi beaucoup plus solide que la philosophie ancienne. Ce que postule la physique moderne a donc une signification beaucoup plus sérieuse que ce que postulaient les philosophes grecs. Quand Platon dit par exemple que les particules les plus petites du feu sont des tétraèdres, il n'est pas facile de voir ce qu'il voulait réellement dire par là : la forme de tétraèdre n'était-elle que symboliquement attachée à l'élément feu ? Ou bien les particules les plus petites du feu agissaient-elles mécaniquement comme des tétraèdres rigides ou comme des tétraèdres élastiques ? Quelle force fallait-il pour les séparer en triangles équilatéraux ? etc. Et la science moderne poserait pour finir la question suivante : comment peut-on décider expérimentalement que les atomes de feu sont des tétraèdres et non, par exemple, des cubes ? Nous voyons donc que quand la science moderne déclare que le proton est une certaine solution d'une équation fondamentale de la matière, elle veut dire par là que nous pouvons, à partir de cette solution, déduire mathématiquement toutes les propriétés possibles du proton et que nous pouvons vérifier expérimentalement en détail l'exactitude de cette solution. Cette possibilité de vérifier expérimentalement avec une extrême précision l'exactitude d'une assertion dans tous ses détails donne un poids énorme à l'affirmation énoncée, poids que nous ne saurions accorder aux affirmations des débuts de la philosophie grecque.

Il reste que certaines assertions de l'ancienne philosophie sont assez proches de celles de la science moderne. Cela montre tout simplement jusqu'où on peut aller en combinant la connaissance ordinaire que nous avons de la Nature – sans faire d'expériences – avec l'effort inlassable pour introduire quelque ordre logique dans cette connaissance, afin de la comprendre à partir des principes généraux.

5.

Le développement des idées philosophiques depuis Descartes et la nouvelle situation en théorie quantique

Après l'apogée de la science et de la culture grecques, aux ^v^e et ^{iv}^e siècles avant Jésus-Christ, et durant les deux mille années qui ont suivi, l'esprit humain s'est en grande partie préoccupé de problèmes d'un autre genre. Dans les premiers siècles de culture grecque, la plus forte pression venait de la réalité immédiate du Monde où vit l'homme et qu'il perçoit par ses sens. Cette réalité bouillonnait de vie et l'on ne voyait pas de raison valable pour souligner la distinction entre matière et esprit, entre le corps et l'âme. Mais dans la philosophie de Platon, on s'aperçoit déjà qu'une autre réalité commence à prendre de la force. Dans sa fameuse parabole de la caverne, Platon compare les hommes à des prisonniers enfermés dans une caverne où ils sont attachés de manière à ne regarder que dans une direction ; un feu est allumé derrière leur dos et ils voient sur un mur leur propre ombre et celle des objets qui se trouvent derrière eux. Ne voyant que des ombres, ils se figurent que celles-ci sont réelles et ne se rendent pas

compte qu'il existe des objets. Finalement, un des prisonniers s'évade et passe de la caverne à la lumière du jour. Pour la première fois, il aperçoit des choses réelles et il se rend compte qu'il a été jusque-là trompé par les ombres. Pour la première fois, il connaît la vérité et pense avec regret à sa longue vie dans l'obscurité. Le vrai philosophe, c'est le prisonnier qui s'est échappé de la caverne et est parvenu à la lumière de la vérité, c'est celui qui possède une connaissance réelle. Cette prise de contact immédiate avec la vérité – ou, pourrait-on dire, avec Dieu – est la nouvelle réalité qui a commencé à devenir plus forte que la réalité du Monde tel qu'il est perçu par nos sens. Le contact immédiat avec Dieu se produit dans l'âme humaine et non dans le Monde, et c'est ce problème qui a préoccupé la pensée humaine plus que toute autre chose durant les deux mille ans qui se sont écoulés après Platon. Au cours de cette période, les yeux des philosophes étaient fixés sur l'âme humaine et sur ses relations avec Dieu, sur les problèmes d'éthique et sur l'interprétation de la Révélation et l'on n'étudiait plus le Monde extérieur. Ce n'est qu'au moment de la Renaissance italienne qu'on a pu de nouveau observer un changement graduel qui a finalement entraîné un renouveau d'intérêt pour la Nature.

Le grand développement des sciences expérimentales à partir des XVI^e et XVII^e siècles fut précédé et accompagné d'un développement des idées philosophiques en relation proche avec les concepts fondamentaux de la science. Il peut donc être instructif de commenter ces idées d'après le point de vue finalement adopté par la science actuelle.

Le premier grand philosophe de cette nouvelle période de la science fut René Descartes, qui vécut pendant la première moitié du XVII^e siècle. Parmi ses idées, celles qui furent les plus importantes pour l'évolution de la pensée scientifique se trouvent dans son *Discours de la méthode* : partant du doute et du raisonnement logique, il tente de découvrir une base complètement nouvelle et, pense-t-il, solide sur laquelle édifier un système philosophique. Il se refuse à partir pour cela de la Révélation et ne désire

pas non plus accepter sans critique ce qui est perçu par les sens. De sorte qu'il prend pour base sa méthode du doute : il jette le doute sur ce que nos sens nous dictent à propos des résultats de notre raisonnement et en arrive finalement à sa célèbre phrase : *Cogito, ergo sum*, je ne puis douter de mon existence puisqu'elle s'ensuit du fait que je pense. Après avoir ainsi établi l'existence du Moi, il s'attache à prouver l'existence de Dieu essentiellement selon la ligne de la philosophie scolastique. Enfin, l'existence du Monde s'ensuit du fait que, Dieu m'ayant donné un fort penchant à croire à l'existence du Monde, il est tout simplement impossible que Dieu m'ait trompé.

Cette base de la philosophie de Descartes est radicalement différente de celle des anciens philosophes grecs. Ici, le point de départ n'est pas une substance ou un principe fondamental, mais la recherche d'une connaissance fondamentale. Et Descartes se rend compte que ce que nous savons de notre esprit est plus sûr que ce que nous connaissons du Monde extérieur. Cependant, son point de départ, avec le « triangle » Dieu-le Monde-Moi, simplifie déjà dangereusement la base du futur raisonnement. La division entre matière et esprit, entre corps et âme, qui avait débuté dans la philosophie de Platon, est maintenant totale. Dieu est séparé et du Moi et du Monde. Dieu est en fait placé si haut au-dessus du Monde et des hommes qu'Il n'apparaît finalement plus dans la philosophie de Descartes que comme point de référence commun établissant la relation entre le Moi et le Monde.

Alors que la philosophie grecque avait essayé de découvrir l'ordre dans une infinie variété de choses et de phénomènes par la recherche de quelque principe unifiant fondamental, Descartes essaya d'établir l'ordre grâce à un partage fondamental. Mais les trois portions résultant de ce partage perdent une partie de leur essence quand on considère l'une d'entre elles séparément des deux autres. Si l'on utilise les concepts fondamentaux de Descartes, il est essentiel que Dieu soit dans le Monde et dans le Moi et il

est également essentiel que le Moi ne puisse réellement se séparer du Monde. Descartes connaissait naturellement l'indéniable nécessité de ce lien mais, au cours de la période qui s'ensuivit, la philosophie et les sciences expérimentales se développèrent sur la base de la polarité entre *res cogitans* et *res extensa* et les sciences de la Nature concentrèrent leur intérêt sur la *res extensa*. L'influence du partage cartésien sur la pensée humaine dans les siècles suivants ne saurait guère être surestimée, mais c'est justement ce partage qu'il nous a fallu critiquer plus tard en partant du développement de la physique à notre époque.

Il serait naturellement inexact de dire que Descartes, par sa nouvelle méthode philosophique, a donné une nouvelle direction à la pensée humaine. Ce qu'il fit effectivement, ce fut de formuler pour la première fois une tendance de la pensée humaine qui pouvait déjà s'apercevoir durant la Renaissance en Italie et dans la Réforme. Il y eut le renouveau d'intérêt porté aux mathématiques, renouveau qui exprimait une influence croissante des éléments platoniciens en philosophie, ainsi que l'insistance sur la religion personnelle. L'intérêt croissant pour les mathématiques favorisait un système philosophique qui partait d'un raisonnement logique et essayait par cette méthode d'aboutir à une vérité aussi sûre qu'une conclusion mathématique. L'accent mis sur la religion personnelle séparait du Monde le Moi et ses rapports avec Dieu. L'intérêt qu'on attachait à combiner une connaissance empirique avec les mathématiques, telles qu'elles apparaissaient dans l'œuvre de Galilée, fut peut-être en partie dû à la possibilité de parvenir ainsi à une connaissance pouvant être mise complètement en dehors des disputes théologiques soulevées par la Réforme. Cette connaissance empirique pouvait se formuler sans parler de Dieu ou de nous-mêmes et aidait à séparer les trois concepts fondamentaux Dieu-le Monde-Moi, ou à séparer *res cogitans* et *res extensa*. À cette époque, les pionniers de la science empirique se mirent parfois

explicitement d'accord pour ne point mentionner Dieu ou une quelconque cause fondamentale en nom au cours de leurs discussions.

D'autre part, les difficultés soulevées par cette séparation pouvaient se percevoir clairement dès le début. Par exemple, dans la distinction entre *res cogitans* et *res extensa*, Descartes fut obligé de mettre les animaux entièrement du côté *res extensa* ; par conséquent, animaux et plantes n'étaient pas essentiellement différents des machines et leur comportement était totalement conditionné par des causes matérielles. Mais il a toujours paru difficile de contester complètement aux animaux l'existence d'un genre quelconque d'âme et il nous semble que le concept plus ancien de l'âme (par exemple dans la philosophie de saint Thomas d'Aquin) était plus naturel et moins forcé que le concept cartésien de *res cogitans*, même si nous sommes convaincus que les lois physico-chimiques sont strictement valables pour les êtres vivants. Une des ultimes conséquences de cette thèse de Descartes, c'était que, si l'on ne considérait les animaux que comme des machines, il était difficile de ne pas penser la même chose des hommes. Étant donné que, d'autre part, *res cogitans* et *res extensa* étaient prises comme complètement différentes en leur essence, il ne semblait pas possible qu'elles pussent agir l'une sur l'autre. Donc, pour préserver le parallélisme complet entre expériences de l'esprit et expériences du corps, l'esprit était également complètement déterminé dans ses activités par des lois qui correspondaient aux lois physico-chimiques. C'est là que se posait la question de la possibilité du « libre arbitre ». Il est visible que toute cette description est quelque peu artificielle et montre les graves défauts de ce partage cartésien.

Mais d'autre part, en sciences expérimentales, ce partage a admirablement réussi pendant plusieurs siècles. La mécanique de Newton et toutes les autres parties de la physique classique construites d'après son modèle portaient de l'hypothèse qu'on peut décrire le Monde sans parler de

Dieu ou de nous-mêmes. Cette possibilité parut bientôt être une condition presque nécessaire des sciences expérimentales en général.

Mais sur ce point la théorie quantique a changé en une certaine mesure la situation, et nous pouvons donc maintenant comparer le système philosophique de Descartes et notre position actuelle en physique. On a déjà fait remarquer que, dans l'interprétation de Copenhague, nous pouvons effectivement raisonner sans nous mentionner nous-mêmes en tant qu'individus, mais que nous ne pouvons négliger le fait que les sciences expérimentales sont élaborées par des hommes : elles ne se contentent pas de décrire et d'expliquer la Nature, elles sont une partie de l'interaction entre la Nature et nous, elles décrivent la Nature telle que notre méthode d'investigation nous la révèle. Il s'agit là d'une possibilité à laquelle Descartes n'aurait pu songer, mais qui rend impossible la séparation nette entre l'univers et le Moi.

Si l'on examine de près la grave difficulté éprouvée par des savants même aussi éminents qu'Einstein à comprendre et à accepter l'interprétation de Copenhague, on peut en trouver les racines dans le partage cartésien : ce dernier a imprégné profondément l'esprit humain durant les trois siècles qui ont suivi Descartes et il faudra longtemps avant qu'il soit remplacé par une attitude réellement autre envers le problème de la réalité.

La position à laquelle a mené le partage cartésien par rapport à la *res extensa* était ce qu'on pourrait appeler un réalisme métaphysique : le Monde, à savoir les choses étendues, « existe ». Il faut distinguer cela du réalisme pratique et l'on peut décrire les différentes formes de réalisme comme suit : nous « objectivons » un postulat si nous proclamons que son contenu ne dépend pas des conditions dans lesquelles il peut être vérifié. Le réalisme pratique suppose qu'il y a des postulats qui peuvent être rendus objectifs et qu'en fait la plus grande partie de notre expérience de la vie quotidienne consiste en postulats de ce genre. Le réalisme dogmatique, lui,

proclame qu'il n'existe pas de postulat concernant le Monde matériel qui ne puisse être rendu objectif. Le réalisme pratique a toujours été et sera toujours une partie essentielle des sciences expérimentales. Mais le réalisme dogmatique, tel que nous l'envisageons actuellement, n'est pas une condition nécessaire aux sciences expérimentales ; il a cependant joué dans le passé un rôle très important dans l'évolution de la science ; en fait, la position prise par la physique classique est une position de réalisme dogmatique. Quand Einstein a critiqué à Copenhague la mécanique quantique, il l'a fait à partir d'une base de réalisme dogmatique, attitude fort naturelle : tout scientifique se livrant à la recherche estime qu'il cherche à découvrir quelque chose d'objectivement vrai ; quand il affirme quelque chose, il ne désire pas que cela puisse dépendre des conditions dans lesquelles on pourra le vérifier. En particulier en physique, le fait que nous pouvons expliquer la Nature par de simples lois mathématiques nous dit que nous sommes entrés là en contact avec une caractéristique authentique de la réalité et non avec une chose que nous avons nous-mêmes inventée, en quelque sens du terme que cela soit. C'est cette situation qu'Einstein avait dans l'esprit quand il prit le réalisme dogmatique comme base des sciences de la Nature. Mais la théorie quantique est en elle-même un exemple de la possibilité d'expliquer la Nature au moyen de lois mathématiques simples, sans se servir du réalisme dogmatique. Ces lois peuvent peut-être ne pas sembler très simples quand on les compare à la mécanique newtonienne ; mais si l'on en juge par l'énorme complexité des phénomènes à expliquer (par exemple les spectres de raies d'atomes compliqués), la formulation mathématique de la mécanique quantique est relativement simple. Les sciences de la Nature sont en fait possibles sans partir du réalisme dogmatique.

Le réalisme métaphysique va plus loin que le réalisme dogmatique et déclare que « les choses existent réellement ». C'est en fait ce que Descartes tentait de prouver par l'argument que « Dieu ne peut nous avoir

trompés ». L'affirmation que les choses existent réellement diffère du postulat du réalisme dogmatique dans la mesure où, ici, on emploie le mot « existe », qui est également impliqué dans l'autre postulat *Cogito, ergo sum*. Mais il est difficile de voir ce qu'on veut dire par là qui ne soit déjà contenu dans la thèse du réalisme dogmatique ; et cela nous conduit à une critique générale de ce postulat : « Je pense, donc je suis », postulat que Descartes considérait comme la base solide sur laquelle il pouvait bâtir son système. Il est effectivement exact que son postulat a la certitude d'une conclusion mathématique si les mots *cogito* et *sum* sont définis de la manière habituelle ou, pour s'exprimer plus prudemment et d'une façon en même temps plus critique, si les mots sont définis de telle manière que le postulat s'ensuive. Mais cela ne nous indique en rien jusqu'où nous pouvons utiliser le concept de « penser » et « d'être » pour trouver notre voie. Finalement, savoir jusqu'où nous pouvons appliquer nos concepts demeure toujours une question empirique, dans un sens très général.

La difficulté du réalisme métaphysique fut ressentie peu après Descartes et devint le point de départ de la philosophie empiriste, de la philosophie des sensations et du positivisme.

Les trois philosophes qu'on peut tenir pour représentatifs du début de la philosophie empiriste sont Locke, Berkeley et Hume. À l'inverse de Descartes, Locke maintient que toute connaissance est finalement fondée sur l'expérience ; celle-ci peut être une sensation ou la perception d'une opération de notre propre esprit ; la connaissance, proclame Locke, c'est la perception de l'accord ou du désaccord de deux idées. Le pas suivant fut franchi par Berkeley : si effectivement toute notre connaissance est tirée de la perception, déclarer que les choses existent réellement n'a pas de sens, car, si nous avons la perception des choses, peu importe qu'elles existent ou pas ; par conséquent, être perçu équivaut à exister. Cette argumentation fut ensuite poussée jusqu'à un extrême scepticisme par Hume, qui nia

induction et causalité et en arriva donc à une conclusion qui détruirait la base de toute science empirique, si on la prenait au sérieux.

La critique du réalisme métaphysique exprimée dans la philosophie empiriste est certainement justifiée dans la mesure où elle met en garde contre l'emploi naïf du terme « existence » ; mais on peut critiquer pour la même raison les postulats positifs de cette philosophie. Nos perceptions ne sont pas primordialement des amas de couleurs ou de sons ; ce que nous percevons est déjà catalogué comme étant quelque chose, l'accent étant mis là sur le mot « chose » ; et par conséquent il est douteux que nous fassions un progrès quelconque en considérant que ce sont les perceptions plutôt que les choses qui sont les éléments ultimes de la réalité.

La difficulté sous-jacente a été clairement reconnue par le positivisme moderne. Cette école a soulevé des critiques contre l'utilisation naïve de certains termes comme « choses », « perception », « existence », d'après le postulat général qu'il faut toujours examiner à fond et de façon critique la question de savoir si une phrase donnée a le moindre sens. Ce postulat et l'attitude qui lui est sous-jacente sont tirés de la logique mathématique. Le processus dans les sciences de la Nature est dépeint comme attachant des symboles aux phénomènes ; ces symboles, comme en mathématiques, peuvent se combiner d'après certaines règles ; et des postulats sur les phénomènes peuvent ainsi être représentés par des combinaisons de symboles. Cependant, une combinaison de symboles qui ne satisfait pas aux règles n'est pas fausse ; elle n'a tout simplement pas de sens.

La difficulté évidente dans ce raisonnement, c'est l'absence de tout critère général pour juger quand une phrase doit être considérée comme dépourvue de sens. Une décision nette n'est possible que quand la phrase appartient à un système fermé de concepts et d'axiomes ; ce qui, dans l'évolution des sciences expérimentales, sera plutôt l'exception que la règle. Dans certains cas, la conjecture qu'une certaine phrase est dépourvue de sens a conduit historiquement à d'importants progrès, car elle a ouvert la

voie à l'établissement de nouveaux rapports qui auraient été impossibles si la phrase avait eu un sens. Nous en avons déjà discuté un exemple en mécanique quantique avec la phrase : « Sur quelle orbite l'électron se déplace-t-il autour du noyau ? » Mais en général, le système positiviste tiré de la logique mathématique est trop étroit pour une description de la Nature qui utilise forcément des mots et des concepts qui ne sont définis que vaguement.

La thèse philosophique qui veut que toute connaissance soit en définitive fondée sur l'expérience a finalement conduit à un postulat concernant la clarification logique de tout ce qu'on dit de la Nature. Un tel postulat a pu sembler justifié à l'époque de la physique classique ; mais depuis la mécanique quantique, nous avons appris qu'il ne saurait être satisfait. Par exemple, les mots « position » et « vitesse » d'un électron semblaient parfaitement définis quant à leurs significations et leurs liens possibles ; et effectivement, ils étaient des concepts clairement définis dans le cadre mathématique de la mécanique newtonienne. Mais, en fait, ils n'étaient pas bien définis, comme on le voit par les relations d'incertitude ; nous pouvons dire qu'ils étaient bien définis quant à leur position dans la mécanique newtonienne, mais qu'ils ne l'étaient pas vis-à-vis de la Nature. Cela nous montre que nous ne pouvons jamais savoir à l'avance quelles limitations l'augmentation de nos connaissances sur des domaines reculés de la Nature (dans lesquels nous ne pouvons pénétrer que grâce aux instruments les plus perfectionnés) apportera au domaine d'application de certains concepts. Par conséquent, dans ce processus de pénétration, nous sommes parfois obligés d'utiliser nos concepts d'une manière qui n'est pas justifiée, qui n'a pas de sens. Insister sur le postulat d'une complète clarification logique rendrait la science impossible ; la physique moderne nous rappelle là l'ancienne sagesse qui veut que, si l'on insiste pour ne jamais dire de choses erronées, il faille garder le silence.

Une combinaison de ces deux écoles de pensée – celle de Descartes d’une part et celle de Locke et Berkeley d’autre part – a été tentée par Kant, fondateur de l’idéalisme allemand. La partie de son œuvre présentant de l’importance pour la physique moderne est contenue dans la *Critique de la raison pure*. Il reprend la question de savoir si la connaissance n’est fondée que sur l’expérience ou si elle peut provenir d’autres sources et il en arrive à la conclusion que notre connaissance est en partie *a priori* et non tirée inductivement de l’expérience. Il distingue donc entre la connaissance « empirique » et la connaissance *a priori*. En même temps, il distingue les propositions « analytiques » des propositions « synthétiques » : les propositions analytiques suivent simplement la logique et les nier mènerait à se contredire soi-même ; toute proposition qui n’est pas « analytique » est appelée « synthétique ».

Quel est, d’après Kant, le critère pour qu’une connaissance soit *a priori* ? Kant est d’accord pour dire que toute connaissance part de l’expérience, mais il ajoute qu’elle n’est pas toujours tirée de l’expérience. Il est vrai que l’expérience nous enseigne qu’une certaine chose a telle ou telle propriété, mais elle ne nous enseigne pas qu’elle ne saurait être différente. Donc, si l’on pense à une proposition en même temps qu’à sa nécessité, elle est forcément *a priori*. L’expérience ne donne jamais à ses jugements une généralité complète. Par exemple, la phrase « Le soleil se lève tous les matins » signifie que nous ne connaissons pas d’exception à cette règle dans le passé et que nous nous attendons à ce qu’elle demeure vraie dans l’avenir. Or nous pouvons imaginer des exceptions à cette règle. Par conséquent, si un jugement est prononcé avec une généralité complète, il est forcément *a priori*. Un jugement analytique est toujours *a priori* : même si un enfant a appris l’arithmétique en jouant aux billes, il n’a pas besoin de revenir plus tard à l’expérience pour savoir que « deux et deux font quatre ». La connaissance empirique, elle, est synthétique.

Mais des jugements synthétiques *a priori* sont-ils possibles ? Kant essaie de le prouver en donnant des exemples qui semblent satisfaire aux critères ci-dessus. L'espace et le temps, dit-il, sont des formes *a priori* d'intuition pure. Dans le cas de l'espace, il donne les arguments métaphysiques suivants :

1. L'espace n'est pas un concept empirique abstrait des autres expériences, car l'espace est présupposé quand on réfère des sensations à quelque chose d'externe, et l'expérience externe n'est possible que par une représentation d'espace.

2. L'espace est une représentation *a priori* nécessaire, sous-jacente à toutes les perceptions externes, car nous ne saurions imaginer qu'il n'y a pas d'espace, bien que nous puissions imaginer qu'il n'y ait rien dans l'espace.

3. L'espace n'est pas un concept discursif ou global des relations des choses en général, car il n'existe qu'un seul espace, dont ce que nous appelons des « espaces » sont des parties et non des exemples.

4. L'espace est présenté comme une grandeur infinie donnée qui embrasse en elle toutes les parties de l'espace ; cette relation est différente de celle entre un concept et ses exemples et, par conséquent, l'espace n'est pas un concept mais une forme d'intuition.

Nous ne discuterons pas ici ces arguments ; ils ne sont mentionnés que comme exemple du type général de preuve que Kant avait à l'esprit quand il parlait de jugements synthétiques *a priori*.

En ce qui concerne la philosophie, Kant considérait comme étant *a priori*, outre l'espace et le temps, la loi de causalité et le concept de substance. Dans un stade ultérieur de sa pensée, il tenta d'y inclure la loi de conservation de la matière, celle de l'égalité de l'action et de la réaction, et même la loi de gravitation. Aucun physicien ne sera prêt à suivre Kant jusque-là si le terme *a priori* est utilisé dans le sens absolu que lui donnait

Kant. En mathématique, Kant considérait la géométrie euclidienne comme un *a priori*.

Avant de comparer ces doctrines de Kant avec les résultats de la physique moderne, nous devons mentionner une autre partie de son œuvre à laquelle nous aurons à nous référer plus loin. La pénible question de savoir si « les choses existent réellement » (question qui a donné naissance à la philosophie empiriste) intervient également dans le système kantien. Mais Kant n'a pas suivi la thèse de Berkeley et de Hume, bien que cela eût été logiquement cohérent. Il s'est maintenu sur la notion de la « chose en soi » comme étant différente du perçu et, de cette manière, il a gardé un certain lien avec le réalisme.

En passant maintenant à la comparaison des doctrines de Kant avec la physique moderne, il semble au premier abord que son concept central de « jugements synthétiques *a priori* » ait été complètement annihilé par les découvertes de notre siècle. La théorie de la relativité a changé nos vues sur l'espace et le temps, elle a en fait révélé des caractéristiques entièrement nouvelles de l'espace et du temps dont on ne voit rien dans les formes *a priori* d'intuition pure de Kant. La loi de causalité n'est plus appliquée en mécanique quantique et la loi de conservation de la matière n'est plus vraie pour les particules élémentaires. Il est évident que Kant ne pouvait prévoir ces nouvelles découvertes ; mais étant donné qu'il était convaincu que ces concepts seraient « les prolégomènes à toute métaphysique future qui se présenterait comme science », il est intéressant de voir où ses arguments se sont montrés faux.

Prenons comme exemple la loi de causalité. Kant dit que chaque fois que nous observons un phénomène, nous supposons qu'il existe un phénomène précédent dont le premier doit s'ensuivre d'après une règle ; cela, déclare Kant, est la base de tout travail scientifique. Pour cette discussion, il importe peu que nous puissions ou non trouver toujours le phénomène précédent dont découle l'autre. En fait, nous le trouvons très

souvent ; mais même si c'est impossible, rien ne nous empêche de nous demander ce que ce phénomène précédent a bien pu être et de chercher à le découvrir. Par conséquent, la loi de causalité se réduit à la méthode de recherche scientifique ; c'est la condition qui rend la science possible. Étant donné que nous appliquons effectivement cette méthode, la loi de causalité est *a priori* et ne dérive pas de l'expérience.

Est-ce vrai en physique atomique ? Prenons un atome de radium, lequel peut émettre une particule α à un instant qu'il nous est impossible de prévoir ; tout ce que nous pouvons dire, c'est que cette émission se produira en moyenne tous les deux mille ans. Donc, quand nous observons l'émission, nous ne cherchons effectivement pas un phénomène antérieur dont doit s'ensuivre l'émission d'après une règle. Logiquement, il serait tout à fait possible de rechercher ce phénomène antérieur et nous n'avons pas besoin de nous décourager parce qu'on ne l'a pas trouvé jusqu'ici. Mais pourquoi la méthode scientifique est-elle effectivement changée depuis Kant à propos de cette question très fondamentale ?

On peut donner à cette question deux réponses. L'une est que l'expérience nous a convaincus que les lois de la théorie quantique sont correctes ; et si elles le sont, nous savons que la découverte d'un phénomène précédent, cause de l'émission à un instant donné, est impossible. L'autre réponse est que nous connaissons le phénomène précédent, mais pas avec une précision parfaite ; nous savons quelles sont les forces dans le noyau atomique qui sont responsables de l'émission de la particule α , mais cette connaissance comprend l'incertitude introduite par l'interaction entre le noyau et le reste du Monde. Pour savoir pourquoi la particule α a été émise à cet instant particulier, il nous faudrait connaître la structure microscopique du Monde entier, y compris nous-mêmes, et cela est impossible ; par conséquent, les arguments de Kant pour le caractère *a priori* de la loi de causalité ne s'appliquent plus.

On pourrait donner les mêmes arguments contre le caractère *a priori* de l'espace et du temps en tant que forme d'intuition : le résultat serait le même. Les concepts *a priori* que Kant considérait comme une vérité indéniable ne sont plus contenus dans le système scientifique de la physique moderne.

Et cependant, ils forment une partie essentielle de ce système, mais dans un sens quelque peu différent. Au cours de la discussion de l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, il a été souligné que nous utilisons les concepts classiques pour décrire notre équipement expérimental et, plus généralement, pour décrire la partie du Monde qui n'appartient pas à l'objet de l'expérience. L'emploi de ces concepts, y compris l'espace, le temps et la causalité, est en fait la condition pour observer des phénomènes atomiques, donc est *a priori* dans ce sens du terme. Ce que Kant n'avait pas prévu, c'est que ces concepts *a priori* pouvaient être les conditions de la science et, en même temps, n'avoir qu'une portée limitée d'applicabilité. Quand nous faisons une expérience, il nous faut supposer une chaîne causale de phénomènes qui, partant du phénomène atomique, mène finalement à travers l'appareil jusqu'à l'œil de l'observateur ; si l'on se refusait à admettre l'existence de cette chaîne, rien ne pourrait être connu du phénomène atomique. Mais nous devons quand même garder à l'esprit la notion que physique classique et causalité n'ont qu'une portée limitée d'application. C'est ce paradoxe fondamental de la théorie quantique qui ne pouvait être prévu par Kant. La physique moderne a changé le postulat de Kant sur la possibilité de jugements synthétiques *a priori* et l'a fait passer du rang de postulat métaphysique à celui de postulat pratique. Les jugements synthétiques *a priori* ont donc le caractère d'une vérité relative.

Si l'on réinterprète ainsi l'*a priori* kantien, il n'y a pas de raison de considérer comme données les perceptions plutôt que les choses. Tout comme dans la physique classique, nous pouvons parler des phénomènes

non observés exactement comme nous parlons de ceux qui le sont. Par conséquent, le réalisme pratique est une partie naturelle de cette réinterprétation. Considérant la « chose en soi » kantienne, Kant a fait remarquer que nous ne pouvons rien conclure qu'à partir de la perception concernant la « chose en soi ». Ce postulat, comme l'a remarqué Weizsäcker, a son analogue formel dans le fait qu'en dépit de l'emploi de concepts classiques dans toutes les expériences un comportement non classique des objets atomiques est possible. Pour l'atomiste, la chose « en soi » – s'il utilise ce concept – est en définitive une structure mathématique ; mais contrairement à Kant, cette structure est indirectement déduite de l'expérience.

Dans cette réinterprétation, l'*a priori* kantien est indirectement relié à l'expérience, dans la mesure où il a été formé grâce au développement de l'esprit humain dans un passé très reculé. Suivant ce raisonnement, le biologiste Lorentz a une fois comparé les concepts *a priori* avec les comportements qu'on appelle chez les animaux des « schémas hérités ou innés ». Il est en fait parfaitement plausible que, pour certains animaux primitifs, l'espace et le temps soient différents de ce que Kant appelait notre « intuition pure » de l'espace et du temps. Cette dernière peut appartenir à l'espèce « homme », mais non au Monde en tant qu'indépendant des hommes. Mais nous abordons peut-être là des discussions trop hypothétiques avec ce commentaire biologique sur l'*a priori*. Nous ne les avons mentionnées ici que comme exemple de la manière dont on pourrait interpréter le terme de « vérité relative » par rapport à l'*a priori* de Kant.

La physique moderne a été prise ici comme exemple ou, pourrions-nous dire, comme modèle pour vérifier les résultats de certains importants systèmes philosophiques du passé qui, naturellement, étaient supposés valables pour un domaine beaucoup plus large. Ce que nous avons appris, surtout par la discussion des philosophies de Descartes et de Kant, pourrait peut-être s'énoncer de la façon suivante :

Tous les concepts et mots formés dans le passé par interaction entre le Monde et nous-mêmes ne sont pas vraiment nettement définis quant à leur signification ; c'est-à-dire que nous ne savons pas exactement jusqu'à quel point ils nous aideront à découvrir notre explication du Monde. Nous savons souvent qu'on peut les appliquer à une large variété d'expériences intérieures ou extérieures, mais nous ne connaissons pratiquement jamais avec précision les limites de leur domaine d'application. Cela est vrai même pour les concepts les plus simples et les plus généraux comme « existence » et « espace-temps ». Par conséquent, on ne pourra jamais parvenir par la raison pure à une vérité absolue.

Cependant, ces concepts peuvent être nettement définis quant à leurs liens. Cela est effectivement le cas quand les concepts deviennent partie intégrante d'un système d'axiomes et de définitions qu'on peut exprimer de façon cohérente par un ensemble mathématique. Un tel groupe de concepts liés entre eux peut être applicable à un vaste domaine d'expériences et nous aidera à trouver notre voie dans ce domaine. Mais la limite d'applicabilité ne sera en général pas connue, du moins pas complètement.

Même si nous nous rendons compte que la signification d'un concept n'est jamais définie avec une précision absolue, certains concepts font partie intégrante des méthodes scientifiques puisqu'ils représentent pour le moment le résultat final de l'évolution de la pensée humaine dans le passé, et même dans un passé très reculé ; peut-être sont-ils même hérités et, de toute manière, ils sont les instruments indispensables à la recherche scientifique actuelle. Dans ce sens, ils peuvent être pratiquement *a priori*. Mais, dans l'avenir, il est possible qu'on découvre de nouvelles limitations à leur applicabilité.

6.

Rapports entre la théorie quantique et les autres sciences expérimentales

Nous avons dit que les concepts des sciences expérimentales peuvent parfois être nettement définis quant à leurs rapports. Newton a été le premier à s'en apercevoir dans ses *Principia* et c'est justement pour cette raison que l'œuvre de Newton a exercé une immense influence sur toute l'évolution des sciences expérimentales durant les siècles qui l'ont suivie. Newton commence ses *Principia* par un groupe de définitions et d'axiomes liés entre eux de telle manière qu'ils forment ce qu'on pourrait appeler un « système fermé ». Chaque concept peut être représenté par un symbole mathématique et les rapports entre les différents concepts sont alors représentés par des équations mathématiques exprimées par des symboles. L'image mathématique de ce système assure qu'aucune contradiction interne ne puisse s'y produire. Ainsi, les mouvements possibles des corps sous l'influence des forces qui s'exercent sont représentés par les solutions possibles des équations. Le système de définitions et d'axiomes pouvant se traduire par un ensemble d'équations mathématiques est considéré comme décrivant une structure éternelle de la Nature, structure indépendante des valeurs particulières de l'espace ou du temps.

Les différents concepts sont si étroitement liés à l'intérieur du système qu'en général l'on ne pourrait changer aucun d'entre eux sans détruire le système tout entier.

C'est pour cette raison que, pendant longtemps, le système newtonien fut considéré comme définitif et que la tâche posée aux scientifiques de l'époque semblait n'être que d'étendre la mécanique newtonienne à des domaines expérimentaux de plus en plus vastes. En fait, la physique se développa d'après ce système pendant environ deux siècles.

En effet, à partir de la théorie du mouvement des points matériels, on pouvait passer à la mécanique des corps solides, aux mouvements de rotation, et l'on pouvait traiter les mouvements continus d'un fluide ou les mouvements vibratoires d'un corps élastique. Toutes ces branches de la mécanique ou de la dynamique furent graduellement développées en rapport étroit avec l'évolution des mathématiques et surtout du calcul différentiel, et les résultats en furent vérifiés par l'expérience. L'acoustique et l'hydrodynamique devinrent une partie de la mécanique. L'application de la mécanique newtonienne s'imposait pour une autre science, l'astronomie : les améliorations des méthodes mathématiques conduisirent graduellement à des déterminations de plus en plus précises du mouvement des planètes et de leurs interactions. Quand on découvrit les phénomènes de l'électricité et du magnétisme, on compara les forces électriques et magnétiques aux forces de gravitation et l'on réussit, là encore, à étudier leurs actions sur le mouvement des corps d'après la mécanique newtonienne. Finalement, au XIX^e siècle, on parvint à réduire la thermodynamique elle-même à de la mécanique, grâce à l'hypothèse que la chaleur consistait en réalité en un mouvement statistique complexe des plus petits éléments de la matière ; en combinant les concepts de la théorie mathématique des probabilités avec les concepts de mécanique newtonienne, Clausius, Gibbs et Boltzmann parvinrent à montrer que les lois fondamentales de la thermodynamique pouvaient s'interpréter comme des lois statistiques découlant de la

mécanique newtonienne appliquée à des systèmes mécaniques très complexes.

Jusque-là, le programme posé par la mécanique newtonienne avait été suivi d'une façon tout à fait cohérente et avait abouti à la compréhension d'un vaste ensemble d'expériences. La première difficulté se présenta quand on discuta du champ électromagnétique dans l'œuvre de Faraday et de Maxwell. En mécanique newtonienne, la force de gravitation avait été considérée comme donnée et non comme sujet de nouvelles études théoriques. Mais dans les travaux de Faraday et de Maxwell, le champ de force lui-même devint un sujet de recherches : les physiciens désiraient savoir comment ce champ de force variait dans l'espace et le temps. Ils essayèrent donc de poser des équations pour le mouvement dans un champ au lieu de ne se préoccuper que des corps sur lesquels ce champ agissait. Ce changement ramena à un point de vue qui avait été celui de nombreux scientifiques avant Newton : une action, semblait-il, ne pouvait se transmettre d'un corps à un autre que quand ces deux corps entraient en contact, par exemple par une collision ou un frottement. Newton avait introduit une nouvelle hypothèse très étrange en admettant une force qui pouvait agir à longue distance ; or, dans la théorie des champs de force, on pouvait revenir à l'idée ancienne – que l'action se transmettait d'un point à un point voisin – en se contentant de décrire le comportement des champs à l'aide d'équations différentielles. Cela se montra effectivement possible et la description des champs électromagnétiques, telle qu'elle était donnée par les équations de Maxwell, semblait donc une solution satisfaisante du problème des forces. Là, on s'était nettement écarté du programme fixé par la mécanique newtonienne ; les axiomes et définitions de Newton concernaient les corps et leur mouvement ; mais, avec Maxwell, les champs de force semblaient avoir acquis le même degré de réalité que celui des corps dans la mécanique de Newton. Ce point de vue ne fut naturellement pas accepté facilement ; et pour éviter un tel changement dans le concept de

réalité, il paraissait raisonnable de comparer les champs électromagnétiques aux champs de déformation élastique ou de tension, et les ondes lumineuses de la théorie de Maxwell aux ondes sonores dans les corps élastiques. Nombre de physiciens crurent donc que les équations de Maxwell concernaient pratiquement les déformations d'un milieu élastique qu'ils appelèrent éther, nom qui fut choisi uniquement pour expliquer que ce milieu était si léger et si peu dense qu'il pouvait pénétrer au sein d'autres matières et ne pouvait être ni vu ni perçu. Cette explication n'était cependant pas très satisfaisante, car elle ne pouvait expliquer l'absence complète d'ondes lumineuses longitudinales.

Finalement, la théorie de la relativité, laquelle sera discutée au chapitre suivant, montra d'une façon décisive que le concept d'éther en tant que substance (auquel se référaient les équations de Maxwell) devait être abandonné. Nous ne pouvons discuter ici les raisons qu'on en donna, mais le résultat fut que les champs durent être considérés comme une réalité indépendante.

Un autre résultat encore plus étrange de la théorie de la relativité restreinte, ce fut la découverte de nouvelles propriétés de l'espace et du temps et, en fait, d'une relation entre l'espace et le temps, laquelle avait été insoupçonnée auparavant et qui n'existait pas en mécanique newtonienne.

Impressionnés par cette situation complètement nouvelle, nombre de physiciens en vinrent à la conclusion un peu téméraire qu'on avait finalement démontré que la mécanique newtonienne était fausse. La réalité première, c'était le champ et non le corps, et la structure de l'espace et du temps était correctement décrite par les formules de Lorentz et d'Einstein et non par les axiomes de Newton ; dans de nombreux cas, la mécanique newtonienne était une bonne approximation, mais il fallait maintenant l'améliorer pour donner une description plus rigoureuse de la Nature.

Du point de vue auquel nous sommes finalement parvenus en théorie quantique, une telle thèse paraît une bien mauvaise description de la

situation réelle : elle ignore le fait que la plupart des expériences grâce auxquelles on mesure les champs sont fondées sur la mécanique newtonienne, et que celle-ci ne peut être améliorée : on ne peut que la remplacer par quelque chose d'essentiellement différent !

Le développement de la théorie quantique nous a appris qu'on devrait plutôt décrire les choses de la manière suivante : partout où les concepts de la mécanique newtonienne peuvent être utilisés pour décrire les phénomènes de la Nature, les lois formulées par Newton sont strictement correctes et l'on ne saurait les améliorer. Mais les phénomènes électromagnétiques ne peuvent être décrits de façon adéquate par les concepts de la mécanique newtonienne ; donc, les expériences sur les champs électromagnétiques et sur les ondes lumineuses, ainsi que leur analyse théorique par Maxwell, Lorentz et Einstein, ont conduit à un nouveau système fermé de définitions, d'axiomes et de concepts qui peuvent être représentés par des symboles mathématiques, système cohérent au même sens que le système de mécanique newtonienne, mais qui en diffère essentiellement.

Par conséquent, il fallut abandonner jusqu'aux espoirs qui avaient accompagné les travaux des scientifiques depuis Newton : il apparaissait que le progrès scientifique ne pouvait pas toujours s'obtenir par l'utilisation des lois connues pour expliquer de nouveaux phénomènes. Dans certains cas, de nouveaux phénomènes décelés par l'observation ne pouvaient être compris que grâce à de nouveaux concepts qu'il fallait adapter aux nouveaux phénomènes comme les concepts de Newton l'étaient aux phénomènes mécaniques. Ces nouveaux concepts pouvaient, eux aussi, être interconnectés en un système fermé et être représentés par des symboles mathématiques. Mais si la physique ou, plus généralement, les sciences expérimentales procédaient ainsi, il se posait la question suivante : quelle est la relation entre les différents concepts ? Si les mêmes concepts ou mots apparaissent par exemple dans deux ensembles différents avec une

définition différente de leurs rapports et de leurs représentations mathématiques, en quel sens ces concepts représentent-ils la réalité ?

Ce problème se posa dès la découverte de la relativité restreinte. Les concepts d'espace et de temps appartenaient simultanément à la mécanique newtonienne et à la théorie de la relativité. Or l'espace et le temps étaient indépendants l'un de l'autre en mécanique newtonienne, mais liés dans la théorie de la relativité par la transformation de Lorentz. Dans ce cas spécial, on pouvait montrer que les postulats de la théorie de la relativité tendaient vers ceux de la mécanique newtonienne dans la limite où toutes les vitesses du système sont très petites par rapport à la vitesse de la lumière. On pouvait en déduire que les concepts de la mécanique newtonienne ne pouvaient s'appliquer aux cas où apparaissaient des vitesses comparables à celle de la lumière. On avait donc décelé finalement sur ce point une limitation importante de la mécanique newtonienne, limitation qu'il était impossible de constater à partir de l'ensemble cohérent des concepts ou d'après de simples observations des systèmes mécaniques.

On voit donc que la relation entre deux ensembles cohérents de concepts demande toujours une étude très sérieuse. Avant d'entamer une discussion générale sur la structure d'un ensemble de concepts fermé et cohérent et sur les relations qui peuvent exister entre ensembles de ce genre, nous donnerons une brève description des ensembles de concepts définis jusqu'à présent en physique. On peut en distinguer quatre qui ont déjà atteint leur forme définitive.

Le premier ensemble – la mécanique newtonienne – a déjà été discuté. Il convient à la description de tous les systèmes mécaniques, à celle du mouvement des fluides et aux vibrations élastiques des corps ; il comprend l'acoustique, la statique et l'aérodynamique.

Le deuxième ensemble fermé de concepts fut formé au cours du XIX^e siècle, avec la thermodynamique. Quoiqu'on ait pu finalement relier celle-ci à la mécanique grâce au développement de la mécanique statistique,

ce serait manquer de réalisme que de la considérer comme faisant partie de la mécanique. En effet, la théorie phénoménologique de la thermodynamique utilise un certain nombre de concepts qui n'ont pas de contrepartie dans d'autres branches de la physique, comme la chaleur, la chaleur spécifique, l'entropie, l'énergie libre, etc. Si l'on passe de cette description phénoménologique à une interprétation statistique en considérant la chaleur comme de l'énergie distribuée statistiquement entre les très nombreux degrés de liberté dus à la structure atomique de la matière, alors la thermodynamique n'est pas plus liée à la mécanique qu'à l'électrodynamique ou à d'autres parties de la physique. Le concept central de cette interprétation est le concept de probabilité, en liaison étroite avec le concept d'entropie en théorie phénoménologique. Outre ce concept, la thermodynamique statistique nécessite le concept d'énergie. Mais tout ensemble cohérent d'axiomes et de concepts de physique contiendra nécessairement les concepts d'énergie, de quantité de mouvement, de moment angulaire, ainsi que la loi qui veut que ces quantités se conservent sous certaines conditions. Cela s'ensuit si l'on veut que l'ensemble cohérent décrive certaines caractéristiques de la Nature qui sont correctes à tout instant et partout, donc en d'autres termes les caractéristiques qui ne dépendent ni de l'espace ni du temps, c'est-à-dire qui sont invariantes (comme les appellent les mathématiciens) en cas de translation arbitraire dans l'espace et le temps, de rotation dans l'espace et de transformation de Galilée ou de Lorentz. Par conséquent, la thermodynamique peut se combiner avec n'importe lequel des autres systèmes fermés de concepts.

Le troisième système fermé de concepts et d'axiomes a son origine dans les phénomènes d'électricité et de magnétisme et a pris sa forme définitive au cours de la première décennie du ^{xx}e siècle grâce aux travaux de Lorentz, d'Einstein et de Minkowski. Ce système comprend l'électrodynamique, la relativité restreinte, l'optique, le magnétisme, et l'on peut y inclure la théorie de L. de Broglie sur les ondes corpusculaires pour

toutes les sortes de particules élémentaires, mais non la théorie ondulatoire de Schrödinger.

Enfin, le quatrième système cohérent se compose essentiellement de la théorie quantique telle qu'elle a été décrite dans les deux premiers chapitres. Son concept central est la fonction de probabilité, ou la « matrice statistique » comme l'appellent les mathématiciens. Il comprend la mécanique quantique et ondulatoire, la théorie des spectres atomiques, la chimie et la théorie des autres propriétés de la matière, comme la conductibilité électrique, le ferromagnétisme, etc.

Les relations entre ces quatre ensembles de concepts peuvent s'indiquer de la façon suivante : le premier ensemble est compris dans le troisième (en tant que cas limite lorsque la vitesse de la lumière peut être considérée comme infiniment grande) ; il est compris dans le quatrième (en tant que cas limite lorsque la constante de Planck peut être considérée comme infiniment petite). Le premier ensemble et en partie le troisième appartiennent au quatrième, comme *a priori* pour la description des phénomènes. Le deuxième ensemble peut être relié avec un quelconque des trois autres sans difficulté et tire surtout son importance de sa liaison avec le quatrième. L'existence indépendante du troisième et du quatrième ensemble suggère l'existence d'un cinquième ensemble, dont les ensembles 1, 2, 3, 4 seraient des cas limites. Ce cinquième ensemble sera probablement découvert un jour, en connexion avec la théorie des particules élémentaires.

Nous avons omis de cette énumération l'ensemble de concepts lié à la théorie de la relativité généralisée, car cet ensemble n'a peut-être pas encore atteint sa forme finale. Mais il faut souligner qu'il est nettement différent des quatre autres ensembles.

Après ce bref examen, nous pouvons revenir à la question générale de ce qu'on devrait considérer comme caractéristiques spécifiques d'un système fermé d'axiomes et de définitions. Sa caractéristique peut-être la plus importante est la possibilité de lui trouver une représentation

mathématique cohérente, laquelle doit garantir que le système n'ait pas de contradictions internes. Ensuite, le système doit convenir à la description d'un vaste domaine d'expériences ; la grande variété des phénomènes dans ce domaine doit correspondre au grand nombre de solutions des équations de la représentation mathématique. En général, on ne peut déduire des concepts les limitations de ce domaine ; les concepts ne sont pas nettement définis dans leurs rapports avec la Nature, malgré la nette définition de leurs rapports possibles entre eux. Les limitations se découvriront donc par l'expérience, par le fait que les concepts ne permettront pas une description complète des phénomènes observés.

Après cette brève analyse de la structure de la physique actuelle, nous pouvons discuter du lien entre la physique et les autres branches des sciences de la Nature. C'est la chimie qui est la voisine la plus proche de la physique ; en fait, grâce à la mécanique quantique, ces deux sciences en sont venues à une fusion complète. Mais il y a une centaine d'années, elles étaient profondément séparées, leurs méthodes de recherche étaient tout à fait différentes et les concepts de chimie n'avaient à cette époque aucun équivalent en physique ; des concepts comme la valence, l'activité, la solubilité et la volatilité avaient un caractère plus qualitatif et la chimie appartenait à peine aux sciences exactes. Une fois la thermodynamique développée au milieu du siècle dernier, les scientifiques commencèrent à l'appliquer aux processus chimiques et, depuis ce moment-là, les travaux scientifiques dans ce domaine furent déterminés par l'espoir de réduire les lois de la chimie à la mécanique des atomes. Il faudrait cependant souligner que cela fut impossible dans le cadre de la mécanique newtonienne. Pour donner une description quantitative des lois de la chimie, il fallait formuler un système de concepts beaucoup plus large que la physique atomique. C'est ce qui fut finalement réalisé en mécanique quantique, celle-ci ayant ses racines dans la chimie tout autant que dans la physique atomique. Il fut alors facile de voir que les lois de la chimie ne pouvaient être réduites à la

mécanique newtonienne des particules atomiques, car les éléments chimiques montraient dans leur comportement un degré de stabilité qui manque totalement dans les systèmes mécaniques. Mais ce ne fut qu'avec la théorie de l'atome énoncée par Bohr en 1913 que ce point fut clairement compris. En définitive, on peut dire que les concepts de chimie sont en partie complémentaires des concepts mécaniques. Lorsque nous savons qu'un atome est dans son état stationnaire à plus faible énergie (qui détermine ses propriétés chimiques), nous ne pouvons parler en même temps du mouvement des électrons dans l'atome.

On peut dire que le rapport actuel entre la biologie, d'une part, et la physique et la chimie, d'autre part, ressemble beaucoup à celui qui existait entre la chimie et la physique il y a cent ans. Les méthodes en biologie sont différentes de celles de la physique et de la chimie et les concepts biologiques typiques sont d'un caractère plus qualitatif que ceux des sciences exactes. Des concepts comme la vie, l'organe, la cellule, la fonction d'un organe, la perception, n'ont pas d'analogue en physique ou en chimie. D'autre part, la plupart des progrès accomplis en biologie durant les cent dernières années ont été obtenus par la physico-chimie appliquée aux organismes vivants ; et toute la tendance de la biologie à notre époque est d'expliquer les phénomènes biologiques sur la base des lois physiques et chimiques connues. Là encore, la question se pose de savoir si cet espoir est justifié ou non.

Exactement comme dans le cas de la chimie, on voit par la simple expérience biologique que les organismes vivants montrent un degré de stabilité que des structures généralement compliquées, consistant en une grande variété de types de molécules, ne pourraient certes pas avoir uniquement sur la base des lois physiques et chimiques. De ce fait, il faut ajouter quelque chose à ces lois avant de pouvoir comprendre complètement les phénomènes biologiques.

Deux thèses nettement différentes ont été fréquemment discutées à ce sujet dans la littérature biologique. L'une d'entre elles se réfère à la théorie darwinienne d'évolution dans ses rapports avec la génétique moderne. D'après cette théorie, le seul concept qu'il faille ajouter aux concepts physico-chimiques pour comprendre la vie, c'est le concept historique. L'immense laps de temps – environ quatre milliards d'années – qui s'est écoulé depuis la formation de la Terre a donné à la Nature la possibilité d'essayer une variété presque illimitée de structures de groupes de molécules. Parmi ces structures, il s'en est finalement trouvé certaines qui pouvaient se reproduire en puisant dans la matière environnante des groupes plus petits de molécules, de sorte que ces structures purent se multiplier en grand nombre. Des changements accidentels de structure en fournirent un nombre encore plus grand. Diverses d'entre elles eurent à entrer en concurrence pour les matériaux tirés du milieu environnant et c'est ainsi que, par la « survivance du plus apte », se produisit finalement l'évolution des organismes vivants. Il ne peut y avoir de doute que cette théorie contient une très grande part de vérité et de nombreux biologistes proclament qu'ajouter les concepts historiques et d'évolution à l'ensemble des concepts physico-chimiques suffira amplement à rendre compte de tous les phénomènes biologiques. Un des arguments fréquemment utilisés en faveur de cette théorie souligne qu'on a toujours trouvé correctes les lois physico-chimiques partout où on les a vérifiées dans les organismes vivants ; il semble qu'il n'y ait nettement aucun « trou » par lequel introduire une « force vitale » différente des forces physiques.

D'autre part, c'est justement cet argument qui a perdu beaucoup de son poids à la suite de la théorie quantique. Puisque les concepts de physique et de chimie forment un ensemble cohérent fermé, la mécanique quantique, il est nécessaire que partout où ces concepts peuvent être employés pour décrire des phénomènes, les lois liées à ces concepts soient également valables. Par conséquent, quand on traite des organismes vivants comme

étant des systèmes physico-chimiques, il est nécessaire qu'ils se comportent comme tels. La seule question qui puisse nous apprendre quelque chose sur la justesse de cette première thèse, c'est de savoir si les concepts physico-chimiques permettent une description *complète* des organismes vivants. Ceux des biologistes qui répondent à cette question par la négative ont généralement le deuxième point de vue, celui que nous allons exposer maintenant.

Nous pouvons peut-être l'exprimer de la façon suivante : il est très difficile de voir comment des concepts comme la perception, la fonction d'un organe, l'affection pourraient faire partie d'un ensemble cohérent de concepts de mécanique quantique combinés avec le concept historique. D'autre part, ces concepts sont nécessaires à une description complète de la vie, même si, pour le moment, nous en excluons l'humanité comme présentant de nouveaux problèmes qui dépassent la biologie. Donc, il faudra probablement aller au-delà de la mécanique quantique pour comprendre la vie et construire un nouvel ensemble de concepts, ensemble auquel la physique et la chimie pourraient appartenir comme cas « limite ». L'histoire peut en représenter une partie essentielle et des concepts comme la perception, l'adaptation, l'affection, y appartiendront également. Si ce point de vue est correct, la combinaison de la théorie darwinienne avec la physique et la chimie ne suffirait pas à expliquer la vie organique ; mais il serait quand même vrai que des organismes vivants peuvent à un large degré être considérés comme des systèmes physico-chimiques – comme des machines, ainsi que le disaient Descartes et Laplace – et, si on les traitait comme tels, réagir aussi comme tels. On pourrait en même temps supposer, comme l'a suggéré Bohr, que notre connaissance d'une cellule vivante puisse être complémentaire de sa structure moléculaire. Étant donné qu'une connaissance complète de cette structure ne pourrait être obtenue que par des opérations qui détruisent la vie de la cellule, il est logiquement possible que la vie empêche la détermination complète de la structure physico-

chimique sous-jacente. Même si l'on adoptait ce second point de vue, on ne préconiserait probablement pas pour la recherche biologique d'autre méthode que celle suivie durant les décennies passées : tenter d'expliquer autant qu'on le peut, en prenant pour base les lois physico-chimiques connues, et décrire le comportement des organismes vivants avec précision et sans parti pris théorique.

Les biologistes actuels sont en majorité pour le premier point de vue, mais l'expérience dont on dispose à l'heure présente n'est certes pas suffisante pour trancher entre ces thèses. La préférence accordée à la première par de nombreux biologistes pourrait être due, là encore, au partage cartésien, lequel a si profondément imprégné l'esprit humain durant les siècles passés. Puisque la *res cogitans* était restreinte aux hommes, au « Moi », les animaux ne pouvaient avoir d'âme, ils appartenaient exclusivement à la *res extensa*. Donc, raisonnait-on, les animaux peuvent se comprendre en utilisant les mêmes termes que pour la matière en général et les lois physico-chimiques, jointes au concept historique, devaient suffire à expliquer leur comportement. Ce n'est que quand la *res cogitans* entre en jeu qu'il se crée une nouvelle situation qui demande des concepts entièrement nouveaux. Mais le partage cartésien est une simplification dangereuse et il est donc parfaitement possible que ce soit la deuxième thèse qui soit correcte.

Mettant entièrement à part cette question qui ne peut être réglée à l'heure actuelle, nous sommes visiblement encore très loin d'un ensemble fermé et cohérent de concepts permettant de décrire les phénomènes biologiques. Le degré de complexité en biologie est si décourageant qu'on ne saurait à l'heure actuelle imaginer un seul ensemble de concepts dans lequel les rapports puissent être définis de façon assez nette pour qu'une représentation mathématique devienne possible.

Si nous allons au-delà de la biologie et faisons entrer la psychologie dans la discussion, il ne peut guère subsister de doute que les concepts de

physico-chimie ajoutés à l'évolution ne suffiront pas à décrire les faits. Sur ce point, l'existence de la théorie quantique a changé notre attitude vis-à-vis de ce qu'on croyait au XIX^e siècle : durant cette période, certains scientifiques avaient tendance à penser que les phénomènes psychiques pourraient finalement s'expliquer sur la base de la physico-chimie du cerveau. Au point de vue quantique, une telle hypothèse n'a pas de raison d'être ; en dépit du fait que les phénomènes physiques se produisant dans le cerveau appartiennent aux phénomènes psychiques, nous ne nous attendrions pas à ce qu'ils puissent suffire à les expliquer. Nous ne mettrions jamais en doute que le cerveau agisse en tant que mécanisme physico-chimique s'il est traité comme tel ; mais pour comprendre les phénomènes psychiques, nous partirions du fait que l'esprit humain participe et comme objet et comme sujet au processus scientifique de la psychologie.

Si nous passons en revue les différents ensembles de concepts qu'on a formés dans le passé ou qu'on pourra former dans l'avenir afin de tenter de voir clairement le Monde à l'aide de la science, nous voyons qu'ils semblent s'ordonner d'après le rôle croissant que joue l'élément subjectif dans un ensemble. La physique classique peut être considérée comme une idéalisation dans laquelle nous parlons du Monde comme étant entièrement séparé de nous. Les trois premiers ensembles correspondent à cette idéalisation ; seul le premier ensemble satisfait entièrement à l'*a priori* de la philosophie kantienne. Dans le quatrième ensemble (celui de la théorie quantique), l'homme, en tant que sujet de la science, est introduit grâce aux questions posées à la Nature dans les termes *a priori* de la science humaine ; la théorie quantique ne permet pas une description complètement objective de la Nature. Pour une compréhension complète de la biologie, il est possible qu'il soit important que la question soit justement posée par l'espèce humaine, laquelle appartient elle-même à l'espèce des organismes vivants ; en d'autres termes, que nous sachions ce qu'est la vie avant même

de l'avoir définie scientifiquement. Mais nous ne devrions peut-être pas spéculer sur la structure possible d'un ensemble composé de concepts qui n'ont pas encore été formés.

Quand on compare cet ordre avec les classifications plus anciennes appartenant aux stades précédents des sciences expérimentales, on voit qu'on a maintenant divisé le Monde non en différents groupes d'objets, mais en différents groupes de rapports. À une époque antérieure de la science, on distinguait par exemple comme groupes différents les minéraux, les plantes, les animaux et les hommes. Ces objets étaient pris (selon leurs groupes) comme étant de nature différente, faits de matériaux différents et déterminés dans leur comportement par des forces différentes. Or nous savons maintenant qu'il s'agit toujours de la même matière, des mêmes divers composés chimiques qui peuvent appartenir à n'importe quel objet, à des minéraux comme à des animaux ou à des plantes ; et nous savons aussi que les forces qui agissent entre les différentes parties de la matière sont en définitive les mêmes pour tous les genres d'objets. Ce qu'on peut distinguer, c'est quel est le genre de lien qui a une importance primordiale pour un certain phénomène : par exemple, quand nous parlons de l'action des forces chimiques, nous entendons par là un genre de lien plus complexe – ou en tout cas différent – de celui qui joue en mécanique newtonienne. Le Monde nous apparaît ainsi comme un tissu complexe de phénomènes, dans lequel les liens de différents genres alternent ou se chevauchent ou se combinent et déterminent ainsi la texture du tout.

Quand nous représentons un groupe de liens par un ensemble fermé cohérent de concepts, d'axiomes, de définitions et de lois – ensemble qui, à son tour, est représenté par un formalisme mathématique – nous avons en fait isolé et idéalisé ce groupe de liens dans un but de clarification. Mais même si nous avons ainsi obtenu la complète clarification, nous ne savons pas avec quelle exactitude l'ensemble de liens décrit la réalité.

On peut donner à ces idéalizations le titre de parties du langage humain, formées par l'interaction entre le Monde et nous, par la réaction humaine au puzzle de la Nature. En ce sens, on peut les comparer aux différents styles d'art, par exemple d'architecture ou de musique. Un style d'art peut également se définir par un ensemble de règles formelles qui s'appliquent à la matière de cet art précis ; ces règles ne peuvent peut-être pas se représenter au sens strict par un ensemble de concepts et d'équations mathématiques, mais leurs éléments fondamentaux sont liés de façon très étroite aux éléments essentiels des mathématiques : égalité et inégalité, répétition et symétrie, certaines structures de groupes jouent ce rôle fondamental en art comme en mathématiques. Il faut en général le travail de plusieurs générations pour élaborer ce style formel qu'on appelle plus tard style artistique et pour passer du simple début jusqu'à la richesse de formes élaborées qui caractérisent son épanouissement. L'intérêt de l'artiste est concentré sur ce processus de cristallisation où la matière de l'art prend, grâce à son œuvre, les formes variées engendrées par les premiers concepts formels de ce style ; une fois le style formé, l'intérêt diminue forcément, car le mot « intérêt » signifie être avec quelque chose, prendre part à un processus de vie ; or ce processus en est alors arrivé à sa fin. Là encore, on ne peut décider à partir de règles formelles la question de savoir jusqu'à quel point les règles formelles du style représentent cette réalité de la vie qui est signifiée par l'art. Celui-ci est toujours une idéalisation ; l'idéal est différent de la réalité – ou du moins de la réalité des ombres, nous aurait dit Platon – mais l'idéalisation est nécessaire à la compréhension.

Cette comparaison des différents ensembles de concepts des sciences de la Nature avec les différents styles d'art peut sembler fort éloignée de la vérité pour ceux qui considèrent les styles successifs d'art comme des produits assez arbitraires de l'esprit humain ; ils nous diraient qu'en sciences de la Nature ces différents ensembles de concepts représentent une réalité objective, qu'ils nous ont été dictés par la Nature, qu'ils ne sont donc

en rien arbitraires et qu'ils sont une conséquence nécessaire de nos connaissances expérimentales sur la Nature, connaissances qui vont en s'accumulant. Sur ce point, la plupart des scientifiques seraient d'accord. Mais les différents styles d'art sont-ils un produit arbitraire de l'esprit humain ? Là encore, il ne faut pas nous laisser fourvoyer par le partage cartésien : les styles naissent de l'interaction entre le Monde et nous, ou plus précisément entre l'esprit du temps et l'artiste ; l'esprit du temps est probablement un fait aussi objectif que n'importe quel fait des sciences de la Nature, et cet esprit dégage certaines caractéristiques du Monde qui sont indépendantes du temps et sont donc en ce sens éternelles. L'artiste, par son travail, essaie de rendre ces caractéristiques compréhensibles et, au cours de cette tentative, il est conduit aux formes du style dans lequel il travaille.

Par conséquent, les deux processus, celui de la science et celui de l'art, ne sont pas très différents. Science et art forment à eux deux, au cours des siècles, un langage humain avec lequel nous pouvons parler des parties les plus dissimulées de la réalité ; et les ensembles cohérents de concepts, comme les différents styles d'art, sont des mots ou groupes de mots de ce langage.

7.

Théorie de la relativité

En physique moderne, la théorie de la relativité a joué un rôle très important ; c'est par cette théorie qu'a été reconnue pour la première fois la nécessité d'un changement des principes fondamentaux de la physique. C'est pourquoi une discussion des problèmes soulevés et en partie résolus par cette théorie est un élément essentiel de notre étude de la portée philosophique de la physique moderne. À la différence de ce qui s'est passé pour la théorie quantique, on peut dire en un certain sens que l'évolution de la théorie de la relativité, entre le moment où l'on a pris pleinement conscience des difficultés et l'heure de leur solution, n'a demandé que fort peu de temps. Quand Morley et Miller ont repris en 1904 les expériences de Michelson, on a eu pour la première fois la preuve nette qu'il était impossible de déceler le mouvement de translation de la Terre par des méthodes optiques ; or l'article décisif d'Einstein a paru moins de deux ans plus tard. Mais ces expériences de Morley et Miller et l'article d'Einstein n'ont été que les étapes finales d'une évolution qui avait commencé bien avant et qu'on pourrait intituler « Électrodynamique des corps en mouvement ».

Cette électrodynamique a évidemment été un domaine important de la physique et de la technologie à partir du moment où l'on a construit des

moteurs électriques. Mais une difficulté s'était présentée à ce sujet par suite de la découverte par Maxwell de la nature électromagnétique des ondes lumineuses. Ces ondes diffèrent des autres ondes (par exemple des ondes sonores) par une propriété essentielle : elles peuvent se propager à travers ce qui semble être le vide. Quand une cloche sonne dans un récipient où l'on a fait le vide, le son ne parvient pas à l'extérieur ; mais la lumière pénètre sans difficulté à travers ce vide. On supposait donc que les ondes lumineuses pouvaient être considérées comme ondes élastiques d'une substance très légère à laquelle on donnait le nom d'éther, substance invisible et impalpable qui remplissait le récipient sous vide ainsi que l'espace où se trouvaient d'autres matières comme l'air ou le verre. L'idée que les ondes électromagnétiques pouvaient être une réalité en elles-mêmes, indépendantes de toute substance, ne vint pas aux physiciens de cette époque. Puisque pour eux la substance hypothétique éther semblait pénétrer à travers toutes les autres matières, ils se demandaient ce qui se passait quand cette matière était mise en mouvement. L'éther participait-il à ce mouvement ? et dans ce cas, comment une onde lumineuse se propageait-elle dans l'éther en déplacement ?

Les expériences portant sur cette question sont difficiles, car les vitesses des corps sont généralement très petites par rapport à la vitesse de la lumière. Par conséquent, le mouvement de ces corps ne pouvait produire que de très petits effets, proportionnels au rapport de la vitesse du corps à la vitesse de la lumière ou même à une puissance plus élevée de ce rapport. Plusieurs expériences par Wilson, Rowland, Röntgen, Eichenwald et Fizeau permirent de mesurer ces effets avec une précision correspondant à la première puissance de ce rapport. La théorie des électrons, mise au point par Lorentz en 1895, put expliquer ces effets de façon tout à fait satisfaisante. C'est alors que l'expérience de Michelson, reprise par Morley et Miller, créa une situation nouvelle.

Discutons en détail cette expérience. Pour obtenir des effets plus importants, donc des résultats plus précis, il semblait préférable de faire les expériences avec des corps ayant une vitesse très élevée. Or la Terre tourne autour du Soleil à une vitesse d'environ trente kilomètres par seconde. Si l'éther était immobile par rapport au Soleil et ne se déplaçait pas avec la Terre, ce mouvement rapide de l'éther par rapport à la Terre devait se manifester par un changement de la vitesse de la lumière, et cette vitesse devait être différente selon que la lumière se propage parallèlement ou perpendiculairement à la direction dans laquelle se déplace l'éther. Et même si l'éther suivait en partie le mouvement de la Terre, il devait y avoir un certain effet dû à ce qu'on pourrait appeler le vent de l'éther ; et, dans ce cas, l'effet dépendrait probablement de l'altitude à laquelle se ferait l'expérience. Un calcul de l'effet auquel on pouvait s'attendre montrait qu'il serait très petit, puisque proportionnel au carré du rapport de la vitesse de la Terre à celle de la lumière ; il fallait donc faire des mesures très précises sur l'interférence de deux faisceaux lumineux se déplaçant parallèlement et perpendiculairement au mouvement de la Terre. La première expérience de ce genre, faite par Michelson en 1881, n'avait pas été assez précise ; mais même quand on reprit cette expérience plus tard, on n'obtint pas le moindre signe de l'effet attendu. En particulier, les expériences de Morley et Miller en 1904 purent être considérées comme une preuve définitive qu'un effet de l'ordre de grandeur auquel on s'attendait n'existait pas.

Ce résultat, si étrange qu'il parût, était en concordance avec un autre point discuté par les physiciens quelque temps auparavant. La mécanique newtonienne comporte un certain « principe de relativité », principe qu'on peut décrire comme suit : si le mouvement mécanique des corps satisfait aux lois de la mécanique newtonienne par rapport à un certain système de références, alors cela est également vrai vis-à-vis de tout autre système de références qui se déplace uniformément, sans rotation, par rapport au

premier système. En d'autres termes, un mouvement de translation uniforme d'un système ne produit aucun effet mécanique et ne peut donc être observé à l'aide d'effets de ce genre.

Un tel principe de relativité – semblait-il aux physiciens – ne pouvait être vrai en optique ou en électrodynamique. Si le premier système est au repos vis-à-vis de l'éther, les autres ne le sont pas et, par conséquent, leur mouvement par rapport à l'éther devrait se voir par des effets du type envisagé par Michelson. Le résultat négatif de l'expérience de Morley et Miller en 1904 fit renaître l'idée qu'un tel principe de relativité pourrait être vrai en électrodynamique comme en mécanique newtonienne.

Mais, d'autre part, il existait une ancienne expérience faite par Fizeau en 1851 et qui semblait en nette contradiction avec le principe de relativité : Fizeau avait mesuré la vitesse de la lumière dans un liquide en déplacement. Si le principe de la relativité était correct, la vitesse totale de la lumière dans le liquide en mouvement devait être la somme de la vitesse du liquide et de la vitesse de la lumière dans le liquide. Mais ce n'était pas le cas : l'expérience de Fizeau montrait que la vitesse totale était légèrement plus petite.

Cependant, les résultats négatifs de toutes les expériences récentes cherchant à mettre en évidence le mouvement « par rapport à l'éther » poussèrent les physiciens théoriciens et les mathématiciens de l'époque à chercher des interprétations mathématiques conciliant équation ondulatoire de propagation de la lumière et principe de la relativité. Lorentz suggéra en 1904 une transformation mathématique qui satisfît à ces conditions : il dut pour cela introduire l'hypothèse que les corps en mouvement se contractent dans la direction du mouvement par un facteur qui dépend de la vitesse du corps ; et, d'autre part, que dans les différents systèmes de référence il existe différents temps « apparents », lesquels prennent à de nombreux points de vue la place du temps « réel ». De cette manière, il parvenait à représenter quelque chose qui ressemblait au principe de relativité : la

vitesse « apparente » de la lumière était la même dans chaque système de référence. Des idées semblables avaient été discutées par Poincaré, FitzGerald et d'autres physiciens.

Mais le pas décisif fut franchi par l'article d'Einstein en 1905 fixant le temps « apparent » de la transformation de Lorentz comme étant le temps « réel » et abolissant ce qui avait été appelé temps « réel » par Lorentz. C'était un changement apporté aux bases mêmes de la physique, changement inattendu et très radical et pour lequel il fallait tout le courage d'un jeune génie révolutionnaire. Ce pas ne demandait pas autre chose que l'application cohérente de la transformation de Lorentz dans la représentation mathématique de la Nature ; mais cette nouvelle interprétation transformait la structure de l'espace et du temps, et de nombreux problèmes de physique apparurent sous un jour nouveau. Par exemple, la substance éther pouvait être rejetée, elle aussi : étant donné que tous les systèmes de référence qui subissent un mouvement de translation uniforme les uns par rapport aux autres sont équivalents pour décrire ce qui se passe dans la Nature, le postulat selon lequel il existait une substance, l'éther, immobile par rapport à un seul de ces systèmes, n'avait pas de sens ; en fait, une telle substance n'était pas nécessaire et il était beaucoup plus simple de dire que les ondes lumineuses se propagent dans le vide et que les champs électromagnétiques ont une réalité propre et peuvent exister dans le vide.

Mais le changement décisif portait sur l'espace et le temps. Il est très difficile de décrire ces changements dans le langage ordinaire sans utiliser le langage mathématique, car les mots habituels « espace » et « temps » se réfèrent à une structure de l'espace et du temps qui est effectivement une idéalisation, une simplification exagérée de la structure réelle. Mais il nous faut quand même tenter de décrire cette nouvelle structure, ce que nous pouvons peut-être faire de la manière suivante :

Quand nous utilisons le terme « passé », nous y faisons figurer tous les événements que nous pouvons connaître (du moins en principe) et dont nous avons pu entendre parler (en principe). De même, nous faisons figurer dans le terme « futur » tous les événements sur lesquels nous pouvons influencer (en principe) ou que nous pourrions essayer de changer ou d'empêcher (en principe). Il n'est pas facile à un non-physicien de voir pourquoi cette définition des termes « passé » et « futur » devrait être la plus adéquate. Mais l'on peut aisément voir qu'elle correspond très précisément à notre emploi habituel de ces termes. Si nous les utilisons ainsi, on voit par le résultat de nombreuses expériences que le contenu du « passé » et du « futur » ne dépend pas de l'état de mouvement de l'observateur ou d'autres caractéristiques de celui-ci. Nous pouvons dire que la définition est invariante par rapport au mouvement de l'observateur. Cela est vrai en mécanique newtonienne comme dans la théorie de la relativité d'Einstein.

Mais la différence est la suivante : en théorie classique, nous supposons que le futur et le passé sont séparés par un intervalle de temps *infinitement court* que nous pouvons appeler le présent. En théorie de la relativité, nous avons appris qu'il en est autrement : le futur et le passé sont séparés par un intervalle de temps qui existe et dont la durée dépend de la distance entre le phénomène observé et l'observateur. Une action ne peut se propager qu'à une vitesse inférieure ou égale à la vitesse de la lumière. Par conséquent, un observateur, à un instant donné, peut se trouver dans l'impossibilité de connaître ou d'influencer un phénomène se produisant en un point éloigné, et cela pendant le laps de temps qui sépare deux instants bien spécifiques : l'un est l'instant où un signal lumineux doit être émis au lieu de l'événement pour atteindre l'observateur au moment de l'observation ; l'autre est l'instant où un signal lumineux, émis par l'observateur à l'instant de l'observation, atteint le lieu de l'événement. Tout l'intervalle fini de temps entre ces deux instants peut être dit appartenir au « temps présent »

pour l'observateur, pendant l'observation. Tout événement ayant lieu entre ces deux temps spécifiques peut être appelé « simultané » de l'acte d'observer.

L'emploi de « peut être appelé » signale une ambiguïté sur le mot « simultané » due au fait que ce terme a été formé par l'expérience de la vie quotidienne, dans laquelle la vitesse de la lumière peut être considérée comme infiniment élevée. En fait, ce temps peut aussi être défini en physique d'une façon légèrement différente et Einstein a utilisé dans son article cette seconde définition. Quand deux événements se produisent simultanément en un même point de l'espace, nous disons qu'ils coïncident ; ce terme est totalement dépourvu d'ambiguïté. Imaginons maintenant trois points dans l'espace en ligne droite, de sorte que le point du milieu est à égale distance des deux points extrêmes. Si deux événements se passent aux deux points extrêmes à des instants tels que les signaux lumineux partant des événements coïncident quand ils atteignent le point du milieu, nous pouvons définir ces deux événements comme simultanés ; cette définition est plus étroite que la première. Une de ses conséquences les plus importantes est que, quand deux événements sont simultanés pour un observateur, ils peuvent ne pas l'être pour un autre si celui-ci se déplace par rapport au premier. Le lien entre ces deux définitions peut être donné en disant que, chaque fois que deux événements sont simultanés dans le premier sens du terme, on peut toujours trouver un système de référence dans lequel ils sont simultanés au second sens aussi.

La première définition du terme « simultané » semble correspondre de plus près à son emploi habituel, étant donné que la question de savoir si deux événements sont simultanés ne dépend pas du système de référence dans la vie quotidienne. Mais dans les deux définitions relativistes, le terme a acquis une précision qui manque au langage de la vie quotidienne. En théorie quantique, les physiciens ont été assez rapidement contraints d'apprendre que les termes employés en physique classique ne décrivaient

la Nature qu'avec imprécision, que leur applicabilité était limitée par les lois quantiques et qu'il fallait donc être prudent dans leur emploi. En théorie de la relativité, les physiciens ont essayé de changer la signification des mots de physique classique et de rendre ces mots plus précis, de manière qu'ils s'adaptent au nouvel état de choses.

La structure de temps et d'espace ainsi mise à jour par la théorie de la relativité a de nombreuses conséquences dans différentes parties de la physique : l'électrodynamique des corps en mouvement peut être déduite directement du principe de relativité ; ce principe lui-même peut être formulé comme loi tout à fait générale de la Nature, non seulement pour l'électrodynamique ou la mécanique, mais pour n'importe quel groupe de lois : les lois prennent la même forme dans tous les systèmes de référence qui ne diffèrent que par un mouvement de translation uniforme ; elles sont invariantes par rapport à la transformation de Lorentz.

Parmi les conséquences du principe de relativité, la plus importante peut-être est l'inertie de l'énergie, ou l'équivalence de la masse et de l'énergie. Puisque la vitesse de la lumière est la vitesse limite qui ne saurait jamais être atteinte par un corps matériel, on voit aisément qu'il est plus difficile d'accélérer un corps qui se déplace déjà très rapidement qu'un corps qui se trouve au repos ; l'inertie a augmenté avec l'énergie cinétique. Mais d'une façon tout à fait générale, d'après la théorie de la relativité, tout genre d'énergie contribuera à l'inertie, c'est-à-dire à la masse ; et la masse appartenant à une quantité donnée d'énergie est exactement cette énergie divisée par le carré de la vitesse de la lumière. Par conséquent, toute énergie comporte une masse ; mais une énergie même considérable ne comporte qu'une très petite masse, et c'est la raison pour laquelle le lien entre masse et énergie n'avait pas été observé plus tôt. Les deux lois – celle sur la conservation de la masse et celle sur la conservation de l'énergie – perdent leur validité séparée et se combinent en une seule loi qu'on peut intituler loi de conservation de l'énergie ou de la masse. Il y a cinquante ans, quand fut

formulée la théorie de la relativité, cette hypothèse de l'équivalence de la masse et de l'énergie semblait une complète révolution en physique, appuyée sur fort peu de preuves expérimentales. Maintenant, nous voyons par de nombreuses expériences comment des particules élémentaires peuvent se créer à partir d'énergie cinétique et comment elles peuvent disparaître en formant du rayonnement ; la transmutation d'énergie en masse et vice versa ne nous semble donc en rien anormale. L'énorme libération d'énergie au cours d'une explosion atomique est une nouvelle preuve encore plus spectaculaire de la justesse de l'équation d'Einstein. Mais nous pouvons ajouter ici une remarque historique critique.

On a parfois déclaré que les immenses énergies des explosions atomiques étaient dues à une transmutation directe de la masse en énergie et que ce n'était que sur la base de la théorie d'Einstein qu'on avait pu prévoir ces énergies, mais cela est erroné. L'immense quantité d'énergie disponible dans le noyau était connue depuis les expériences de Becquerel, Curie et Rutherford sur la désintégration radioactive. Tout corps se désintégrant comme le radium produit une quantité de chaleur environ un million de fois plus élevée que la chaleur que libère la même quantité de matière dans un processus chimique. Dans la fission de l'uranium, la source d'énergie est exactement la même que celle de la désintégration α du radium, à savoir principalement la répulsion électrostatique des deux fragments en lesquels se sépare le noyau. De ce fait, l'énergie d'une explosion atomique provient directement de cette source et non d'une transmutation de la masse en énergie. Le nombre de particules élémentaires qui ont une masse au repos finie ne diminue pas durant l'explosion. Mais il est vrai que les énergies de liaison des particules d'un noyau se révèlent par leurs masses ; et la libération d'énergie est donc également liée de cette manière indirecte aux changements des masses des noyaux. L'équivalence de la masse et de l'énergie – outre sa grande importance en physique – a également soulevé des problèmes concernant de très anciennes questions philosophiques. La

thèse de plusieurs systèmes philosophiques du passé était que la substance ou matière ne pouvait être détruite. Mais en physique moderne, de nombreuses expériences ont montré que des particules élémentaires, par exemple des positons et des électrons, pouvaient disparaître et se transmuter en rayonnement. Cela signifie-t-il que l'expérience moderne a prouvé que les vieux systèmes philosophiques étaient faux et que les arguments avancés par les précédents systèmes étaient trompeurs ?

Ce serait certes là une conclusion hâtive et injustifiée, car on ne peut identifier les termes « substance » et « matière » de la philosophie ancienne ou médiévale avec le mot « masse » de la physique moderne. Si nous voulions exprimer notre expérience actuelle dans le langage des anciennes philosophies, on pourrait considérer que masse *et* énergie sont deux formes différentes de la même « substance », gardant ainsi l'idée que la substance est indestructible.

Mais, d'autre part, on ne peut guère dire que nous gagnons grand-chose à exprimer nos connaissances actuelles dans le langage ancien. Les thèses des philosophies du passé étaient formées à partir de l'ensemble des connaissances dont on disposait à leur époque et à partir des pensées auxquelles avaient conduit ces connaissances. Il serait absurde de s'attendre à ce que les philosophes d'il y a bien des siècles aient prévu le développement de la physique moderne ou la théorie de la relativité. Par conséquent, les concepts auxquels ont été menés les philosophes au cours du processus de clarification intellectuelle d'il y a bien longtemps ne peuvent être adaptés à des phénomènes qu'on ne peut observer que grâce aux instruments perfectionnés de notre époque.

Avant de discuter des conséquences philosophiques de la théorie de la relativité, il nous faut exposer la suite de son évolution.

La substance hypothétique « éther », laquelle avait joué un rôle si important au début des discussions sur les théories de Maxwell au XIX^e siècle, avait donc été rejetée par la théorie de la relativité. On exprime

parfois cela en disant que l'idée d'espace absolu avait été abandonnée, formulation qu'il ne nous faut accepter qu'avec la plus grande prudence. Il est vrai qu'on ne peut indiquer un seul cadre de référence dans lequel la substance éther soit au repos, et auquel on puisse de ce fait attribuer le nom « d'espace absolu ». Mais il serait faux de dire que l'espace a maintenant perdu toutes ses propriétés physiques : les équations du mouvement des corps matériels ou des champs prennent encore, dans un système de référence « normal », une forme différente de celle qu'elles ont dans un système en rotation ou se déplaçant de façon non uniforme par rapport au système « normal » ; l'existence de forces centrifuges dans un système en rotation prouve – pour la relativité de 1905-1906 – l'existence de propriétés physiques de l'espace qui permettent de distinguer entre un système en rotation et un système qui ne l'est pas.

Cela peut sembler peu satisfaisant d'après un point de vue philosophique qui préférerait n'attacher de propriétés physiques qu'à des entités physiques du genre corps matériels ou champs, et non à l'espace lui-même. Mais en ce qui concerne la théorie des processus électromagnétiques ou des mouvements mécaniques, cette existence de propriétés physiques du vide n'est qu'une description de faits indéniables.

Une analyse sérieuse de cette situation a mené environ dix ans plus tard (1916) Einstein à une extension très importante de la théorie de la relativité, extension à laquelle on donne en général le nom de théorie de relativité « généralisée ». Avant d'entamer l'exposé des principales idées de cette nouvelle théorie, il serait peut-être utile de dire quelques mots sur le degré de certitude que nous pouvons attribuer à l'exactitude de ces deux parties de la relativité. La théorie de relativité restreinte de 1905-1906 se fonde sur un très grand nombre de faits bien établis : les expériences de Michelson et Morley et beaucoup d'autres analogues, l'équivalence de la masse et de l'énergie observée dans d'innombrables processus radioactifs, la dépendance de la vie des corps radioactifs de leur vitesse, etc. Donc, cette

théorie appartient aux bases solides de la physique moderne et l'on ne peut la mettre en doute dans l'état actuel.

Pour la théorie de relativité généralisée, les preuves expérimentales sont beaucoup moins convaincantes, car le matériel expérimental est bien plus pauvre. Seules quelques observations astronomiques permettent de vérifier la justesse des hypothèses¹. Cette théorie est donc plus hypothétique que la première.

La pierre angulaire de la relativité généralisée est le lien entre inertie et gravité. Des mesures très sérieuses ont montré que la masse d'un corps, en tant que source de gravité, est exactement proportionnelle à sa masse en tant que mesure de l'inertie du corps ; les mesures les plus précises n'ont jamais montré le moindre écart à cette loi. Or si la loi est vraie en général, les forces de gravitation peuvent être mises sur le même plan que les forces centrifuges ou que les autres forces qui se manifestent en réaction à l'inertie. Étant donné qu'il fallait considérer les forces centrifuges comme dues aux propriétés physiques de l'espace (ainsi que nous l'avons déjà exposé), Einstein adopta l'hypothèse que les forces de gravitation étaient, elles aussi, dues aux propriétés de l'espace. Il s'agissait là d'un pas très important qui entraînait immédiatement un deuxième pas d'égale importance : nous savons que les forces de gravitation sont produites par les masses ; si donc la gravitation est liée aux propriétés de l'espace, alors ces propriétés de l'espace sont forcément causées ou influencées par les masses. Les forces centrifuges dans un système en rotation doivent être produites par la rotation (par rapport au système) de masses qui peuvent être fort lointaines.

Pour appliquer le programme esquissé en ces quelques phrases, Einstein fut obligé de lier les idées physiques sous-jacentes avec le formalisme mathématique de géométrie développé par Riemann. Étant donné que les propriétés de l'espace semblaient changer d'une façon continue avec les champs de gravitation, sa géométrie devait être comparée avec la géométrie

des surfaces courbes où la droite de la géométrie euclidienne doit être remplacée par une géodésique, ligne de plus courte distance, et où la courbure change de façon continue. En définitive, Einstein put donner une formulation mathématique du lien entre la distribution de masse et les paramètres déterminants de la géométrie. Cette théorie représentait les faits ordinaires de la gravitation ; à une très forte approximation près, elle était identique à la théorie classique de gravitation, mais prévoyait en outre quelques effets intéressants qui se trouvaient juste à la limite des mesures possibles. Par exemple, l'action de la gravitation sur la lumière : quand une lumière monochromatique est émise par une étoile à forte masse, les quanta lumineux perdent de l'énergie en s'éloignant à travers le champ de gravitation de cette étoile ; il s'ensuit un déplacement vers le rouge du spectre de raies émis. Jusqu'à présent, on n'a pas encore de preuve expérimentale de ce déplacement vers le rouge, comme l'a clairement montré la discussion des expériences par Freundlich. Mais il serait quand même prématuré de conclure que les expériences contredisent les prédictions de la théorie d'Einstein. Un faisceau de lumière passant près du Soleil devrait être dévié par son champ de gravitation, déviation observée expérimentalement par Freundlich avec l'ordre de grandeur voulu ; mais savoir si la déviation est en accord quantitatif avec la valeur prévue d'après la théorie d'Einstein n'a pas encore été décidé. La meilleure preuve apportée pour la validité de la relativité généralisée paraît être la précession du mouvement orbital de la planète Mercure, qui semble être en très bon accord avec la valeur annoncée par la théorie.

Quoique la base expérimentale de la relativité généralisée soit encore assez maigre, la théorie contient des idées de la plus grande importance. Pendant toute la période qui a séparé les mathématiciens de la Grèce antique et le XIX^e siècle, la géométrie euclidienne était considérée comme évidente et les postulats d'Euclide étaient considérés comme le fondement de toute géométrie mathématique, fondement qu'on ne pouvait contester.

Puis au XIX^e siècle, les mathématiciens Bolyai et Lobatchevski, Gauss et Riemann découvrirent qu'il était possible de concevoir d'autres géométries pouvant être développées avec la même précision mathématique que la géométrie d'Euclide ; de ce fait, la question de savoir laquelle de ces géométries était correcte se montrait n'être qu'une question empirique. Mais ce ne fut que grâce à l'œuvre d'Einstein que la question put réellement être reprise par les physiciens. La géométrie discutée dans la relativité généralisée ne concernait pas que l'espace à trois dimensions, mais aussi l'ensemble vectoriel à quatre dimensions qui ajoute le temps aux trois dimensions d'espace. La théorie établissait un lien entre la géométrie de cet ensemble vectoriel et la distribution des masses dans le Monde. Cette théorie soulevait donc sous une forme entièrement nouvelle les vieilles questions du comportement de l'espace et du temps pour un plus grand nombre de dimensions ; elle pouvait suggérer des réponses possibles, réponses pouvant être vérifiées par l'observation.

On reprit donc de très vieux problèmes philosophiques qui avaient occupé l'esprit humain dans les phases les plus anciennes de la philosophie et de la science. L'espace est-il fini ou infini ? Qu'existait-il avant le début des temps ? Qu'arrivera-t-il à la fin des temps ? Ou bien n'y a-t-il ni début ni fin ? Ces questions avaient reçu des réponses différentes selon les différentes philosophies et religions. Dans la philosophie d'Aristote, par exemple, l'espace total de l'univers était fini (quoique infiniment divisible) ; l'espace était dû au volume des corps, il était lié aux corps, il n'y avait pas d'espace là où il n'y avait pas de corps ; l'univers était constitué par la Terre, le Soleil et les étoiles, donc par un nombre fini de corps. Au-delà de la sphère des étoiles, il n'y avait plus d'espace. Par conséquent, l'espace occupé par l'univers était fini.

Dans la philosophie de Kant, la question appartenait à ce qu'il appelait des « antinomies », questions auxquelles on ne peut répondre, puisque deux raisonnements différents mènent à des résultats opposés. L'espace ne peut

être fini, car nous sommes incapables d'imaginer qu'il y ait une fin à l'espace : quel que soit le point de l'espace atteint, nous pouvons toujours imaginer qu'on puisse le dépasser. Et en même temps, l'espace ne peut être infini, car l'espace est une chose que nous pouvons imaginer (sinon, on n'aurait pas créé le mot « espace ») et nous sommes incapables d'imaginer un espace infini. Pour cette seconde thèse, le raisonnement de Kant n'a pas été reproduit verbalement ; la phrase « l'espace est infini » signifie pour nous quelque chose de négatif : nous sommes incapables d'aller jusqu'à une fin de l'espace. Pour Kant, cela signifiait que l'infinité de l'espace est réellement donnée, qu'elle « existe » en un sens que nous ne pouvons guère reproduire. Le résultat de Kant est qu'une réponse rationnelle à la question de savoir si l'espace est fini ou infini ne peut être donnée, car l'univers entier ne saurait être l'objet de notre expérience.

On constate une situation similaire concernant le problème de l'infinité du temps. Dans les *Confessions* de saint Augustin, par exemple, la question prend la forme suivante : que faisait Dieu avant de créer le monde ? Saint Augustin ne se satisfaisait pas de la boutade : « Dieu était occupé à préparer l'Enfer pour ceux qui posent des questions absurdes. » Cela, dit-il, serait une réponse à trop bon marché et il tente de donner une analyse rationnelle du problème. Ce n'est que pour nous que le temps s'écoule, qu'on l'attend en tant que futur, qu'il s'écoule en tant que présent et qu'on s'en souvient en tant que passé ; mais Dieu n'est pas dans le temps : un millier d'années sont pour lui comme un jour et un jour comme un millier d'années ; le temps a été créé en même temps que le Monde, il appartient au Monde, donc le temps n'a pas existé avant que le Monde existe ; pour Dieu, toute l'évolution de l'univers a été fixée instantanément ; il n'existait pas de temps avant qu'Il crée le Monde. Il est évident que, dans de telles explications, le mot « crée » pose immédiatement toutes les difficultés essentielles : ce mot, tel qu'on l'entend d'ordinaire, signifie que quelque chose est apparu qui n'existait pas auparavant et, dans ce sens, il

présuppose le concept de temps. Par conséquent, il est impossible de définir en termes rationnels ce qu'on peut vouloir dire par la phrase « le temps a été créé ». Ce fait nous rappelle une fois de plus la leçon souvent discutée que nous a apprise la physique moderne : chaque mot, chaque concept, si clair qu'il puisse paraître, n'a qu'une portée limitée d'applicabilité.

Dans la théorie de relativité généralisée, on peut poser ces questions sur l'infinité de l'espace et du temps et en partie y répondre, d'après une base empirique. Si le rapport entre la géométrie à quatre dimensions (espace et temps) et la distribution des masses dans l'univers a été correctement donné par la théorie, alors les observations astronomiques sur la distribution des galaxies dans l'espace nous donnent des renseignements sur la géométrie de l'espace dans son ensemble. On peut du moins construire des « modèles » de cet univers, des images cosmogoniques dont on peut comparer les conséquences avec les faits empiriques.

D'après les connaissances astronomiques actuelles, on ne peut distinguer de façon définitive entre plusieurs modèles possibles. Il se peut que l'espace rempli par l'univers soit fini, cela ne signifiant pas qu'il y ait une extrémité de l'univers quelque part, mais seulement qu'en parcourant l'univers toujours dans la même direction, on reviendrait finalement à son point de départ. La situation serait la même qu'en géométrie à deux dimensions sur la surface de la Terre où, si l'on partait vers l'est, on reviendrait pour finir à son point de départ en provenance de l'ouest.

Par rapport au temps, il semble qu'il y ait eu quelque chose comme un commencement : beaucoup d'observations indiquent une origine de l'univers il y a environ quatre milliards d'années ; tout au moins, ces observations semblent indiquer qu'à cette époque toute la matière de l'univers était concentrée en un espace bien plus petit que maintenant et que, depuis, l'univers a été en expansion à partir de ce petit espace, avec des vitesses variées. Beaucoup d'observations différentes donnent le même temps d'environ quatre milliards d'années (par exemple l'âge des

météorites, des minerais de la Terre, etc.) et il serait donc difficile de trouver une interprétation essentiellement différente de cette idée d'origine. Si celle-ci est correcte, elle signifierait qu'au-delà de ce moment le concept temps aurait subi des changements essentiels. Dans l'état actuel des observations astronomiques, les questions sur la géométrie espace-temps à grande échelle ne peuvent recevoir de réponse ayant le moindre degré de certitude. Mais il est extrêmement intéressant de voir que ces questions pourraient finalement trouver une réponse sur une base empirique solide. Pour le moment, la relativité généralisée elle-même repose sur une base expérimentale très maigre et doit être considérée comme bien moins sûre que la relativité restreinte, qui s'exprime par la transformation de Lorentz.

Même si on ne pousse pas plus loin la discussion sur cette dernière théorie, il n'y a aucun doute que la théorie de la relativité a profondément changé nos vues sur la structure de l'espace et du temps. L'aspect le plus passionnant de ces changements n'est peut-être pas leur nature spéciale, mais le fait qu'ils ont été possibles. La structure de l'espace et du temps définie par Newton sur la base de sa description mathématique de la Nature était simple, cohérente, et correspondait de très près à l'emploi des concepts d'espace et de temps dans la vie quotidienne. Cette correspondance était en fait si proche que les définitions de Newton pouvaient être considérées comme la formulation mathématique précise de ces concepts habituels. Avant la théorie de la relativité, il semblait parfaitement évident que des événements pouvaient s'ordonner dans le temps indépendamment de leur situation dans l'espace. Nous savons maintenant que cette impression est créée dans la vie journalière par le fait que la vitesse de la lumière est tellement plus grande que toute autre vitesse dont nous avons l'expérience pratique ; mais à cette époque, on ne se rendait naturellement pas compte de cette restriction. Et même la connaissant maintenant, nous avons peine à imaginer que l'ordre des événements dans le temps doive dépendre de l'endroit où ils se déroulent.

La philosophie de Kant attira plus tard l'attention sur le fait que les concepts d'espace et de temps appartiennent à nos rapports avec la Nature, et non à la Nature elle-même ; et que nous ne pourrions décrire la Nature sans utiliser ces concepts. Ils sont donc, à un certain point de vue, *a priori*, puisqu'ils sont la condition de l'expérience au lieu d'être primordialement son résultat, alors qu'on croyait en général qu'ils ne pouvaient être ébranlés par de nouvelles expériences. C'est pourquoi la nécessité du changement fut une grande surprise ; c'était la première fois que les scientifiques apprenaient avec quelle prudence ils devaient appliquer les concepts de la vie quotidienne aux expériences perfectionnées de la science expérimentale actuelle. La formulation précise et cohérente de ces concepts dans le langage mathématique de la mécanique newtonienne, leur analyse soigneuse par la philosophie de Kant ne les avaient même pas protégés contre l'analyse critique rendue possible par des mesures extrêmement précises. Cette mise en garde se montra plus tard extrêmement utile au développement de la physique moderne et il nous aurait certes été encore plus difficile de comprendre la mécanique quantique si le succès de la théorie de la relativité n'avait mis les physiciens en garde contre l'emploi inconsidéré des concepts empruntés à la vie quotidienne ou à la physique classique.

8.

Critiques et contrepropositions à l'interprétation de Copenhague

L'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique a entraîné les physiciens fort loin des simples vues matérialistes du XIX^e siècle sur les sciences de la Nature. Ces vues matérialistes étaient liées de façon intrinsèque à la science de cette époque et certains systèmes philosophiques les avaient analysées systématiquement ; elles avaient imprégné très profondément l'esprit de tous, même de l'homme de la rue, et il n'est donc pas étonnant que cette interprétation ait déclenché de nombreuses tentatives pour la remplacer par une interprétation s'alignant davantage sur les conceptions de physique classique ou de philosophie matérialiste.

On peut classer ces tentatives en trois groupes. L'un de ces groupes ne désire pas changer l'interprétation de Copenhague en ce qui concerne les résultats expérimentaux auxquels on doit s'attendre, mais il essaie d'en transformer le langage pour qu'il ressemble davantage à la physique classique ; en d'autres termes, il essaie de changer la philosophie sans changer la physique. Certains articles appartenant à ce premier groupe restreignent leur accord avec les prévisions expérimentales de

l'interprétation de Copenhague aux expériences ayant déjà eu lieu ou à celles qui relèvent de la physique électronique normale.

Le deuxième groupe se rend compte que l'interprétation de Copenhague est la seule appropriée si les résultats expérimentaux sont partout d'accord avec ce qu'avait prévu cette interprétation. C'est pourquoi les articles appartenant à ce second groupe essaient de changer dans une certaine mesure la théorie quantique, sur certains points critiques.

Enfin, le troisième groupe exprime davantage son mécontentement des résultats de l'interprétation de Copenhague – et surtout de ses conclusions philosophiques – sans pour cela faire de contrepropositions nettes. Ce troisième groupe, qui a été historiquement le premier des trois, comprend des articles d'Einstein, de von Laue et de Schrödinger.

Mais tous les adversaires de l'interprétation de Copenhague sont d'accord sur un point : à leur avis, il serait désirable de revenir au concept de réalité de la physique classique ou, pour utiliser un terme philosophique plus général, à l'ontologie du matérialisme. Ils préféreraient qu'on retourne à l'idée d'un monde objectif réel dont les plus minuscules parcelles existent objectivement, au même sens qu'existent les pierres ou les arbres, que nous les observions ou pas.

Mais cela est impossible, ou du moins n'est pas entièrement possible à cause de la nature des phénomènes atomiques, ainsi que nous l'avons expliqué. Notre tâche ne peut être de formuler des vœux sur ce que devraient être les phénomènes atomiques, mais uniquement de tenter de les comprendre.

Quand on analyse les articles du premier groupe, il est important de se rendre compte dès le début que leurs interprétations ne peuvent être réfutées par l'expérience, puisqu'elles ne font que répéter l'interprétation de Copenhague dans un langage différent. D'un point de vue strictement positiviste, on peut même dire que nous nous trouvons là non devant une contreproposition à l'interprétation de Copenhague, mais devant son exacte

répétition dans un langage différent ; on ne peut donc contester que le caractère approprié de ce langage. Un groupe de contrepropositions met en avant l'idée de « paramètres cachés » : étant donné que les lois de mécanique quantique ne déterminent en général les résultats d'une expérience que statistiquement, on aurait tendance, du point de vue classique, à penser qu'il existe des paramètres cachés qui échappent à l'observation au cours d'une expérience ordinaire, mais qui déterminent le résultat de l'expérience de la manière causale habituelle. C'est pourquoi certains articles essaient d'introduire des paramètres de ce genre dans le cadre de la mécanique quantique.

C'est ainsi que Bohm a par exemple fait une contreproposition récemment reprise jusqu'à un certain point par L. de Broglie lui aussi. L'interprétation de Bohm a été donnée en détail et peut donc ici servir de base aux discussions : Bohm considère les particules comme des structures « objectivement réelles », à la manière des masses ponctuelles de la mécanique newtonienne. Les ondes dans l'espace de configuration sont également, dans son interprétation, « objectivement réelles », ainsi que les champs électriques ; l'espace de configuration est un espace à de nombreuses dimensions par rapport aux différentes coordonnées de toutes les particules appartenant au système. Là, on se heurte à une première difficulté : que veut dire attribuer le nom de « réelles » aux ondes dans un espace de configuration ? Cet espace est un espace fortement abstrait ; le mot « réel » vient du mot latin *res* qui signifie « chose » ; mais les choses existent dans l'espace ordinaire à trois dimensions et elles n'existent pas dans un espace de configuration abstrait. On peut donner aux ondes de cet espace le nom « d'objectives » quand on désire dire que ces ondes ne dépendent pas de l'observateur, mais on ne peut guère les traiter de « réelles », à moins d'être prêt à changer la signification du mot. Bohm définit ensuite comme trajectoires possibles des particules les courbes perpendiculaires aux surfaces de phase constante. Savoir laquelle de ces

courbes est la trajectoire « réelle » dépend, selon lui, de l'historique du système et de l'appareil de mesure, ce qui ne peut se décider sans en savoir sur le système et sur l'appareil de mesure davantage qu'il n'est possible d'en savoir effectivement. Cet historique contient en fait les paramètres cachés, la « trajectoire effective », avant même le début de l'expérience.

Une des conséquences de cette interprétation, comme l'a souligné Pauli, c'est que les électrons dans l'état fondamental de nombreux atomes devraient être au repos, c'est-à-dire n'avoir aucun mouvement orbital autour du noyau. Cela semble en contradiction avec les expériences, car les mesures des vitesses des électrons à l'état fondamental (par exemple grâce à l'effet Compton) révèlent toujours une distribution de vitesses à l'état fondamental, distribution donnée – en conformité avec les règles de la mécanique quantique – par le carré de la fonction d'onde en quantité de mouvement ou en vitesse spatiale. Mais Bohm peut prétendre là que les lois ordinaires ne permettent plus d'évaluer la mesure. Il reconnaît que l'évaluation normale de celle-ci conduirait effectivement à une distribution de vitesses. Mais quand on tient compte de la théorie quantique pour l'équipement de mesure – en particulier de certains étranges potentiels quantiques introduits *ad hoc* par Bohm –, alors il est permis de dire que les électrons sont toujours « réellement » au repos. Pour les mesures de la position de la particule, Bohm admet comme correcte l'interprétation ordinaire des expériences. Pour les mesures de la vitesse, il la rejette. C'est à ce prix que Bohm considère qu'il peut affirmer : « Dans le royaume de la théorie quantique, nous n'avons pas besoin d'abandonner la description précise, rationnelle et objective des systèmes individuels. » Cette description objective, cependant, se révèle comme un genre de « superstructure idéologique » fort éloignée de la réalité physique immédiate, car les paramètres cachés de Bohm sont d'un genre tel qu'ils ne peuvent jamais se produire dans la description des processus réels, si la théorie quantique demeure inchangée.

Pour échapper à cette difficulté, Bohm exprime en fait l'espoir qu'au cours de futures expériences dans le domaine des particules élémentaires, les paramètres cachés pourraient encore jouer un rôle physique et qu'on pourrait ainsi prouver la fausseté de la théorie quantique. Entendant exprimer ces étranges espoirs, Bohr avait coutume de dire qu'ils étaient construits comme la phrase : « Nous pouvons espérer qu'il se trouvera un jour où, parfois, on aura $2 \times 2 = 5$, car ce serait très avantageux pour nos finances. » En fait, si les espoirs de Bohm se réalisaient, cela détruirait non seulement la base de la théorie quantique, mais aussi celle de l'interprétation de Bohm. Il faut naturellement souligner en même temps que l'analogie que nous venons de mentionner, quoique complète, ne représente pas un raisonnement logiquement impératif empêchant tout changement futur de la théorie quantique de la manière suggérée par Bohm. Car il ne serait pas fondamentalement impossible d'imaginer qu'une future extension de la logique mathématique accorde, par exemple, un certain sens à postuler que dans des cas exceptionnels on puisse avoir $2 \times 2 = 5$; et il serait même possible que cette extension des mathématiques soit utile aux calculs du domaine économique ; mais nous sommes néanmoins réellement convaincus – même sans raisons logiques impérieuses – que de tels changements des mathématiques ne nous aideraient pas financièrement. Il est donc très difficile de comprendre comment on pourrait décrire les phénomènes physiques à l'aide des propositions mathématiques indiquées par Bohm comme pouvant réaliser ses espoirs.

Si nous négligeons cette altération possible de la théorie quantique, le langage de Bohm (ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer) ne dit sur la physique rien qui diffère de ce qu'en dit l'interprétation de Copenhague. Il ne reste donc que la question de savoir si son langage est approprié. Outre l'objection déjà faite (qu'en parlant des trajectoires des particules nous nous occupons d'une « superstructure idéologique » superflue), il faut en particulier mentionner ici que le langage de Bohm détruit la symétrie entre

position et vitesse implicite en mécanique quantique : pour les mesures de position, Bohm accepte l'interprétation habituelle, mais il la rejette pour les mesures de vitesse ou de quantité de mouvement. Étant donné que les propriétés de symétrie constituent toujours les caractéristiques les plus essentielles d'une théorie, il est difficile de voir ce qu'on gagnerait à les omettre dans le langage correspondant. C'est pourquoi on ne peut considérer la contreproposition de Bohm à l'interprétation de Copenhague comme une amélioration.

On peut émettre une objection similaire, sous une forme quelque peu différente, contre les interprétations statistiques avancées par Bopp et (dans une direction légèrement différente) par Fényes. Bopp considère la création ou la disparition d'une particule comme le processus fondamental de la théorie quantique, la particule étant « réelle » au sens classique du mot, au sens de l'ontologie matérialiste, et les lois de la mécanique quantique étant considérées comme un cas spécial de corrélation statistique pour des phénomènes comme la création ou l'annihilation. Cette interprétation, qui contient de nombreux commentaires intéressants sur les lois mathématiques de la mécanique quantique, peut se poursuivre de telle manière qu'elle mène, en ce qui concerne les conséquences philosophiques, aux mêmes conclusions que l'interprétation de Copenhague. Jusque-là, elle est, au sens positiviste, isomorphe de l'interprétation de Copenhague, comme l'est celle de Bohm. Mais dans son langage elle détruit la symétrie entre particules et ondes qui est par ailleurs une caractéristique spécifique de l'ensemble mathématique de la théorie quantique. Dès 1928, Jordan, Klein et Wigner montraient que l'ensemble mathématique peut s'interpréter non seulement comme une quantification du mouvement des particules, mais aussi comme une quantification des ondes corpusculaires à trois dimensions ; il n'y a donc pas de raison de considérer ces ondes corpusculaires comme moins réelles que les particules. La symétrie entre ondes et particules ne pourrait être assurée dans l'interprétation de Bopp que si la corrélation statistique

correspondante était développée pour les ondes corpusculaires dans l'espace-temps aussi et si on laissait ouverte la question de savoir si particules ou ondes doivent être considérées comme la réalité « effective ».

L'hypothèse que les particules sont réelles, au sens de l'ontologie matérialiste, conduira toujours à la tentation de considérer les déviations au principe d'incertitude comme « fondamentalement » possibles. Fényes, par exemple, déclare que « l'existence du principe d'incertitude » (qu'il lie à certaines relations statistiques) « ne rend aucunement impossible la mesure simultanée, avec une précision arbitraire, de la position et de la vitesse ». Mais il ne dit pas comment on devrait en principe faire de telles mesures ; et par conséquent, ses considérations semblent demeurer des mathématiques assez abstraites.

Weizel (dont les contrepropositions à l'interprétation de Copenhague ressemblent à celles de Bohm et de Fényes) lie les « paramètres cachés » à un nouveau genre de particule introduite pour les besoins de la cause, le « zéron », lequel n'est pas observable par ailleurs. Cependant, un tel concept court le danger de voir l'interaction entre les particules réelles et le zéron dissiper l'énergie entre les nombreux degrés de liberté du champ du zéron, de sorte que toute la thermodynamique devient un chaos. Weizel n'a pas expliqué comment il espère éviter ce danger.

La manière peut-être la meilleure de définir le point de vue de tout le groupe de publications mentionnées jusqu'ici est de se souvenir d'une discussion analogue qui a eu lieu à propos de la théorie de la relativité restreinte ; quiconque était mécontent qu'Einstein nie l'éther, l'espace absolu et le temps absolu pouvait alors tenir le raisonnement suivant : la non-existence de l'espace et du temps absolus n'est en rien prouvée par la théorie de la relativité restreinte ; elle n'a fait que montrer que le vrai espace et le vrai temps ne se présentent pas directement dans une expérience ordinaire ; mais si l'on tenait compte de cet aspect des lois de la Nature et qu'on introduisait ainsi correctement les temps « apparents » pour

des systèmes de coordonnées en mouvement, il n'y aurait pas d'arguments contre l'hypothèse d'un espace absolu. Il serait même plausible de supposer que le centre de gravité de notre galaxie est (du moins approximativement) au repos dans l'espace absolu. Ceux qui critiquent la théorie de relativité restreinte pourraient ajouter qu'il nous resterait l'espoir que de futures mesures puissent permettre de définir sans ambiguïté l'espace absolu (c'est-à-dire le « paramètre caché » de la théorie de relativité restreinte) et qu'on puisse ainsi réfuter la théorie de la relativité.

On voit tout de suite que cette argumentation ne peut être réfutée par l'expérience, puisqu'elle n'affirme encore rien qui diffère de ce qu'affirme la théorie de relativité restreinte. Mais une telle interprétation détruirait, dans le langage utilisé, la propriété décisive de symétrie de la théorie, à savoir l'invariance de Lorentz, et on doit donc la considérer comme inappropriée.

L'analogie avec la théorie quantique est évidente. Les lois de la théorie quantique sont telles que les « paramètres cachés » inventés pour les besoins de la cause ne peuvent jamais être observés. Les propriétés décisives de symétrie sont ainsi détruites si nous introduisons dans l'interprétation de la théorie les paramètres cachés en tant qu'entité fictive.

Le travail de Blochinzew et d'Alexandrov diffère entièrement par sa formulation de ceux que nous venons de discuter. Ces auteurs restreignent dès le début et de façon nette leurs objections à l'interprétation de Copenhague au côté philosophique du problème. Le côté physique de cette interprétation est accepté sans réserve.

Mais la forme extérieure de la polémique n'en est que plus âpre : « Parmi les différentes tendances idéalistes de la physique contemporaine, l'école dite de Copenhague est la plus réactionnaire. Notre article a pour but de démasquer les spéculations idéalistes et agnostiques de cette école sur les problèmes fondamentaux de la physique quantique », écrit Blochinzew dans son introduction. Le caractère acerbe de cette polémique montre que, là,

nous n'avons pas affaire à la science seule, mais à une profession de foi, à une adhésion à une certaine croyance. Le but est exprimé à la fin par une citation tirée de l'œuvre de Lénine : « Aussi merveilleuse que soit, du point de vue de l'intellect humain normal, la transformation de l'éther impondérable en matière pondérable, aussi étrange que soit le fait que les électrons n'ont comme masse qu'une masse électromagnétique, aussi inhabituelle que soit la restriction des lois mécaniques du mouvement à un seul domaine de phénomènes naturels et leur subordination aux lois plus profondes des phénomènes électromagnétiques, etc., tout cela n'est qu'une confirmation de plus du matérialisme dialectique. » Cette dernière phrase semble rendre moins intéressante la discussion de Blochinzew sur les rapports entre la théorie quantique et la philosophie du matérialisme dialectique, dans la mesure où cela semble rabaisser cette discussion au rang de procès truqué où le verdict est connu par avance. Cependant, il est indispensable de faire la clarté complète sur les arguments avancés par Blochinzew et Alexandrov.

Le but proclamé étant là de sauver l'ontologie matérialiste, l'attaque porte principalement sur l'introduction de l'observateur dans l'interprétation de la théorie quantique. Alexandrov écrit : « En théorie quantique, nous devons donc entendre par résultat d'une mesure uniquement l'effet objectif de l'interaction de l'électron et d'un objet approprié. Toute mention de l'observateur doit être évitée et nous devons traiter des conditions objectives et des effets objectifs. Une quantité physique est une caractéristique objective du phénomène et non le résultat d'une observation. » D'après Alexandrov, la fonction d'onde dans l'espace de configuration caractérise l'état objectif de l'électron.

Dans sa présentation, Alexandrov néglige le fait que le formalisme de la théorie quantique ne permet pas le même degré d'objectivation que celui de la théorie classique. Par exemple, si l'interaction d'un système avec l'appareil de mesure est traitée comme un tout d'après la mécanique

quantique et si tous deux sont considérés comme séparés du reste du Monde, alors le formalisme de la théorie quantique ne conduit en règle générale pas à un résultat défini ; il ne conduira par exemple pas au noircissement de la plaque photographique en un point donné. Si l'on essaie de sauver « l'effet objectif » d'Alexandrov en disant « qu'en réalité » la plaque est noircie en un point donné après l'interaction, on peut répliquer que le traitement quantique du système fermé – consistant en l'électron, l'appareil de mesure et la plaque – ne s'applique plus. C'est le caractère « de fait » d'un phénomène, descriptible à l'aide des concepts de la vie journalière, qui n'est plus contenu sans commentaires supplémentaires dans le formalisme mathématique de la théorie quantique, et qui apparaît dans l'interprétation de Copenhague par l'introduction de l'observateur. Naturellement, il ne faut pas se tromper sur cette introduction de l'observateur et la prendre comme signifiant qu'il faut incorporer un certain genre de caractéristiques subjectives dans la description de la Nature. L'observateur a bien plutôt comme seule fonction d'enregistrer les décisions, c'est-à-dire les processus dans l'espace et le temps, et il importe peu que l'observateur soit un appareil ou un être humain ; mais cet enregistrement, c'est-à-dire la transition du « possible » au « réel », est là absolument nécessaire et ne peut être omis dans l'interprétation de la théorie quantique. Sur ce point, la théorie quantique est liée de façon intrinsèque avec la thermodynamique, dans la mesure où tout acte d'observation est, par sa nature même, un processus irréversible ; ce n'est que par de tels processus irréversibles que le formalisme de la théorie quantique peut être lié de façon cohérente aux événements réels dans l'espace et le temps. Et cette irréversibilité est, encore une fois – quand on la projette dans la représentation mathématique des phénomènes – une conséquence de la connaissance incomplète qu'a l'observateur du système et n'est, dans cette mesure, pas complètement objective.

Blochinzew formule la question d'une manière légèrement différente d'Alexandrov : « En mécanique quantique, nous décrivons non un état de la particule en elle-même, mais le fait qu'elle appartient à tel ou tel système statistique. Cette appartenance est complètement objective et ne dépend pas de ce qu'en dit l'observateur. » Mais une telle formulation nous entraîne très loin – probablement trop loin – de l'ontologie matérialiste. Pour clarifier cela, il est utile de rappeler comment cette appartenance à un ensemble statistique est utilisée dans l'interprétation de la thermodynamique classique. Si un observateur a déterminé la température d'un système et désire tirer de ses résultats des conclusions sur les mouvements moléculaires du système, il peut dire que le système n'est qu'un échantillon extrait d'un ensemble canonique qu'il peut donc considérer comme pouvant avoir différentes énergies. « En réalité » – conclurons-nous en physique classique –, le système n'a qu'une seule énergie définie à un instant donné, et aucune des autres énergies n'existe ; l'observateur a été trompé s'il considérait une énergie différente comme possible à cet instant-là. L'ensemble canonique contient des postulats, non seulement sur le système lui-même, mais aussi sur la connaissance incomplète qu'a l'observateur du système. Si Blochinzew essaie en théorie quantique de traiter de « complètement objective » l'appartenance d'un système à un ensemble, il utilise le mot « objective » dans un sens différent de celui de la physique classique. Car en physique classique, cette appartenance signifie, comme nous l'avons dit, des postulats non seulement sur le système mais aussi sur le degré de connaissance qu'a l'observateur du système. On doit faire une exception à cette affirmation en théorie quantique : si l'ensemble n'y est caractérisé que par une seule fonction d'onde dans l'espace de configuration (et non, comme d'habitude, par une matrice statistique), nous nous trouvons devant une situation spéciale (dite « cas pur ») dans laquelle on peut traiter la description d'objective en un certain sens et dans laquelle l'élément de connaissance incomplète ne se

présente pas immédiatement. Mais étant donné que chaque mesure (vu ses caractéristiques irréversibles) réintroduirait l'élément de connaissance incomplète, la situation ne serait pas fondamentalement différente.

Par-dessus tout, nous voyons par ces formulations quelles difficultés nous rencontrons quand nous essayons d'introduire de nouvelles idées dans un vieux système de concepts appartenant à une philosophie antérieure – ou, pour employer une vieille métaphore, quand nous essayons de mettre du vin nouveau dans de vieilles bouteilles. De telles tentatives sont toujours affligeantes, car elles nous fourvoient en nous obligeant à nous occuper continuellement des craquelures inévitables des vieilles bouteilles au lieu d'apprécier le vin nouveau. Nous ne pouvons nous attendre à ce que les penseurs qui, il y a un siècle, posaient les fondements du matérialisme dialectique aient pu prévoir le développement de la théorie quantique. Il était impossible que leurs concepts de matière et de réalité puissent s'adapter aux résultats de la technique expérimentale raffinée de notre époque.

On devrait peut-être ajouter ici quelques remarques générales sur l'attitude du scientifique envers une croyance, qu'elle soit religieuse ou philosophique. La différence fondamentale entre croyance religieuse et croyance philosophique – à savoir que la dernière se préoccupe de la réalité matérielle immédiate du Monde qui nous entoure alors que la première concerne une autre réalité au-delà du Monde matériel – importe peu pour notre question précise ; c'est le problème de la croyance elle-même qu'il nous faut discuter. D'après ce que nous avons dit, on aurait tendance à exiger du scientifique qu'il ne s'appuie jamais sur des doctrines spéciales, qu'il ne restreigne jamais sa méthode de pensée à une philosophie particulière. Il devrait être toujours prêt à voir les fondements de sa connaissance changer par suite d'une expérience nouvelle. Mais là encore cette exigence serait une simplification abusive de notre situation dans la vie, et cela pour deux raisons : la première est que notre pensée est

déterminée dans notre jeunesse par les idées que nous avons côtoyées à cette époque ou par les contacts avec de fortes personnalités qui nous enseignaient ; cette structure formera partie intégrante de tout notre travail ultérieur et il est fort possible qu'elle nous rende difficile de nous adapter plus tard à des idées entièrement différentes ; la seconde raison est que nous appartenons à une communauté, à une société ; cette communauté est cimentée par des idées communes, par une échelle commune des valeurs éthiques ou par un langage commun sur les problèmes généraux de la vie. Ces idées communes peuvent être étayées par l'autorité d'une Église, d'un parti ou d'un État ; et même si ce n'est pas le cas, il peut être délicat de s'écarter des idées habituelles sans entrer en conflit avec la communauté. Et cependant, les résultats de la pensée scientifique peuvent être en contradiction avec certaines idées communes. Ce serait certes manquer de sagesse que d'exiger que le scientifique ne soit en général pas un membre loyal de cette communauté, qu'il soit privé du bonheur qui peut provenir d'appartenir à une communauté ; et ce serait également manquer de sagesse que de désirer que les idées communes de la société – qui, du point de vue scientifique, sont toujours des simplifications – changent instantanément avec le progrès de la connaissance scientifique et qu'elles soient aussi mouvantes que le sont forcément les théories scientifiques. Par conséquent, nous en revenons là (même à notre époque) au vieux problème de la « vérité double », lequel a rempli l'histoire de la religion chrétienne pendant toute la fin du Moyen Âge : à savoir la doctrine très discutable selon laquelle la « religion positive » – quelque forme qu'elle puisse prendre – est un besoin indispensable de la masse populaire alors que l'homme de science cherche la vérité réelle derrière la religion et ne la cherche que là. « La science est ésotérique, dit-on, elle n'est que pour le petit nombre. » Si, de notre temps, les doctrines politiques et les activités sociales jouent le rôle de religion positive dans certains pays, le problème demeure encore essentiellement le même : le scientifique devra toujours se réclamer tout

d'abord de l'honnêteté intellectuelle, alors que la communauté lui demande fréquemment – la science évoluant avec une telle vitesse – qu'il attende au moins quelques décennies avant d'exprimer en public ses opinions dissidentes. Il n'existe probablement pas de solution simple à ce problème si la tolérance n'y suffit pas, mais on peut tirer une certaine consolation du fait qu'il s'agit certainement là d'un problème séculaire inhérent à la vie humaine.

Revenant maintenant aux contrepropositions à l'interprétation de Copenhague, il nous faut discuter du second groupe de propositions, lesquelles tentent de changer la théorie quantique de manière à parvenir à une interprétation philosophique différente. La tentative la plus poussée dans ce sens a été faite par Janossy, qui a compris que la validité rigoureuse de la mécanique quantique nous oblige à nous écarter du concept de réalité de la physique classique. Il essaie donc de changer la mécanique quantique de telle manière que, bien que nombre de ses résultats demeurent vrais, sa structure se rapproche de la physique classique. Son point d'attaque est ce qu'on nomme « la réduction des paquets d'ondes », c'est-à-dire le fait que la fonction d'onde (ou, plus généralement, la fonction de probabilité) change de façon discontinue quand l'observateur prend connaissance du résultat d'une mesure. Janossy remarque que cette réduction ne peut se déduire des équations différentielles du formalisme mathématique et il croit pouvoir en tirer qu'il existe une incohérence dans l'interprétation habituelle. Il est bien connu que la « réduction des paquets d'ondes » apparaît toujours dans l'interprétation de Copenhague au moment où l'on passe du possible au réel. La fonction de probabilité, laquelle couvrirait une vaste gamme de possibilités, se réduit soudain à une gamme bien plus étroite par le fait que l'expérience a conduit à un résultat spécifique et qu'un certain phénomène s'est effectivement produit. Dans le formalisme, cette réduction demande que ce qu'on appelle l'interférence des probabilités, phénomène le plus caractéristique de la théorie quantique, soit détruite par les interactions

(partiellement indéfinissables et irréversibles) du système avec l'appareil de mesure et le reste du Monde. Janossy essaie ensuite de changer la mécanique quantique en introduisant dans les équations des termes dits d'amortissement, de manière que les termes d'interférence disparaissent d'eux-mêmes après un temps fini. Même si cela correspondait à la réalité – et il n'y a pas de raison de le supposer d'après les expériences effectuées – il subsisterait encore un certain nombre de conséquences alarmantes d'une telle interprétation, comme le fait remarquer Janossy lui-même (par exemple, des ondes qui se propageraient plus vite que la vitesse de la lumière, des interchangements dans la séquence de temps de la cause et de l'effet, etc.). Par conséquent, nous ne serions guère prêts à sacrifier la simplicité de la théorie quantique pour ce genre de point de vue, à moins d'y être contraints par des expériences.

Parmi les autres adversaires de ce qu'on appelle parfois l'interprétation « orthodoxe » de la théorie quantique, Schrödinger a adopté une position spéciale : il attribuerait la « réalité objective » non aux particules, mais aux ondes, et il n'est pas prêt à interpréter les ondes comme n'étant « que des ondes de probabilité ». Dans son article intitulé « Existe-t-il des sauts quantiques ? », il tente de nier complètement l'existence de ces sauts (on pourrait mettre en doute le caractère approprié du terme « sauts quantiques » à cet endroit et le remplacer par le terme moins provocateur de « discontinuité »). Or le travail de Schrödinger contient tout d'abord certaines erreurs sur l'interprétation usuelle. Il néglige le fait que seules les ondes dans l'espace de configuration (ou « matrices de transformation ») sont des ondes de probabilité dans l'interprétation habituelle, alors que les ondes corpusculaires à trois dimensions, ou ondes de rayonnement, ne le sont pas. Ces dernières possèdent tout autant ou tout aussi peu de « réalité » que les particules ; elles n'ont aucun lien direct avec les ondes de probabilité, mais ont une densité d'énergie et une quantité de mouvement continues, comme le champ électromagnétique dans la théorie de Maxwell.

Schrödinger souligne donc avec raison que, sur ce point, les processus ne peuvent être conçus comme étant plus continus qu'ils ne le sont en général. Mais cette interprétation ne peut éliminer l'élément de discontinuité qu'on trouve partout en physique atomique : tout écran de scintillations ou tout compteur de Geiger démontre cela immédiatement. Dans l'interprétation usuelle de la théorie quantique, cet élément est contenu dans la transition du possible au réel. Schrödinger ne fait lui-même aucune contreproposition pour dire comment il a l'intention d'introduire l'élément de discontinuité – observable partout – et cela d'une manière qui diffère de l'interprétation habituelle.

Finalement, la critique exprimée par Einstein, von Laue et d'autres dans différents articles se concentre sur la question de savoir si l'interprétation de Copenhague permet une description univoque et objective des faits physiques. On peut exposer leurs arguments essentiels comme suit : le schéma mathématique de la théorie quantique semble être une description parfaitement appropriée de la statistique des phénomènes atomiques. Mais même si les postulats sur la probabilité des phénomènes atomiques sont complètement corrects, cette interprétation ne nous décrit pas ce qui se passe en fait, indépendamment des observations, ou pendant l'intervalle entre elles. Mais il faut bien qu'il se passe quelque chose, nous ne pouvons en douter ; ce quelque chose n'a pas besoin d'être décrit à l'aide d'électrons, d'ondes ou de quanta lumineux ; mais tant que ce quelque chose n'est pas décrit d'une façon quelconque, la tâche de la physique n'est pas terminée. On ne peut admettre qu'il ne soit question que de l'acte d'observer ; dans sa science, le physicien doit postuler qu'il étudie un monde qu'il n'a pas fabriqué lui-même et qui serait présent, essentiellement inchangé, si le scientifique en était lui-même absent. Par conséquent, l'interprétation de Copenhague n'offre pas une explication complète des phénomènes atomiques.

On voit facilement que ce qu'exige cette critique, c'est encore une fois la vieille ontologie matérialiste. Mais quelle peut être la réponse du point de vue de l'interprétation de Copenhague ?

Nous pouvons dire que la physique est une partie de la science et qu'elle vise, à ce titre, à décrire et comprendre la Nature. Toute compréhension, scientifique ou non, dépend de notre langage, de la communication des idées ; toute description des phénomènes, des expériences ou de leurs résultats, repose sur le langage comme seul moyen de communication. Les mots de ce langage représentent les concepts de la vie journalière qui, dans le langage scientifique de la physique, peuvent s'épurer jusqu'à devenir les concepts de physique classique. Ces concepts sont les seuls outils nous permettant d'échanger sans ambiguïté nos pensées sur les phénomènes, sur l'organisation des expériences et sur leurs résultats. Si donc l'on demande à l'atomiste de donner une description de ce qui se passe réellement dans ses expériences, les mots « description », « réellement », « se passe », ne peuvent concerner que les concepts de la vie quotidienne ou de la physique classique. Si le physicien abandonnait cette base, il perdrait le moyen de s'exprimer sans ambiguïté et ne pourrait poursuivre sa recherche scientifique. Donc, toute déclaration sur ce qui s'est « réellement passé » est une déclaration en termes de concepts classiques et – à cause de la thermodynamique et des relations d'incertitude – est incomplète en soi quant aux détails des phénomènes atomiques impliqués. Demander qu'on « décrive ce qui se passe » dans le processus quantique entre deux observations successives est une contradiction *in adjecto*, puisque le mot « décrire » se réfère à l'emploi des concepts classiques, alors que ces concepts ne peuvent être appliqués dans l'intervalle séparant deux observations et ne peuvent l'être qu'aux points d'observation.

Il faudrait remarquer ici que l'interprétation de Copenhague n'est aucunement positiviste, car, là où le positivisme prend comme base les perceptions sensorielles de l'observateur en tant qu'éléments de la réalité,

l'interprétation de Copenhague considère que ce sont les choses et processus descriptibles à l'aide des concepts classiques, c'est-à-dire le réel, qui sont les fondements de toute interprétation physique.

En même temps, nous voyons que la nature statistique des lois de physique microscopique ne peut être évitée, car toute connaissance du « réel » est – à cause des lois quantiques – une connaissance incomplète en soi.

L'ontologie du matérialisme reposait sur l'illusion que le genre d'existence, la « réalité » directe du Monde qui nous entoure, pouvait s'extrapoler jusqu'à l'ordre de grandeur de l'atome. Or cette extrapolation est impossible.

On pourrait ajouter quelques remarques concernant la structure formelle de toutes les contrepropositions faites jusqu'à maintenant à l'interprétation de Copenhague. Elles se sont toutes trouvées contraintes à sacrifier les propriétés essentielles de symétrie de la théorie quantique (par exemple la symétrie entre ondes et particules, ou entre position et vitesse).

Par conséquent, nous serions assez fondés à supposer qu'on ne peut éviter l'interprétation de Copenhague si l'on considère que ces propriétés de symétrie – par exemple l'invariance de Lorentz dans la théorie de la relativité – sont une caractéristique authentique de la Nature ; et chacune des expériences ayant eu lieu jusqu'ici appuie ce point de vue.

9.

Théorie quantique et structure de la matière

Le concept de matière a pris bien des aspects au cours de l'histoire de la pensée humaine. Les divers systèmes philosophiques lui ont donné des interprétations variées et toutes celles-ci subsistent encore plus ou moins dans notre conception actuelle du mot « matière ».

L'ancienne philosophie grecque, de Thalès de Milet aux atomistes, en quête d'un principe unifiant au sein de la mutabilité universelle de toutes choses, avait formé le concept de matière cosmique, substance universelle subissant toutes ces transformations et dont toutes choses individuelles émergeaient pour y retourner plus tard. Cette matière était en partie identifiée avec quelque matière spécifique comme l'eau, l'air ou le feu, mais partiellement seulement, car cette dernière n'avait d'autre attribut que d'être le matériau avec lequel toutes choses étaient faites.

Plus tard, dans la philosophie d'Aristote, la matière fut évoquée par le lien entre forme et matière. Tout ce que nous percevons dans le monde des phénomènes qui nous entourent, c'est de la matière ayant pris forme. La matière n'est pas une réalité en soi, mais seulement une possibilité, une *potentia* ; elle n'existe qu'à l'aide de la forme. Dans le processus naturel,

« l'essence », comme la nomme Aristote, passe de la simple possibilité au réel grâce à la forme ; la matière, telle que la voit Aristote, n'est certes pas une matière précise comme l'eau ou l'air, mais n'est pas davantage le vide ; c'est une sorte de substratum matérialisé non défini en lequel s'incarne la possibilité de parvenir au réel au moyen de la forme. Dans la philosophie aristotélicienne, les exemples typiques de ce lien entre matière et forme sont les processus biologiques, dans lesquels la matière prend forme pour devenir l'organisme vivant et l'activité élaboratrice et formatrice de l'homme. La statue existe potentiellement dans le marbre avant que le sculpteur la dégage.

Puis, beaucoup plus tard, à partir de la philosophie cartésienne, la matière fut principalement envisagée comme étant le contraire de l'esprit : il y avait les deux aspects complémentaires de l'univers, la « matière » et « l'esprit » ou, comme l'exprime Descartes, la *res extensa* et la *res cogitans*. Les nouveaux principes de méthode en science expérimentale (et surtout en mécanique) excluant toute possibilité que les phénomènes concrets aient leur source dans les forces spirituelles, la matière pouvait être considérée comme une réalité en soi, indépendante de l'esprit et de toute puissance surnaturelle. La « matière » de cette époque est une « matière matérialisée », le processus de matérialisation étant interprété comme une chaîne causale d'interactions mécaniques ; la matière a perdu son lien avec l'âme végétative de la philosophie d'Aristote, de sorte que le dualisme entre matière et forme n'entre plus en ligne de compte. Dans notre emploi actuel du mot « matière », c'est ce concept qui constitue de loin la composante la plus puissante.

Enfin, dans les sciences expérimentales du XIX^e siècle, un autre dualisme a joué un certain rôle, le dualisme entre force et matière : la matière, c'est ce sur quoi les forces peuvent agir ; ou bien, la matière peut produire des forces : par exemple, la matière engendre des forces de gravitation et ces forces agissent sur la matière. Matière et force sont deux

aspects nettement différents du Monde concret. Dans la mesure où ces forces peuvent être des forces matérialisantes, cette distinction se rapproche de la distinction entre matière et forme de l'école d'Aristote. D'autre part, dans l'évolution la plus récente de la physique moderne, cette distinction entre matière et force a complètement disparu, car tout champ de force contient de l'énergie et, de ce fait, constitue de la matière. À tout champ de force correspond un genre spécifique de particules élémentaires ayant essentiellement les mêmes propriétés que toutes les autres unités atomiques de matière.

Lorsque les sciences expérimentales s'attaquent au problème de la matière, elles ne peuvent le faire que par l'étude des formes de cette matière. L'infinie variété et mutabilité de ces formes doit être l'objet direct de l'investigation et les efforts portent forcément sur la recherche des lois naturelles, des principes unifiants pouvant servir de guides dans ce domaine immense. Les sciences expérimentales, et tout spécialement la physique, se sont donc concentrées pendant longtemps sur l'analyse de la structure de la matière et des forces responsables de cette structure.

Depuis l'époque de Galilée, la méthode fondamentale des sciences de la Nature a été l'expérience. C'est cette méthode qui a permis de passer de l'expérience générale à l'expérience spécifique et de dégager de la Nature des phénomènes caractéristiques par lesquels on pourrait étudier ses « lois » d'une façon plus directe que par l'expérience générale. Si l'on désire étudier la structure de la matière, il faut faire des expériences avec celle-ci et l'exposer aux conditions les plus extrêmes pour étudier ses transmutations, avec l'espoir de découvrir quelles sont les caractéristiques fondamentales qui persistent malgré tous les changements apparents.

Aux tout premiers jours des sciences expérimentales modernes, c'était là l'objet de la chimie et cette tentative amena assez rapidement au concept d'élément chimique. On nomma élément toute substance qu'on ne pouvait plus disjoindre ou désintégrer par un quelconque des moyens dont disposait

le chimiste : ébullition, combustion, dissolution, mélange avec d'autres substances, etc. L'introduction de ce concept fut la première grande étape vers la compréhension de la structure de la matière. L'immense variété de substances fut enfin réduite à un nombre relativement petit de substances fondamentales, les « éléments », et on parvint ainsi à établir un certain ordre parmi les divers phénomènes chimiques. Le mot « atome » fut donc utilisé pour désigner la plus petite unité de matière appartenant à l'élément chimique ; et la particule la plus petite de composé chimique fut décrite comme un petit groupe d'atomes différents : la particule la plus petite de l'élément fer, par exemple, était un atome de fer ; et la particule la plus petite d'eau, la molécule d'eau, consistait en un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène.

Le pas suivant, presque aussi important, fut la découverte de la conservation de la masse dans les processus chimiques. Par exemple, quand l'élément carbone se transforme par combustion en bioxyde de carbone, la masse de bioxyde est égale à la somme des masses de carbone et d'oxygène avant la combustion. Ce fut cette découverte qui donna une signification quantitative au concept de matière : indépendamment de ses propriétés chimiques, la matière pouvait se mesurer par sa masse.

Durant la période qui suivit, et surtout au XIX^e siècle, on découvrit un certain nombre d'éléments chimiques et l'on en connaît maintenant une centaine. Cette évolution montra clairement que le concept d'élément chimique n'avait pas encore atteint le stade permettant de comprendre l'unité de la matière : il n'était pas satisfaisant de croire qu'existent de très nombreuses sortes de matière, qualitativement différentes et sans le moindre rapport entre elles.

Au début du XIX^e siècle, on découvrit des preuves d'un lien entre les différents éléments dans le fait que les poids atomiques des divers éléments semblaient souvent être des multiples entiers d'une unité plus petite proche du poids atomique de l'hydrogène. L'analogie entre le comportement

chimique de certains éléments fut un autre indice allant dans le même sens. Mais seule la découverte de forces bien plus grandes que celles intervenant dans les processus chimiques pouvait réellement établir le lien entre les divers éléments et conduire ainsi à une unification plus nette de la matière.

Ces forces furent en fait trouvées dans le processus radioactif découvert en 1896 par Becquerel. Les recherches successives de Curie, de Rutherford et d'autres révélèrent la transmutation des éléments pendant le processus radioactif. Les particules α sont émises dans ce processus en tant que fragments d'atomes, avec une énergie environ un million de fois plus grande que celle que dégage une seule particule atomique dans une réaction chimique ; par conséquent, ces particules pouvaient être utilisées comme outil nouveau pour étudier la structure interne de l'atome. Les expériences de Rutherford sur la diffraction des rayons α eurent comme résultat le modèle nucléaire de l'atome proposé en 1911. La caractéristique la plus importante de ce modèle bien connu est la séparation de l'atome en deux parties bien distinctes, le noyau et les couches électroniques qui l'entourent ; le noyau n'occupe au milieu de l'atome qu'une fraction extrêmement petite de l'espace occupé par l'atome (son rayon est à peu près une centaine de milliers de fois plus petit que celui de l'atome), mais il contient presque toute sa masse ; sa charge électrique positive, multiple entier de la charge dite élémentaire, détermine le nombre des électrons qui l'entourent (l'atome devant au total être électriquement neutre) ainsi que la forme de leurs orbites.

La distinction entre noyau et couches électroniques donna directement l'explication correcte du fait que, pour la chimie, les éléments chimiques sont les éléments ultimes de matière et que des forces beaucoup plus grandes sont nécessaires pour transformer les éléments les uns dans les autres. La liaison chimique entre atomes voisins est due à l'interaction des couches électroniques extérieures et les énergies de cette interaction sont relativement petites ; un électron, accéléré dans un tube à décharge par un

potentiel de quelques volts seulement, a une énergie qui suffit pour exciter les couches électroniques à émettre des rayonnements ou pour détruire la liaison chimique d'une molécule. Mais le comportement chimique de l'atome, quoique étant le comportement de ses électrons extérieurs, est déterminé par la charge du noyau ; il faut changer le noyau si l'on veut changer les propriétés chimiques, et cela demande des énergies environ un million de fois plus grandes.

Mais ce modèle nucléaire de l'atome, lorsqu'on le considérait comme un système obéissant à la mécanique newtonienne, ne pouvait expliquer la stabilité de l'atome. Ainsi que nous l'avons exposé précédemment, seule la théorie quantique appliquée par Bohr à ce modèle a pu rendre compte du fait que, par exemple, un atome de carbone, après avoir été en interaction avec d'autres atomes ou après avoir émis des rayonnements, demeure finalement toujours un atome de carbone, avec les mêmes couches électroniques qu'avant. Cette stabilité a pu être expliquée d'une façon simple par les caractéristiques de la théorie quantique qui empêchent une simple description objective de la structure de l'atome dans l'espace-temps.

On disposait ainsi finalement d'une première base de compréhension de la matière et l'on pouvait rendre compte des propriétés chimiques et autres des atomes en appliquant le schéma mathématique de la théorie quantique aux couches électroniques. À partir de cette base, on pouvait tenter d'étendre l'analyse de la structure de la matière en suivant deux voies opposées : soit étudier l'interaction des atomes, leur relation avec des unités plus grandes comme les molécules, les cristaux ou les objets biologiques ; soit essayer de pénétrer dans l'unité finale de la matière par l'étude du noyau et de ses composantes. La recherche se poursuivait dans ces deux directions durant les décennies précédentes et nous allons voir dans les pages qui suivent quel a été le rôle de la théorie quantique dans ces deux domaines.

Les forces entre atomes voisins sont tout d'abord électriques : attraction entre charges opposées et répulsion entre charges de même signe ; les électrons sont attirés par le noyau et se repoussent entre eux. Mais ces forces agissent, non d'après les lois de la mécanique newtonienne, mais d'après les lois quantiques.

Cela conduit à deux types différents de liaison entre atomes. Dans un cas, l'électron d'un atome passe à l'autre atome, par exemple pour remplir la case restante d'une couche électronique presque pleine ; les deux atomes sont finalement chargés et forment ce que les physiciens appellent des ions ; et, comme leurs charges sont de signes opposés, ils s'attirent l'un l'autre.

Dans le second cas, un électron appartient aux deux atomes, d'une façon bien caractéristique de la théorie quantique. En utilisant l'image de l'orbite électronique, on peut dire que l'électron tourne autour des deux noyaux, passant un temps considérable dans l'un comme dans l'autre atome. Ce second type de liaison correspond à ce que les chimistes appellent une liaison de valence.

Ces deux types de forces (qui peuvent se présenter dans tout mélange) entraînent la formation de divers groupements d'atomes et semblent en définitive être responsables de toutes les structures compliquées de la matière massive qu'on a étudiées en physique et en chimie. La formation de composés chimiques se fait par la formation de petits groupes d'atomes différents, chaque groupe étant une molécule du composé. La formation de cristaux est due aux arrangements des atomes en réseaux réguliers. Il se forme des métaux lorsque les atomes sont tellement serrés que les électrons extérieurs peuvent quitter leur couche et se promener dans tout le cristal. Le magnétisme est dû au mouvement de rotation des électrons sur eux-mêmes, etc.

Dans tous ces cas, le dualisme entre matière et force peut encore être conservé, car on peut considérer noyaux et électrons comme des fragments de matière maintenus cimentés par les forces électromagnétiques.

Pendant que la physique et la chimie en viennent ainsi à l'union presque complète vis-à-vis de la structure de la matière, la biologie, elle, traite de structures plus complexes et d'une nature assez différente. Il est vrai qu'en dépit du tout que constitue un organisme vivant il est certainement impossible de faire une distinction nette entre la matière vivante et la matière inanimée. L'évolution de la biologie nous a fourni un grand nombre d'exemples grâce auxquels on peut voir que des fonctions biologiques spécifiques sont remplies par de grandes molécules spéciales ou par des groupes ou chaînes de molécules de ce type, et la biologie moderne a de plus en plus tendance à expliquer les processus biologiques comme étant des conséquences de lois physico-chimiques. Mais le type de stabilité qu'offre l'organisme vivant est d'une nature quelque peu différente de la stabilité des atomes ou des cristaux : c'est une stabilité de réaction ou de fonction plutôt qu'une stabilité de forme. Il ne peut y avoir de doute que les lois quantiques jouent un rôle très important dans les phénomènes biologiques : par exemple, ces forces quantiques qui ne peuvent être décrites qu'avec imprécision par les concepts de valence chimique sont essentielles pour comprendre les grandes molécules organiques et leurs divers schémas géométriques ; les expériences sur les mutations biologiques provoquées par l'irradiation montrent à la fois la pertinence des lois de statistique quantique et l'existence de mécanismes amplificateurs. L'étroite analogie entre le fonctionnement de notre système nerveux et le fonctionnement des calculatrices électroniques modernes souligne encore une fois l'importance de processus élémentaires isolés dans l'être vivant. Mais tout cela ne prouve pas encore que la physico-chimie ajoutée au concept d'évolution offrira un jour une description complète de l'être vivant. L'expérimentateur doit traiter les processus biologiques avec une plus grande précaution que lorsqu'il s'agit de processus physico-chimiques ; comme l'a fait remarquer Bohr, il est bien possible qu'une description de l'être vivant (description qu'on puisse déclarer complète du

point de vue du physicien) soit impossible à donner, car elle exigerait des expériences qui interféreraient par trop avec les processus biologiques.

Bohr a décrit cette situation en disant qu'en biologie nous nous occupons de manifestations de ce qui peut arriver dans une Nature à laquelle nous appartenons, plutôt que de résultat d'expériences que nous pouvons faire nous-mêmes. La situation de complémentarité à laquelle fait allusion cette formulation est représentée comme une tendance des méthodes de la recherche biologique moderne, celle-ci utilisant pleinement les méthodes et les résultats de la chimie et de la physique, et étant fondée sur des concepts touchant aux caractéristiques de la nature organique ne faisant pas partie de la physique ou de la chimie, comme le concept de vie lui-même.

Jusqu'à présent, nous avons étudié l'analyse de la structure de la matière dans une seule direction : celle allant de l'atome aux structures plus compliquées faites de nombreux atomes, de la physique atomique à la physique des corps solides, à la chimie et à la biologie. Il nous faut maintenant aller au sens opposé et suivre la ligne de recherches allant des parties externes de l'atome aux parties internes, du noyau aux particules élémentaires. C'est cette voie qui nous conduira peut-être à comprendre l'unité de la matière. Là, nous n'avons pas à craindre de détruire par nos expériences des structures caractéristiques ; lorsque nous nous fixons comme tâche d'explorer l'unité ultime de la matière, nous pouvons exposer celle-ci aux forces les plus puissantes, aux conditions les plus extrêmes, afin de voir si une matière quelconque peut finalement se muter en une autre.

Le premier pas dans cette voie a été l'analyse expérimentale du noyau atomique. Au tout début de ces études, pendant les trente premières années du ^{xx}e siècle, les seuls outils dont nous disposions pour agir sur le noyau étaient les particules α émises par les corps radioactifs. Rutherford réussit en 1919 la transmutation de noyaux d'éléments légers ; il put par exemple transformer un noyau d'azote en noyau d'oxygène, en ajoutant une

particule α au noyau d'azote et en lui arrachant en même temps un proton. Ce fut le premier exemple de processus à l'échelle nucléaire qui rappelle les processus chimiques, mais qui mène à la transmutation artificielle d'éléments. Le deuxième progrès important fut, comme on le sait, l'accélération artificielle des protons à l'aide d'équipement à haute tension, avec des énergies suffisantes pour causer une transmutation nucléaire. Il faut pour cela des tensions d'environ un million de volts et Cockcroft et Walton réussirent, dans leur première expérience décisive, à transformer un noyau de lithium en noyau d'hélium. Cette découverte ouvrit une voie entièrement nouvelle aux recherches, voie à laquelle on peut donner au sens propre le nom de physique nucléaire, et qui mena très rapidement à une compréhension qualitative de la structure du noyau.

Cette structure était en vérité simple. Le noyau de l'atome ne consiste qu'en deux sortes de particules élémentaires : l'une est le proton, qui est en même temps tout simplement le noyau d'hydrogène ; l'autre, qu'on appela neutron, est une particule qui a à peu près la masse du proton, mais qui est électriquement neutre. Chaque noyau peut être caractérisé par le nombre de protons et de neutrons qu'il contient : le noyau normal de carbone, par exemple, comprend six protons et six neutrons ; il existe d'autres noyaux de carbone, moins fréquents, qu'on appelle des isotopes du premier et qui consistent en six protons et sept neutrons, etc. On est ainsi finalement parvenu à une description de la matière dans laquelle, au lieu de nombreux éléments chimiques différents, il ne subsiste plus que trois unités fondamentales : le proton, le neutron et l'électron. Toute la matière est faite d'atomes, donc de ces trois « briques » fondamentales. Ce n'était pas encore là l'unité de la matière, mais c'était certainement un grand pas vers l'unification et – chose peut-être plus importante encore – vers la simplification. Il restait encore bien du chemin à faire depuis la connaissance des deux éléments fondamentaux du noyau jusqu'à une compréhension complète de sa structure. Le problème était dans ce cas

assez différent du problème correspondant concernant les couches externes de l'atome, problème résolu vers 1925. Dans les couches électroniques, les forces entre particules étaient connues avec une grande précision, mais il fallait découvrir les lois dynamiques, et c'est ce que fit la mécanique quantique. Pour le noyau, on pouvait sans doute supposer que les lois dynamiques étaient les mêmes qu'en mécanique quantique, mais l'on ne connaissait pas à l'avance les forces entre particules ; il fallait les déduire des propriétés du noyau telles que les fournissait l'expérience. Ce problème n'a pas encore été complètement résolu. Les forces n'ont probablement pas une forme aussi simple que celle des forces électrostatiques dans les couches d'électrons ; et par conséquent, la difficulté mathématique qu'on éprouve à calculer les propriétés à partir de forces complexes ainsi que l'imprécision des expériences rendent le progrès difficile. Mais on est enfin parvenu à une compréhension qualitative de la structure du noyau.

Restait ensuite le problème final : celui de l'unité de la matière. Ces « briques » fondamentales – proton, neutron et électron –, unités indestructibles et finales de la matière, sont-elles des atomes au sens de Démocrite, sans aucun lien sauf les forces qui agissent entre elles, ou ne sont-elles que des formes différentes du même genre de matière ? Peuvent-elles, à nouveau, se transformer l'une dans l'autre, ou même dans d'autres formes de matière ? L'investigation expérimentale de ce problème exige que se concentrent sur les particules atomiques des forces et des énergies bien plus grandes que celles qu'il a fallu pour explorer le noyau. Étant donné que les énergies entreposées dans le noyau ne sont pas assez grandes pour nous fournir l'outil pour de telles expériences, les physiciens doivent compter, soit sur les forces de dimensions cosmiques, soit sur l'ingéniosité et l'habileté des techniciens.

En fait, des progrès ont été faits dans ces deux voies. Dans la première, les physiciens ont utilisé ce qu'on appelle le rayonnement cosmique : les champs électromagnétiques à la surface des étoiles s'étendent sur des

espaces immenses et peuvent, sous certaines conditions, accélérer des particules atomiques chargées, électrons et noyaux ; les noyaux, à cause de leur inertie plus élevée, semblent avoir davantage de chances de rester longtemps dans le champ accélérateur et, quand ils quittent finalement la surface de l'étoile pour traverser les espaces interstellaires, ils ont déjà franchi des potentiels de plusieurs milliards de volts. Il est possible qu'il y ait en outre une accélération due aux champs magnétiques entre étoiles. De toute manière, les noyaux semblent maintenus pendant longtemps à l'intérieur de l'espace de la galaxie par divers champs magnétiques et, pour finir, ils emplissent l'espace interstellaire de ce qu'on appelle les rayons cosmiques. Ce rayonnement venu de l'extérieur arrive sur la Terre et consiste en noyaux de pratiquement tous les genres, hydrogène, hélium et beaucoup d'autres éléments plus lourds, ayant des énergies qui vont en gros d'une centaine ou d'un millier de millions d'électrons-volts à (dans des cas rares) un million de fois plus. Quand les particules de ce rayonnement cosmique pénètrent dans l'atmosphère terrestre, elles entrent en collision avec les atomes d'azote et d'oxygène de l'atmosphère, ou peuvent frapper les atomes de l'équipement expérimental qu'on expose à ce rayonnement.

L'autre voie de recherche a été la construction de grands accélérateurs, dont le premier type a été le cyclotron construit par Lawrence en Californie vers 1930. L'idée sous-jacente de ces accélérateurs était de faire faire un grand nombre de tours aux particules à l'aide d'un fort champ magnétique en les accélérant un grand nombre de fois par des champs électriques au cours de leur rotation. Des accélérateurs atteignant des énergies de plusieurs centaines de millions d'électrons-volts sont en fonctionnement en Grande-Bretagne et, grâce à la coopération de douze pays européens, un très grand accélérateur de ce type est actuellement en construction à Genève et nous espérons qu'il atteindra des énergies allant jusqu'à vingt-cinq milliards d'électrons-volts¹.

Les expériences faites à l'aide du rayonnement cosmique ou des grands accélérateurs ont révélé de nouvelles caractéristiques intéressantes de la matière. Outre les trois « briques » fondamentales de la matière – électron, proton et neutron – l'on a découvert de nouvelles particules élémentaires pouvant se créer dans ces processus à ultra-haute énergie et qui disparaissent après un bref laps de temps. Ces nouvelles particules ont des propriétés analogues à celles des anciennes, sauf leur instabilité : les plus stables ont une vie d'environ un millionième de seconde, et la vie de certaines autres est même un millier de fois plus courte. À l'heure actuelle, on connaît environ vingt-cinq différentes particules élémentaires nouvelles, la plus récemment découverte étant le proton négatif.

Ces résultats semblent à première vue éloigner de l'idée d'unité de la matière, puisque le nombre des « briques » fondamentales semble encore une fois avoir augmenté et atteindre des chiffres comparables au nombre des éléments chimiques. Mais cela serait un point de vue erroné, car les expériences ont en même temps montré que ces particules peuvent se créer à partir d'autres particules, ou tout simplement à partir de l'énergie cinétique de particules, et qu'elles peuvent de nouveau se désintégrer en d'autres particules. En fait, ces expériences ont prouvé la complète mutabilité de la matière. À des énergies suffisamment élevées, toutes les particules élémentaires peuvent se muter en d'autres particules ; ou bien elles peuvent se créer à partir d'énergie cinétique et s'annihiler pour donner de l'énergie, par exemple du rayonnement. Par conséquent, nous avons là la démonstration finale de l'unité de la matière. Toutes les particules élémentaires sont faites de la même substance, que nous pouvons appeler énergie ou matière universelle ; elles ne sont que des formes différentes sous lesquelles peut apparaître la matière.

Si nous comparons cette situation avec le concept de l'école d'Aristote sur la matière et la forme, nous pouvons dire que la matière d'Aristote, qui n'est que *potentia*, devrait être comparée à notre concept d'énergie qui

passé au « réel », à l'aide de la forme au moment où se crée la particule élémentaire.

La physique moderne ne se satisfait évidemment pas de ne donner qu'une description qualitative de la structure fondamentale de la matière ; il lui faut tenter, à l'aide de recherches expérimentales poussées, de parvenir à une formulation mathématique des lois concrètes qui déterminent les « formes » de la matière, les particules élémentaires et leurs forces. Dans cette partie de la physique, on ne peut plus établir de distinction claire entre matière et force puisque chaque particule élémentaire non seulement produit des forces et subit l'action de forces, mais représente en même temps un certain champ de forces. Le dualisme quantique des ondes et des particules fait apparaître la même entité sous forme de matière et sous forme de force.

Toutes les tentatives pour découvrir une description mathématique des lois concernant les particules élémentaires sont jusqu'à présent parties de la théorie quantique des champs. Le travail de réflexion sur les théories de ce type a commencé peu après 1930. Mais les toutes premières études dans ce sens révélèrent de sérieuses difficultés prenant naissance dans la combinaison de la théorie quantique et de la théorie de relativité restreinte. À première vue, il semblerait que ces deux théories concernent des aspects si différents de la Nature qu'elles ne devraient pratiquement rien avoir à faire l'une avec l'autre et qu'il devrait être facile de satisfaire aux conditions des deux avec le même formalisme. Mais en y regardant de plus près l'on s'aperçoit que les deux théories interfèrent en un point et que c'est de là que partent toutes les difficultés.

La théorie de relativité restreinte a révélé une structure de l'espace-temps quelque peu différente de la structure qu'on supposait en général depuis la mécanique newtonienne. La caractéristique la plus frappante de cette structure nouvellement découverte est l'existence d'une vitesse maximale qui ne peut être dépassée par aucun corps en déplacement ou

aucune impulsion, à savoir la vitesse de la lumière. Il s'ensuit que deux phénomènes qui se déroulent en des points éloignés ne peuvent avoir aucun lien causal direct s'ils se produisent à des instants tels qu'un signal lumineux, partant au moment où se produit le phénomène en *un* point, n'atteint l'autre point qu'après l'instant où s'y produit l'autre phénomène, et vice versa. Dans ce cas, on peut dire que les deux phénomènes sont simultanés. Étant donné qu'aucune action d'aucun genre, partant d'un phénomène en un point, ne peut atteindre l'autre phénomène à l'autre point, les deux phénomènes ne sont liés par aucune action causale directe.

C'est pourquoi toute action à distance, du type des forces de gravitation de la mécanique newtonienne par exemple, était incompatible avec la théorie de relativité restreinte. Cette théorie a dû remplacer de telles actions par des actions de point en point, n'atteignant à partir d'un point que les points infiniment voisins. Les expressions mathématiques les plus naturelles pour des actions de ce type sont les équations différentielles pour les ondes ou champs, invariantes dans la transformation de Lorentz. De telles équations différentielles excluent toute action directe entre phénomènes « simultanés ».

Par conséquent, la structure d'espace-temps exprimée par la théorie de la relativité restreinte impliquait une limite d'une netteté ultime entre la région de simultanéité, dans laquelle aucune action ne pouvait se transmettre, et les autres régions où pouvait se produire une action directe de phénomène à phénomène.

D'autre part, dans la théorie quantique, les relations d'incertitude posent une limite définie à la précision avec laquelle on peut mesurer simultanément positions et quantités de mouvement, ou temps et énergie. Étant donné qu'une limite infiniment nette signifie une précision infinie par rapport aux positions dans l'espace-temps, les quantités de mouvement ou les énergies doivent être complètement indéterminées – ou, en fait, des quantités de mouvement ou des énergies arbitrairement élevées doivent se

produire avec une probabilité écrasante. Donc, toute théorie qui essaie de satisfaire à la fois aux conditions de la relativité restreinte et à celles de la théorie quantique mènera à des incohérences mathématiques, à des divergences dans la région des très hautes énergies et quantités de mouvement. Cette série de conclusions pourrait peut-être ne pas sembler devoir strictement nous lier, puisque tout formalisme du type considéré est fort complexe et offrirait peut-être des possibilités mathématiques permettant d'éviter le heurt entre théorie quantique et relativité. Mais jusqu'à présent, tous les schémas mathématiques qu'on a essayés ont conduit en fait à des divergences, c'est-à-dire à des contradictions mathématiques, ou ne sont pas parvenus à satisfaire aux conditions des deux théories. Et l'on s'est facilement aperçu que les difficultés provenaient en fait du point que nous avons discuté.

Il est en soi-même très intéressant de voir de quelle manière ces schémas mathématiques convergents ne parvenaient pas à remplir les conditions de ces deux théories. Par exemple, un de ces schémas, quand on l'interprétait en termes de phénomènes réels dans l'espace-temps, conduisait à une sorte de renversement du temps : il comportait des processus dans lesquels, en un point quelconque de l'espace, se seraient soudain créées des particules dont l'énergie aurait plus tard été fournie par quelque autre processus de collision entre particules élémentaires en un autre point. Les physiciens sont convaincus par leurs expériences que des processus de ce type ne se produisent pas dans la Nature, du moins pas si les deux processus sont séparés par des distances mesurables dans l'espace-temps. Un autre schéma mathématique essayait d'éviter les divergences par un processus mathématique qu'on appelle renormalisation : il semblait possible de caser les infinités à une place du formalisme où elles ne pourraient interférer avec l'établissement des relations bien connues entre les quantités qu'on peut observer directement. En fait, ce schéma a conduit à des progrès très nets en électrodynamique quantique, car il nous rend

compte de certains détails intéressants du spectre de l'hydrogène. Une analyse plus serrée de ce schéma mathématique montra cependant qu'il était probable que les quantités qui, dans la théorie quantique normale, doivent s'interpréter comme des probabilités peuvent, dans certaines circonstances, devenir négatives dans le formalisme de renormalisation. Cela empêcherait l'emploi cohérent de ce formalisme pour décrire la matière.

On n'a pas encore découvert la solution finale de ces difficultés. Elle surgira un jour de l'accumulation de résultats expérimentaux de plus en plus précis sur les diverses particules élémentaires, sur leur apparition et sur leur disparition, sur les forces qui s'exercent entre elles. En cherchant une solution possible à ces difficultés, il faudrait peut-être se souvenir que les processus avec renversement du temps (comme celui dont nous venons de parler) ne pourraient être exclus expérimentalement s'ils se produisaient uniquement dans les régions extrêmement petites de l'espace-temps qui échappent à notre équipement expérimental actuel. On répugnerait naturellement à accepter de tels processus à renversement du temps si l'on pouvait, dans un stade ultérieur de la physique, suivre expérimentalement de tels phénomènes comme nous suivons les phénomènes atomiques ordinaires. Mais sur ce point, l'analyse de la théorie quantique et de la relativité nous aidera peut-être encore une fois à voir le problème sous un angle nouveau.

La théorie de la relativité est liée à une constante universelle de la Nature, la vitesse de la lumière. Cette constante détermine la relation entre espace et temps et est donc implicitement contenue dans toute loi concrète qui veut satisfaire aux conditions d'invariance de Lorentz. Notre langage concret et les concepts de physique classique ne peuvent s'appliquer qu'aux phénomènes pour lesquels on peut considérer la vitesse de la lumière comme pratiquement infinie.

Dans nos expériences, lorsque nous nous rapprochons de la vitesse de la lumière, nous devons nous attendre à des résultats qui ne peuvent s'interpréter dans le cadre de ces concepts.

La théorie quantique est liée à une autre constante universelle de la Nature, le quantum d'action de Planck. Une description objective des phénomènes dans l'espace-temps n'est possible que lorsque nous avons affaire à des objets ou des processus se présentant à une échelle relativement grande par rapport à laquelle on peut considérer la constante de Planck comme infiniment petite. Quand nos expériences se rapprochent de la zone où le quantum d'action devient essentiel, nous nous heurtons à toutes les difficultés à propos des concepts usuels, difficultés que nous avons discutées au début de ce livre.

Il doit exister une troisième constante universelle de la Nature. Cela est évident pour des raisons purement dimensionnelles. Les constantes universelles déterminent l'échelle de la Nature, les quantités caractéristiques qu'on ne peut réduire à d'autres. Il faut au moins trois unités fondamentales pour un ensemble complet d'unités ; cela se voit très aisément à partir de conventions comme l'emploi par les physiciens du système CGS (centimètre, gramme, seconde) : une unité de longueur, une unité de temps et une unité de masse suffisent pour former un ensemble complet, mais il en faut au moins trois. On pourrait également les remplacer par les unités de longueur, de vitesse et de masse ; ou par les unités de longueur, de vitesse et d'énergie, etc. Mais il faut au moins trois unités fondamentales. Or la vitesse de la lumière et la constante de Planck ne fournissent que deux de ces unités. Il *doit* y en avoir une troisième et seule une théorie qui contient cette troisième unité pourra déterminer les masses et autres propriétés des particules élémentaires. À en juger d'après nos connaissances actuelles de ces particules, la manière la plus appropriée d'introduire cette troisième constante serait l'hypothèse d'une longueur universelle dont la valeur devrait être d'environ 10^{-13} centimètres, c'est-à-

dire un peu inférieure aux rayons des noyaux atomiques légers. Quand on forme à partir de ces trois unités une expression qui correspond en dimensions à une masse, sa valeur est de l'ordre de grandeur des masses des particules élémentaires.

Si nous faisons l'hypothèse que les lois de la Nature contiennent *effectivement* une troisième constante universelle ayant la dimension d'une longueur et étant de l'ordre de 10^{-13} centimètres, nous devrions alors nous attendre de nouveau à ce que nos concepts usuels ne s'appliquent qu'aux régions d'espace-temps qui sont grandes par rapport à cette constante universelle. Nous serions de nouveau prêts à voir des phénomènes d'un caractère qualitativement neuf quand, dans nos expériences, nous nous rapprocherions de régions d'espace-temps plus petites que les noyaux nucléaires. Le phénomène de renversement du temps, que nous avons discuté et qui, jusqu'à présent, n'a été évoqué que par des considérations théoriques sur une possibilité mathématique, pourrait donc appartenir à ces régions plus petites. Dans ce cas, on ne pourrait probablement pas l'observer d'une manière qui permette une description à l'aide des concepts classiques. De tels processus obéiraient probablement à l'ordre habituel du temps, dans la mesure où ils pourraient être observés et décrits en termes classiques.

Mais tous ces problèmes concernent les recherches futures en physique atomique. On peut espérer que les efforts combinés des expériences dans la région à très haute énergie et de l'analyse mathématique conduiront un jour à la complète compréhension de l'unité de la matière. L'expression « complète compréhension » signifierait que les formes de la matière, au sens de la philosophie d'Aristote, apparaîtraient comme des résultats, des solutions d'un ensemble mathématique fermé représentant les lois naturelles pour la matière.

Langage et réalité en physique actuelle

Dans l'histoire des sciences, les découvertes et les idées nouvelles ont toujours suscité d'âpres discussions scientifiques, des publications polémiques critiquant ces idées nouvelles et aidant souvent par là à leur développement ; mais les critiques n'ont jamais atteint le degré de violence qu'elles ont pris à la suite de la découverte de la relativité et après la naissance de la mécanique quantique (quoique à un degré moindre). Dans ces deux cas, les problèmes scientifiques ont finalement été mêlés à des questions politiques et certains scientifiques ont eu recours à des méthodes politiques pour faire adopter leurs vues. Pour comprendre cette violente réaction à l'évolution récente de la physique, il faut se rendre compte qu'il s'agissait là d'un glissement des fondements mêmes de la physique donnant le sentiment que le terrain allait se dérober sous la science. En même temps, cette réaction signifie probablement qu'on n'a pas encore trouvé le langage correct dans lequel exprimer le nouvel état de choses et que les déclarations inexactes publiées de-ci de-là, dans l'enthousiasme de ces nouvelles découvertes, ont occasionné toutes sortes d'incompréhensions. Il s'agit bien là d'un problème fondamental : la technique expérimentale améliorée de notre époque met à portée de la science de nouveaux aspects de la Nature qui ne peuvent se décrire à l'aide des concepts ordinaires. Mais alors, dans

quel langage devrions-nous les exprimer ? En physique théorique, le premier langage qui se dégage du processus de clarification mathématique est en général un langage mathématique, un formalisme mathématique permettant de prédire les résultats d'expériences. Le physicien peut se suffire d'avoir à sa disposition ce formalisme mathématique et de savoir comment l'utiliser pour interpréter ses expériences ; mais il doit exposer ses résultats aux non-physiciens aussi, lesquels ne se contenteront pas à moins d'une explication en langage simple, compréhensible pour tous. Et même pour le physicien, l'exposé en langage simple est un critère du degré de compréhension auquel il est parvenu. Une description de ce genre est-elle possible et jusqu'à quel point ? Peut-on parler de l'atome lui-même ? Cela est un problème de langage tout autant que de physique et nous sommes donc obligés de faire certaines remarques sur le langage en général, et sur le langage scientifique en particulier.

La race humaine a formé son langage durant l'ère préhistorique en tant que moyen pour exprimer ses idées et en tant que base pour la pensée. Nous en savons fort peu sur les diverses étapes de son élaboration, mais maintenant le langage contient un grand nombre de concepts qui sont un instrument commode pour décrire avec plus ou moins de précision les événements de la vie quotidienne. Ces concepts s'acquièrent graduellement, sans analyse critique, simplement par l'emploi constant du langage ; et lorsque nous avons utilisé suffisamment souvent un mot, nous croyons savoir plus ou moins ce qu'il signifie. Naturellement, chacun sait que les mots ne sont pas aussi clairement définis qu'ils paraissent l'être au premier abord et que le domaine où ils s'appliquent est borné : par exemple, nous pouvons parler d'un morceau de fer ou d'un morceau de bois, mais pas d'un morceau d'eau ; le mot « morceau » ne s'applique pas aux liquides. Ou, pour mentionner un autre exemple, rappelons l'histoire suivante que Bohr aime à citer quand on aborde le problème de la limitation des mots.

Un petit garçon va chez l'épicier avec un sou dans sa main et demande : « Puis-je avoir un sou de bonbons assortis ? » L'épicier prend deux bonbons et les lui donne en disant : « Tiens, voilà deux bonbons. Tu pourras les assortir toi-même. » Un exemple plus sérieux du lien problématique entre mots et concepts, c'est le fait que les mots « rouge » et « vert » sont utilisés même par les daltoniens – bien que, pour eux, la portée de ces mots doive être très différente.

L'incertitude intrinsèque sur la signification des mots a naturellement été reconnue depuis longtemps et a entraîné le besoin de définitions ou – comme l'implique la construction même du mot « définition » – de frontières qui déterminent dans quels cas l'on peut ou non utiliser un mot. Mais les définitions ne peuvent être formées qu'à partir d'autres concepts, de sorte qu'on doit finalement s'appuyer sur certains concepts qu'on admet en tant que tels, sans analyse ni définition.

Le problème des concepts dans le langage a été un thème majeur de la philosophie grecque à partir de Socrate, et la vie tout entière de ce dernier – si nous en croyons l'image artistique qu'en donne Platon dans ses *Dialogues* – a été une discussion constante du contenu des concepts dans le langage, des limitations aux modes d'expression. Pour donner une base solide à la pensée scientifique, Aristote a commencé, dans sa logique, à analyser les formes du langage, la structure formelle des conclusions et déductions, indépendamment de leur contenu. Il est ainsi parvenu à un degré d'abstraction et de précision qui avait été jusque-là inconnu de la philosophie grecque, contribuant ainsi de façon immense à la clarification et à la création d'un ordre dans nos méthodes de pensée. En fait, il a créé la base du langage scientifique.

D'autre part, cette analyse logique du langage entraîne une fois de plus le danger d'un excès de simplification. En logique, l'attention est attirée vers des constructions très spéciales, des rapports sans ambiguïté entre prémisses et conclusion, des modes simples de raisonnement, mais l'on

néglige les autres constructions du langage. Or ces autres constructions peuvent naître d'associations entre divers sens des mots : par exemple, la signification secondaire d'un mot qui ne fait que passer vaguement par l'esprit quand on l'entend peut contribuer de façon essentielle au contenu de la phrase. Le fait que chaque mot peut déclencher dans notre esprit de nombreuses évolutions qui ne sont que demi-conscientes peut s'utiliser pour représenter dans le langage une partie de la réalité d'une façon bien plus claire que par l'emploi de modes logiques. C'est pourquoi les poètes ont souvent protesté contre cet accent mis sur le langage et sur le mode logique de raisonnement qui – si j'interprète correctement leurs vues – peut faire que le langage convienne moins bien à son but. Nous pouvons par exemple rappeler les paroles du *Faust* de Goethe, lorsque Méphistophélès s'adresse au jeune écolier :

Employez le temps, il nous échappe si vite !
Cependant, l'ordre vous apprendra à en gagner.
Mon bon ami, je vous conseille
Avant tout le cours de logique.
Là, on vous dressera bien l'esprit,
On vous le comprimera dans des brodequins espagnols
Pour qu'il trotte prudemment
Dans le chemin de la routine
Et ne s'avise pas de voltiger
De-ci de-là, comme un feu follet.
Ensuite, on vous apprendra tout le long du jour
Que ce que vous faites spontanément
Comme manger et boire
Se décompose forcément en un ! deux ! trois !
En vérité, il en est du travail de la pensée
Comme d'un métier de tisserand

Où un mouvement du pied agite des milliers de fils,
Où la navette monte et descend sans cesse,
Où les fils glissent invisibles,
Où mille nœuds se forment d'un seul coup.
Puis arrivera le philosophe
Qui vous démontrera qu'il doit en être ainsi,
Que si le premier est ceci et le second cela,
Le troisième et le quatrième sont forcément cela ;
Et que si le premier et le second n'existaient pas,
Il n'y aurait ni troisième ni quatrième.
Ce raisonnement fait l'admiration des étudiants de tous les pays,
Mais aucun d'eux ne s'est fait tisserand.
Celui qui veut connaître et décrire l'être vivant
Commence par en chasser l'âme ;
Alors, il a en main tous les éléments,
Il n'y manque, hélas ! que le lien spirituel¹.

Ce passage contient une admirable description de la structure du langage et de l'étroitesse des simples modes logiques.

D'autre part, la science est forcément fondée sur le langage comme seul moyen d'expression ; dans ce cas, pour lequel le problème d'absence de toute ambiguïté a une importance extrême, les modes logiques doivent jouer leur rôle. La difficulté spécifique peut se décrire de la façon suivante : en science expérimentale, nous essayons de déduire du général au particulier, de comprendre le phénomène particulier comme étant causé par de simples lois générales. Ces lois générales, une fois formulées, ne peuvent contenir que quelques concepts simples ; sinon, la loi ne serait ni simple ni générale. De ces concepts, on tire une variété infinie de phénomènes possibles, non seulement qualitativement, mais aussi avec une précision complète à propos de chaque détail. Il est évident que les concepts du langage ordinaire, avec

leur imprécision et le vague de leur définition, ne permettraient jamais de telles déductions multiples. Quand une chaîne de conclusions s'ensuit de prémisses données, le nombre de chaînons qu'on peut incorporer à la chaîne dépend de la précision des prémisses. Par conséquent, en science expérimentale, les concepts des lois générales doivent être définis avec une précision complète, et cela ne peut se faire qu'à l'aide d'abstractions mathématiques.

Pour d'autres sciences, la situation peut se montrer assez semblable dans la mesure où l'on y a également besoin de définitions relativement précises, par exemple en droit. Mais dans ce cas, le nombre de chaînons dans la chaîne de conclusions n'a pas besoin d'être très grand, la précision absolue n'est pas nécessaire et des définitions relativement précises en langage ordinaire suffisent.

En physique théorique, nous essayons de comprendre des groupes de phénomènes en introduisant des symboles mathématiques pouvant se lier aux faits, c'est-à-dire aux résultats des mesures ; comme symboles, nous utilisons des noms qui mettent en évidence leur corrélation avec la mesure, rattachant ainsi les symboles au langage ; puis ces symboles sont reliés entre eux par un système rigoureux de définitions et d'axiomes et, pour finir, les lois de la Nature sont exprimées sous forme d'équations entre les symboles. L'infinie variété des solutions de ces équations correspond alors à l'infinie variété des phénomènes particuliers possibles dans ce domaine de la Nature. C'est ainsi que l'ensemble mathématique représente le groupe de phénomènes, dans la mesure où la corrélation entre symboles et mesures est valable. C'est cette corrélation qui permet l'expression de lois concrètes à l'aide du langage ordinaire puisque nos expériences, consistant en actions et observations, peuvent toujours se décrire en langage ordinaire.

Mais en même temps que s'accroissent les connaissances scientifiques, le langage s'enrichit, lui aussi ; de nouveaux termes sont introduits et les anciens termes sont appliqués à un domaine qui s'élargit, ou d'une façon

qui diffère du langage ordinaire. Des termes comme « énergie », « électricité », « entropie », en sont des exemples évidents. C'est de cette manière que nous créons un langage scientifique qu'on peut appeler prolongement naturel du langage ordinaire, adapté aux nouveaux domaines de la connaissance scientifique.

Au XIX^e siècle, un certain nombre de nouveaux concepts ont été introduits en physique et, dans certains cas, il a fallu un temps considérable pour que les scientifiques s'habituent vraiment à les utiliser. Le terme « champ électromagnétique », par exemple, qui était déjà jusqu'à un certain point présent dans l'œuvre de Faraday et qui a plus tard formé la base de la théorie de Maxwell, ne fut pas facilement accepté par les physiciens, dont l'attention était surtout dirigée vers le mouvement mécanique des corps. L'introduction de ce concept ne représentait pas seulement un véritable changement de langage, mais aussi un véritable changement dans les idées scientifiques, et de tels changements ne s'imposent pas facilement.

Pourtant, tous les concepts introduits jusqu'à la fin du XIX^e siècle représentaient un ensemble parfaitement cohérent, applicable à un large domaine d'expériences et qui, avec les concepts antérieurs, formait un langage que non seulement les scientifiques, mais aussi les ingénieurs et techniciens pouvaient appliquer avec succès à leur travail. Parmi les idées fondamentales sous-jacentes à ce langage se trouvaient les hypothèses suivantes : l'ordre des phénomènes dans le temps est entièrement indépendant de leur ordre dans l'espace ; la géométrie euclidienne est valable dans l'espace réel ; et les phénomènes « se passent » dans l'espace-temps indépendamment du fait qu'ils sont ou non observés. On ne contestait pas que chaque observation ait une influence sur le phénomène à observer, mais on supposait en général qu'en faisant les expériences avec précaution, cette influence pouvait être rendue arbitrairement petite. Cela leur semblait en fait une condition nécessaire à l'idéal d'objectivité considéré comme la base de toute science expérimentale.

C'est dans cet état assez calme de la physique qu'éclatèrent les bombes de la théorie quantique et de la théorie de la relativité restreinte, qui déclenchèrent un glissement d'abord assez lent, puis de plus en plus rapide des bases mêmes des sciences de la Nature. Les premières discussions violentes eurent lieu autour des problèmes d'espace-temps soulevés par la théorie de la relativité. Comment devait-on parler de ce nouvel état de choses ? Devait-on considérer la contraction de Lorentz des corps en mouvement comme une contraction réelle ou seulement apparente ? Devait-on dire que la structure de l'espace-temps était vraiment différente de ce qu'on avait supposé, ou devait-on seulement dire que les résultats expérimentaux pouvaient être assemblés mathématiquement d'une manière qui correspondait à cette nouvelle structure, pendant qu'espace et temps, étant le mode universel et nécessaire par lequel les choses nous apparaissent, demeuraient ce qu'ils avaient toujours été ? À l'arrière-plan de ces nombreuses controverses, le vrai problème était qu'il n'existait aucun langage dans lequel exprimer de façon cohérente la nouvelle situation. Le langage habituel était fondé sur les anciens concepts d'espace-temps et ce langage offrait le seul moyen pour exprimer sans ambiguïté les idées sur l'organisation des expériences et sur le résultat des mesures. Or les expériences montraient que ces anciens concepts ne pouvaient s'appliquer partout.

Pour interpréter la théorie de la relativité, le point de départ évident fut donc le fait que, dans le cas limite des faibles vitesses (faibles par rapport à la vitesse de la lumière), la nouvelle théorie était pratiquement identique à l'ancienne. Par conséquent, dans cette partie de la théorie, la manière dont les symboles mathématiques devaient être liés aux mesures et aux termes du langage ordinaire était évidente ; en fait, ce n'était que grâce à cette corrélation que la transformation de Lorentz avait été découverte. Il n'y avait dans ce domaine aucune ambiguïté sur la signification des mots et des symboles. Et, pratiquement, cette corrélation suffisait déjà pour

l'application de la théorie à tout le domaine de recherche en connexion avec le problème de la relativité. Les questions controversées – savoir si la contraction de Lorentz était « réelle » ou « apparente », la question de la définition du mot « simultané », etc. – ne concernaient donc pas les faits, mais bien plutôt le langage.

Quant au langage, on s'était peu à peu aperçu qu'on ne devrait peut-être pas trop insister sur certains principes. Il est toujours difficile de trouver des critères généraux convaincants pour savoir quels termes devraient être utilisés dans le langage et comment on devrait les utiliser. Il fallait tout simplement attendre que le langage évolue, car il s'adapte après un certain temps à la situation nouvelle. Effectivement, pour la théorie de la relativité restreinte, cette adaptation s'est déjà en grande partie réalisée durant les cinquante dernières années : la distinction entre contraction « réelle » et contraction « apparente », par exemple, a tout simplement disparu ; le mot « simultané » est utilisé d'après la définition donnée par Einstein alors que, pour la définition plus large discutée au chapitre précédent, on emploie très généralement le terme « coordonnée dans l'espace-temps ».

En théorie de relativité généralisée, l'idée d'une géométrie non euclidienne dans l'espace réel fut contredite avec énergie par certains philosophes qui faisaient remarquer que toute notre méthode de préparation des expériences présupposait déjà la géométrie euclidienne.

Effectivement, si un ouvrier veut préparer une surface parfaitement plane, il peut le faire de la manière suivante : il prépare d'abord trois surfaces grossièrement planes d'à peu près la même dimension ; puis il essaie d'amener deux de ces trois surfaces en contact en les mettant l'une contre l'autre sous divers angles. Le degré avec lequel ce contact est possible sur toute la surface est une mesure du degré de précision avec lequel on peut dire que ces surfaces sont « planes ». Il ne se satisfera de ses trois surfaces que si le contact entre deux quelconques d'entre elles est complet partout. Si c'est le cas, on peut prouver mathématiquement que la

géométrie euclidienne est valable sur les trois surfaces. C'est ainsi, prétendait-on, que la géométrie euclidienne est tout simplement *rendue* correcte par nos propres mesures.

Du point de vue de la relativité généralisée, on peut naturellement rétorquer que cet argument ne démontre la validité de la géométrie euclidienne que pour les petites dimensions qui sont celles de notre équipement expérimental. La précision avec laquelle elle est valable dans ce domaine est si élevée que le procédé que nous venons d'évoquer pour obtenir des surfaces planes peut toujours s'employer ; l'on ne s'apercevra pas des déviations extrêmement légères à la géométrie euclidienne qui subsistent dans ce domaine, car les surfaces sont faites d'un matériau qui n'est pas strictement rigide et qui permet de très petites déformations ; d'ailleurs, le concept de « contact » ne peut être défini avec une précision complète. Pour les surfaces à l'échelle cosmique, le processus décrit ci-dessus ne s'appliquerait tout simplement pas ; mais il ne s'agit pas là d'un problème de physique expérimentale.

Le point de départ évident pour l'interprétation physique du formalisme mathématique de la relativité généralisée, c'est encore une fois le fait que la géométrie est très près d'être euclidienne pour les petites dimensions ; la théorie tend vers la théorie classique dans ce domaine et la corrélation entre les symboles mathématiques et mesures et les concepts du langage ordinaire y est donc dépourvue d'ambiguïté. Pourtant, on peut parler de géométrie non euclidienne pour les grandes dimensions. En fait, longtemps avant que la théorie de relativité généralisée ait été conçue, la possibilité d'une géométrie non euclidienne dans l'espace réel avait été envisagée par les mathématiciens, et surtout par Gauss : faisant des mesures géodésiques très précises sur un triangle formé par trois montagnes – le Brocken dans les montagnes du Harz, l'Inselsberg en Thuringe et le Hohe Hagen près de Göttingen – on raconte qu'il a pris très grand soin de vérifier si la somme des trois angles était effectivement égale à 180° , et qu'il considérait comme

possible une différence démontrant des écarts à la géométrie euclidienne. En fait, il n'en constata aucune dans la limite de précision de ses mesures.

En relativité généralisée, le langage avec lequel nous décrivons les lois générales suit maintenant en fait le langage scientifique des mathématiciens et, pour la description des expériences elles-mêmes, nous pouvons utiliser les concepts ordinaires puisque la géométrie euclidienne est valable avec une précision suffisante pour les petites dimensions.

Mais c'est la théorie quantique qui soulève le plus de difficultés concernant l'emploi du langage. Nous n'avons là au premier abord aucun guide simple pour relier les symboles mathématiques et les concepts du langage ordinaire ; et la seule chose que nous sachions au départ, c'est que nos concepts habituels ne peuvent s'appliquer à la structure des atomes. Le point de départ qui s'impose pour l'interprétation physique du formalisme semble être, encore une fois, le fait que l'ensemble mathématique de la mécanique quantique se rapproche de la mécanique classique pour des dimensions qui sont grandes comparées à celles des atomes. Mais là encore cette affirmation demande certaines réserves ; même pour les grandes dimensions, il existe de nombreuses solutions des équations quantiques qui n'ont pas d'analogues en physique classique. Pour ces solutions, le phénomène « d'ingérence des probabilités » se présenterait, ainsi que nous l'avons exposé auparavant, et ce phénomène n'existe pas en physique classique. Donc, même dans la limite des grandes dimensions, la corrélation entre symboles mathématiques, mesures et concepts ordinaires n'est aucunement à négliger. Pour parvenir à une corrélation qui soit dépourvue de toute ambiguïté, il faut tenir compte d'une autre caractéristique du problème : il faut observer que le système traité par les méthodes quantiques appartient en fait à un système bien plus grand (et finalement au Monde entier) et qu'il est en interaction avec ce grand système ; il faut ajouter que les propriétés microscopiques du grand système sont en grande partie inconnues. Cette affirmation est indubitablement une description

correcte de la situation de fait. Le système échappant aux mesures et aux études théoriques n'appartiendrait pas réellement au monde des phénomènes s'il n'avait pas d'interactions avec le système plus grand dont l'observateur fait partie. L'interaction avec le grand système aux propriétés microscopiques non définies introduit alors un nouvel élément statistique dans la description (quantique ou classique) du système considéré. Dans le cas limite des grandes dimensions, cet élément statistique détruit l'effet « d'ingérence des probabilités », de sorte que le formalisme quantique se rapproche alors du formalisme classique à la limite. Par conséquent, la corrélation entre les symboles mathématiques de la théorie quantique et les concepts du langage ordinaire est alors dépourvue d'ambiguïté, et cette corrélation suffit pour interpréter les expériences. Les problèmes qui nous restent à résoudre concernent de nouveau le langage plutôt que les faits, puisque c'est faire partie du concept « fait » que de pouvoir être décrit en langage ordinaire.

Mais les problèmes de langage sont réellement sérieux dans ce cas. Nous désirons pouvoir exprimer d'une manière quelconque la structure des atomes et pas seulement les « faits », ces derniers étant, par exemple, les taches noires sur une plaque photographique ou les minuscules gouttes d'eau dans une chambre de Wilson. Or nous ne pouvons parler des atomes en employant le langage ordinaire.

Nous pouvons maintenant pousser l'analyse plus loin, et cela de deux manières entièrement différentes : soit nous pouvons demander quel est le langage concernant les atomes qui s'est effectivement développé chez les physiciens durant les trente années qui se sont écoulées depuis qu'on a formulé la théorie quantique ; ou bien nous pouvons décrire les tentatives faites pour définir un langage scientifique précis correspondant au schéma mathématique.

Dans le premier cas, on peut dire que le concept de complémentarité introduit par Bohr dans l'interprétation de la théorie quantique a encouragé

les physiciens à utiliser un langage ambigu plutôt que non ambigu, à utiliser les concepts d'une manière plutôt vague en conformité avec le principe d'incertitude, à appliquer alternativement différents concepts classiques qui mèneraient à des contradictions si on les utilisait simultanément. C'est ainsi qu'on parle d'orbites électroniques, d'ondes corpusculaires et de densité de charge, d'énergie et de quantité de mouvement, etc., sans jamais perdre conscience du fait que le domaine où peuvent s'appliquer ces concepts est très limité. Quand cet emploi vague et non systématique du langage mène à des difficultés, le physicien est forcé de se rabattre sur le schéma mathématique et sur sa corrélation sans ambiguïté avec les faits expérimentaux.

À de nombreux points de vue, cet emploi du langage est parfaitement satisfaisant, car il nous rappelle un emploi analogue du langage dans la vie quotidienne ou en poésie. Nous nous rendons compte que la situation de complémentarité ne se restreint pas au seul monde atomique : nous nous trouvons dans la même situation quand nous réfléchissons à une décision et à nos motifs pour la prendre, ou quand nous avons le choix entre jouir de la musique et analyser sa structure. D'autre part, les concepts classiques utilisés de cette manière gardent toujours un certain flou, ils ne prennent vis-à-vis de la « réalité » que la même signification statistique que celle qu'ont les concepts de la thermodynamique classique par rapport à leur interprétation statistique. C'est pourquoi il peut être utile de discuter brièvement de ces derniers concepts.

En thermodynamique classique, le concept « température » semble décrire une caractéristique objective de la réalité, une propriété objective de la matière. Dans la vie quotidienne, il est très facile de définir à l'aide d'un thermomètre ce que nous voulons dire lorsque nous déclarons qu'un morceau de matière est à une certaine température. Mais quand nous essayons de définir ce que pourrait vouloir dire la température d'un atome, nous nous trouvons devant une situation bien plus délicate, même en

physique classique. En fait, il nous est impossible de lier ce concept « température de l'atome » avec une propriété bien définie de l'atome et il nous faut le lier, du moins partiellement, à notre connaissance insuffisante de cet atome. Nous pouvons lier la valeur de la température avec certaines probabilités statistiques sur les propriétés de l'atome, mais il semble assez douteux qu'une telle probabilité doive être traitée d'objective. Le concept « température de l'atome » n'est pas mieux défini que ne l'était le concept « assorti » dans l'histoire du petit garçon qui achetait des bonbons.

De même, en théorie quantique, tous les concepts classiques, une fois appliqués à l'atome, ne sont qu'aussi bien ou aussi mal définis que la « température de l'atome » ; ils sont liés à des probabilités statistiques ; et cette probabilité ne peut que dans de rares cas devenir un équivalent de la certitude. Là encore, comme en thermodynamique classique, il est difficile de déclarer que cette probabilité est objective. On pourrait peut-être la traiter de tendance ou de possibilité objective, de *potentia*, au sens de la philosophie aristotélicienne. En fait, je crois que le langage effectivement utilisé par les physiciens lorsqu'ils parlent de phénomènes atomiques implique dans leur esprit des notions analogues à celles du concept *potentia*. De sorte que les physiciens se sont graduellement habitués à considérer les orbites électroniques, etc., non comme des réalités, mais comme un genre de *potentia*. Le langage s'est déjà adapté (jusqu'à un certain point du moins) à cette situation de fait. Mais ce n'est pas un langage précis dans lequel on puisse utiliser des modes logiques ; c'est un langage qui crée dans notre esprit des images et, en même temps, la notion que ces images n'ont qu'un vague rapport avec la réalité, qu'elles ne représentent qu'une tendance vers la réalité.

Le vague de ce langage qu'emploient les physiciens a donc conduit à des tentatives pour définir un autre langage précis qui suivrait des modes logiques définis en totale conformité avec le schéma mathématique de la théorie quantique. Le résultat de ces tentatives de Birkhoff et Neumann et,

plus récemment, de Weizsäcker, peut s'exprimer en disant que le formalisme mathématique de la théorie quantique peut s'interpréter comme une extension ou modification de la logique classique. Il existe en particulier un principe fondamental de logique classique qui semble avoir besoin d'être modifié : en logique classique, si une affirmation a le moindre sens, on suppose que soit elle, soit sa négation doit être vraie. Entre « Il y a ici une table » ou « Il n'y a pas de table ici », soit l'une, soit l'autre de ces deux affirmations doit être vraie : *tertium non datur*, il n'existe pas de troisième possibilité, c'est le principe du tiers exclu. Il est possible que nous ignorions laquelle des deux est vraie, mais dans la « réalité », seule l'une des deux est vraie.

En théorie quantique, il faut modifier cette loi du « tiers exclu ». Si l'on désire protester contre toute modification de ce principe fondamental, on peut immédiatement rétorquer que ce principe est implicitement admis en langage ordinaire et que c'est dans ce langage qu'il nous faut nous exprimer, tout au moins quand nous voulons parler de notre modification finale de la logique. Par conséquent, ce serait se contredire que de décrire en langage ordinaire un raisonnement logique qui ne s'applique pas dans ce langage. Mais là encore Weizsäcker fait remarquer qu'on peut distinguer plusieurs niveaux du langage.

Un de ces niveaux concerne les objets, par exemple les atomes ou les électrons ; un deuxième niveau concerne les affirmations sur les objets ; un troisième pourrait concerner les affirmations à propos d'affirmations sur les objets, etc. Il serait alors possible d'avoir des modes logiques divers pour les différents niveaux. Il est vrai que nous avons finalement à revenir au langage naturel et, par suite, aux raisonnements de logique classique ; mais Weizsäcker suggère que la logique classique pourrait être de même un *a priori* de la logique quantique, comme la physique classique est un *a priori* de la théorie quantique. La logique classique serait alors contenue dans la

logique quantique comme sorte de cas limite, mais c'est la logique quantique qui constituerait le raisonnement logique le plus général.

La modification possible du mode de logique classique s'appliquerait alors tout d'abord au niveau qui concerne les objets. Considérons un atome se déplaçant dans une boîte fermée divisée par une cloison en deux parties égales, la cloison comportant un petit trou par lequel peut passer l'atome. Dans ce cas, d'après la logique classique, l'atome est soit dans la moitié gauche, soit dans la moitié droite de la boîte ; il n'existe pas de troisième possibilité, il y a « tiers exclu ». Mais en théorie quantique, il nous faut admettre – si nous utilisons les mots « atome » et « boîte » – qu'il existe d'autres possibilités qui sont d'étranges mélanges des deux possibilités précédentes ; cela nous est indispensable pour rendre compte des résultats de nos expériences. Nous pourrions par exemple observer la lumière diffusée par l'atome et faire trois expériences : 1. l'atome est enfermé dans la moitié gauche de la boîte (par exemple en fermant le trou de la cloison) et l'on mesure la distribution d'intensité de la lumière diffusée ; 2. on l'enferme dans la moitié droite et l'on mesure de nouveau la lumière diffusée ; 3. l'atome peut circuler librement dans toute la boîte et l'on mesure encore une fois la distribution d'intensité. Si l'atome était toujours soit dans une des moitiés, soit dans l'autre, la distribution d'intensité pour la troisième expérience devrait être un mélange (dépendant du temps passé par l'atome dans chacune des deux moitiés) des deux premières distributions d'intensité. Mais en général cela n'est pas vrai expérimentalement : la vraie distribution d'intensité est modifiée par « l'ingérence des probabilités », ainsi que nous l'avons déjà discuté.

Pour tenir compte de cette situation, Weizsäcker a introduit le concept « degré de vérité ». Pour toute simple affirmation, quand il s'agit d'une alternative comme « l'atome est dans la moitié gauche (ou droite) de la boîte », on définit un nombre complexe comme mesure du « degré de vérité » de cette affirmation. Si ce nombre est 1, cela signifie que

l'affirmation est vraie ; s'il est 0, qu'elle est fausse ; mais d'autres valeurs sont possibles. Le carré du module du nombre complexe donne la probabilité que l'affirmation soit exacte ; la somme des deux probabilités concernant les deux branches de l'alternative (être « à gauche » ou « à droite » dans notre exemple) est forcément l'unité. Mais chaque paire de nombres complexes concernant les deux branches de l'alternative représente, d'après les définitions de Weizsäcker, une « affirmation » qui est certainement vraie si les nombres ont exactement ces valeurs ; les deux nombres suffisent par exemple à déterminer la distribution d'intensité de la lumière diffusée dans notre expérience. Si l'on admet l'emploi du mot « affirmation » de cette manière, on peut introduire le terme « complémentarité » par la définition suivante : chaque affirmation qui n'est pas identique à une des deux affirmations du début (dans notre cas, « l'atome est dans la moitié gauche » ou « l'atome est dans la moitié droite ») est appelée complémentaire de ces affirmations. Pour chaque affirmation complémentaire, la question de savoir si l'atome est à gauche ou à droite n'est pas décidée. Mais le terme « pas décidée » n'est aucunement équivalent au terme « pas connue » ; ce dernier signifierait que l'atome est « réellement » à gauche ou à droite et que nous ne savons lequel ; mais « pas décidée » indique une situation différente qu'on ne peut exprimer que par une affirmation complémentaire.

Ce mode général de logique (dont nous ne pouvons décrire les détails ici) correspond précisément au formalisme mathématique de la théorie quantique. Il forme la base d'un langage précis qui peut être utilisé pour décrire la structure de l'atome. Mais les applications d'un tel langage soulèvent un certain nombre de problèmes difficiles, parmi lesquels nous n'en discuterons que deux : la relation entre les différents « niveaux » de langage et les conséquences de l'ontologie sous-jacente.

En logique classique, la relation entre les différents niveaux de langage est une correspondance univoque. Les deux affirmations – « l'atome est

dans la moitié gauche », et « il est vrai que l'atome est dans la moitié gauche » – appartiennent logiquement à des niveaux différents. En logique classique, ces affirmations sont complètement équivalentes, c'est-à-dire qu'elles sont toutes deux vraies ou toutes deux fausses, et il est impossible que l'une soit vraie et l'autre fausse. Mais dans le mode logique de la complémentarité, cette relation est plus compliquée : la justesse ou la fausseté de la première implique encore la justesse ou la fausseté de la seconde ; mais la fausseté de la seconde n'implique pas la fausseté de la première. Si la seconde est fausse (« Il n'est pas vrai que l'atome soit dans la moitié gauche »), cela n'implique pas nécessairement qu'il soit dans la moitié droite ; la question peut être « non décidée ». Il y a encore complète équivalence entre les deux niveaux de langage pour l'exactitude d'une affirmation, mais non pour son inexactitude. À partir de là, on peut comprendre la persistance des lois classiques en théorie quantique : chaque fois qu'un résultat net peut se déduire d'une expérience par l'application des lois classiques, le résultat se déduira également par les lois quantiques et sera valable expérimentalement.

Le but de la tentative de Weizsäcker est d'appliquer aussi les modes logiques modifiés aux niveaux plus élevés du langage, mais nous ne pouvons exposer ici ces questions.

L'autre problème concerne l'ontologie sur laquelle reposent ces modes logiques modifiés. Si la paire de nombres complexes représente une « affirmation » au sens que nous venons de décrire, il devrait exister dans la Nature un « état » ou une « situation » pour lequel ou laquelle l'affirmation soit exacte. C'est sous cet aspect que nous utiliserons le mot « état ». Les « états » qui correspondent aux affirmations complémentaires sont alors appelés « états coexistants » par Weizsäcker. Ce terme « coexistant » décrit correctement la situation ; en fait, il serait difficile de les appeler « états différents » puisque chaque état contient aussi jusqu'à un certain point les autres « états coexistants ». Ce concept d'« état » formerait alors une

première définition concernant l'ontologie de la théorie quantique. On voit immédiatement que cet emploi du mot « état », et en particulier du mot « état coexistant », est si différent de l'ontologie matérialiste habituelle qu'on peut douter que cet emploi soit une terminologie commode. D'autre part, si l'on considère le mot « état » comme décrivant une potentialité quelconque plutôt qu'une réalité – on pourrait même simplement remplacer le terme « état » par le terme « potentialité » –, alors le concept de « potentialité coexistante » est tout à fait raisonnable, puisqu'une potentialité peut comporter tout ou partie d'autres potentialités.

Toutes ces différentes définitions et distinctions peuvent s'éviter si l'on restreint le langage à décrire les faits, c'est-à-dire les résultats expérimentaux. Cependant, si l'on désire parler des particules atomiques elles-mêmes, il faut soit employer le formalisme mathématique comme seul supplément au langage normal, soit le combiner avec un langage qui ne se serve que d'une logique modifiée ou qui n'utilise aucune logique bien définie. Dans les expériences sur les phénomènes atomiques, nous avons affaire à des choses et à des faits, à des phénomènes qui sont tout aussi réels que les phénomènes de la vie quotidienne. Mais les atomes ou les particules élémentaires ne sont pas aussi réels ; ils forment un monde de potentialités ou de possibilités plutôt qu'un monde de choses ou de faits.

11.

Rôle de la physique moderne dans l'évolution actuelle de la pensée humaine

Dans les chapitres précédents, nous avons discuté des répercussions philosophiques de la physique moderne pour montrer que cette partie la plus moderne de la science touche en de nombreux points à de très anciens courants de pensée et envisage sous un angle nouveau de très vieux problèmes. D'une façon tout à fait générale, il est probablement vrai que les évolutions les plus fécondes dans l'histoire de la pensée humaine se produisent très fréquemment là où se rencontrent deux courants de pensée différents. Ceux-ci peuvent avoir pris naissance dans des domaines culturels très éloignés, à plusieurs époques, dans des milieux culturels différents et provenir de traditions religieuses diverses, de sorte que lorsqu'ils se rencontrent, c'est-à-dire qu'ils ont suffisamment de points de contact pour qu'une réelle interaction puisse se produire, on peut espérer que s'ensuivront de nouvelles et intéressantes évolutions. La physique atomique, faisant partie de la science moderne, pénètre maintenant dans des régions à traditions culturelles fort différentes : elle est enseignée non seulement en Europe et dans les pays occidentaux, où elle fait partie des activités traditionnelles des sciences expérimentales, mais aussi dans des

pays comme le Japon, la Chine et l'Inde, avec leur passé culturel entièrement différent, et comme la Russie où, de notre temps, s'est créée une nouvelle manière de penser qui se rattache à la fois aux développements scientifiques spécifiques à l'Europe du XIX^e siècle et aux traditions entièrement différentes de la Russie elle-même. Ce chapitre n'a certes pas pour but de faire des prévisions sur le résultat possible de la rencontre entre idées de la physique nouvelle et anciennes traditions. Mais il n'est peut-être pas impossible de définir les points à partir desquels l'interaction entre idées différentes peut prendre forme.

Étudiant ce processus d'évolution de la physique moderne, il serait sans aucun doute impossible de le séparer de l'évolution générale des sciences expérimentales, de l'industrie et de la technique, de la médecine, etc., c'est-à-dire, d'une façon tout à fait générale, de la civilisation moderne dans toutes les parties du Monde. La physique moderne n'est qu'un chaînon dans la longue chaîne d'événements qui a débuté par l'œuvre de Bacon, de Galilée et de Kepler et par les applications pratiques des sciences de la Nature pendant les XVII^e et XVIII^e siècles. Dès le début, le lien entre les sciences expérimentales et la technique a été celui d'une aide mutuelle ; le progrès des techniques scientifiques, l'amélioration des instruments, l'invention de nouveaux dispositifs techniques ont fourni la base d'une connaissance empirique toujours plus précise de la Nature ; ces progrès et, pour finir, la formulation mathématique des lois de la Nature ont ouvert la voie à de nouvelles applications techniques de cette connaissance. Par exemple, l'invention du télescope a permis aux astronomes de mesurer avec plus de précision le mouvement des étoiles, permettant ainsi un progrès considérable de l'astronomie et de la mécanique. D'autre part, une connaissance précise des lois de la mécanique était d'une valeur immense pour l'amélioration des instruments mécaniques servant à la construction des moteurs, etc.

Le grand développement de cette combinaison des sciences de la Nature et des sciences techniques prit son essor quand on réussit à mettre à la disposition de l'homme certaines des forces de la Nature. L'énergie entreposée dans le carbone, par exemple, a pu alors prendre en partie la relève du travail qui devait jusque-là être accompli par l'homme. Les industries qui s'édifièrent grâce à ces nouvelles possibilités purent d'abord être considérées comme la suite et le développement naturel des activités anciennes, car, à de nombreux points de vue, le travail des machines ressemblait encore au travail fait à la main ; et l'on pouvait considérer ce qui se fabriquait dans les usines chimiques comme la suite du travail dans les teintureries et les pharmacies d'antan. Mais de nouvelles branches d'industrie se développèrent plus tard qui n'avaient pas d'analogue dans le passé, par exemple l'industrie électrique. La pénétration de la science dans les parties les plus reculées de la Nature permit aux ingénieurs d'utiliser des forces naturelles qu'on connaissait à peine auparavant ; et la connaissance précise de ces forces, à l'aide de la formulation mathématique des lois qui les régissent, formait une base solide pour construire toutes sortes de machines.

L'immense succès de cet agrégat de science et de technique conduisit à une forte prépondérance des nations et communautés où prospérait ce genre d'activité humaine. Il s'ensuivit, conséquence bien normale, que les nations que leurs traditions n'auraient pas poussées vers ces sciences et techniques durent s'y livrer aussi. Les moyens modernes de communication et de commerce international complétèrent enfin ce processus de développement de la civilisation technique. Il est indubitable que cette civilisation a changé fondamentalement les conditions de vie sur notre globe ; qu'on l'approuve ou non, qu'on considère cela comme un danger ou un progrès, il faut bien admettre que ce processus a depuis longtemps échappé à tout contrôle par les forces humaines. Il faut plutôt le considérer comme un processus biologique à immense échelle par lequel les structures actives de

l'organisme humain empiètent sur de plus grands domaines de la matière et transforment celle-ci en un état qui convient à la population humaine croissante.

La physique moderne appartient aux parties les plus récentes de cette évolution et son résultat malheureusement le plus visible, l'invention des armes nucléaires, a montré l'essence de cette évolution sous son jour le plus vif. D'une part, en prouvant que les changements introduits par l'association science et technique ne peuvent être envisagés uniquement sous leur angle optimiste ; ce qui justifie (du moins en partie) les vues de ceux qui mettaient constamment l'homme en garde contre les dangers d'une transmutation aussi radicale de nos conditions naturelles de vie. D'autre part, même les nations et individus qui essayaient de se tenir à l'écart de ces dangers se sont vus forcés d'accorder l'attention la plus aiguë à cette nouvelle évolution, puisqu'il était évident que le pouvoir politique (au sens du pouvoir militaire) reposait sur la possession des armes atomiques. Le but de ce livre n'est pas de discuter à fond des conséquences politiques de la physique nucléaire ; on peut cependant dire quelques mots de ces problèmes, puisqu'ils sont toujours les premiers à être évoqués dans l'esprit des gens lorsqu'on parle de physique atomique.

Il est évident que l'invention des armes nouvelles et surtout des armes thermonucléaires a changé fondamentalement la structure politique du Monde. Le concept de nation ou d'État indépendant a subi un changement décisif – puisque toute nation qui ne possède pas ces armes doit dépendre d'une façon quelconque des très rares nations qui les produisent en grande quantité – et toute tentative pour faire la guerre à grande échelle à l'aide d'armes nucléaires est maintenant devenue pratiquement un genre absurde de suicide. C'est pourquoi l'on entend fréquemment énoncer le point de vue optimiste selon lequel ces inventions ont rendu la guerre périmée, de sorte qu'elle ne se produira plus. Malheureusement, ce point de vue simpliste est bien trop optimiste : au contraire, l'absurdité de la guerre thermonucléaire

peut (en première approximation) agir comme un stimulant à la guerre à petite échelle. Toute nation, tout groupe politique convaincu de son droit historique ou moral à imposer un certain changement dans la situation estimera que l'emploi des armes classiques pour ce but n'entraînera pas de bien grands risques ; et ce camp supposera que l'autre côté n'aura sûrement pas recours aux armes nucléaires, car, étant historiquement ou moralement dans son tort, il ne risquera pas la possibilité d'une guerre à grande échelle. Cette situation poussera à leur tour les autres nations à déclarer que, au cas où de petites guerres leur seraient infligées par des agresseurs, elles auraient effectivement recours aux armes nucléaires, de sorte que le danger subsiste visiblement. Il est très possible que dans vingt ou trente ans le Monde ait passé par de tels changements que le risque de guerre à grande échelle et d'application de toutes les ressources techniques à l'annihilation de l'adversaire ait fortement diminué ou même disparu, mais la période d'évolution vers ce nouvel état de choses sera hérissée des pires dangers. Nous devons comprendre que, comme dans les temps anciens, ce qui paraît historiquement ou moralement juste à un camp peut sembler injuste à l'autre. Le maintien du *statu quo* peut ne pas être toujours la juste solution ; au contraire, il peut être beaucoup plus important de découvrir des moyens pacifiques pour s'adapter aux situations nouvelles, alors que, dans de nombreux cas, il serait extrêmement difficile de trouver une décision juste. Ce n'est donc peut-être pas faire preuve d'un excès de pessimisme que de dire qu'on ne parviendra à éviter une grande guerre que si tous les groupes politiques sont prêts à renoncer à une partie de leurs droits apparemment les plus évidents, car le juste et l'injuste peuvent paraître essentiellement différents vus de l'autre bord. Ce point de vue n'est certes pas neuf ; en fait, il n'est qu'une application de l'attitude humaine que certaines des grandes religions ont enseignée durant de nombreux siècles.

L'invention des armes nucléaires a également soulevé des problèmes entièrement nouveaux pour la science et les scientifiques. L'influence

politique de la science est devenue beaucoup plus forte qu'elle ne l'était avant la Seconde Guerre mondiale et ce fait a imposé au scientifique et surtout à l'atomiste une double responsabilité : soit il peut prendre au gouvernement du pays une part active en rapport avec l'importance de la science pour la communauté ; il aura alors finalement à faire face à la responsabilité de décisions d'un poids énorme, décisions qui dépassent de loin le petit cercle du travail de recherche ou universitaire auquel il était habitué. Soit il peut volontairement se retirer de toute participation aux décisions politiques ; il sera alors quand même responsable des fausses décisions qu'il aurait peut-être pu empêcher s'il n'avait préféré la vie paisible du savant. Le devoir des scientifiques est visiblement d'informer en détail leur gouvernement de la destruction sans précédent qu'entraînerait une guerre à armes thermonucléaires. Mais en dehors de cela, on demande fréquemment aux scientifiques de participer à des résolutions solennelles pour la paix mondiale ; sur ce point, je dois avouer que je n'ai jamais pu voir la moindre utilité à des déclarations de ce genre : ces résolutions peuvent sembler une preuve de bonne volonté qui est la bienvenue, mais quiconque parle en faveur de la paix sans préciser les conditions de cette paix est forcément soupçonné de ne parler que du genre de paix que lui ou son groupe trouve le meilleur, ce qui serait naturellement entièrement dépourvu de valeur. Toute honnête déclaration en faveur de la paix doit être une énumération des sacrifices qu'on est prêt à faire pour la préserver. Or, en règle générale, les scientifiques n'ont pas autorité pour faire de telles déclarations.

Mais en même temps, le scientifique peut faire de son mieux pour promouvoir la coopération internationale dans son propre domaine. La grande importance que de nombreux gouvernements attachent actuellement à la recherche nucléaire, le fait que le niveau des travaux scientifiques dans les différents pays est encore très inégal, tout cela favorise la coopération internationale dans ce domaine. De jeunes scientifiques de nombreux pays

ont la possibilité de se réunir dans des instituts de recherche où règne une grande activité en physique moderne ; et le travail en commun sur des problèmes scientifiques délicats stimulera la compréhension mutuelle. Dans un cas précis, celui de l'organisme de Genève, il a même été possible d'arriver à un accord entre un certain nombre de nations pour construire un laboratoire commun et pour fabriquer, grâce à cet effort combiné, le coûteux équipement expérimental qu'exige la recherche nucléaire. Ce genre de coopération aidera certainement à créer entre les jeunes générations de scientifiques une attitude commune envers les problèmes de la science, attitude commune qui dépasse même les problèmes purement scientifiques. On ne sait naturellement pas d'avance ce qui germera du grain ainsi semé lorsque ces scientifiques retourneront dans leur ancien milieu et prendront de nouveau part à leurs propres traditions culturelles. Mais il n'est guère douteux que l'échange d'idées entre jeunes scientifiques de différents pays (et entre différentes générations dans chaque pays) aidera à prendre pied sans trop de tensions dans le nouvel état de choses où se créera l'équilibre entre les vieilles forces traditionnelles et les nécessités inéluctables de la vie moderne. Il est une caractéristique de la science qui la rend plus appropriée que toute autre chose à créer le premier lien solide entre traditions culturelles différentes : c'est le fait que la décision ultime sur la valeur d'un travail scientifique donné, sur ce qui est exact ou faux dans un travail, ne dépend d'aucune autorité humaine. Il faut parfois bien des années avant qu'on connaisse la solution d'un problème, avant de pouvoir distinguer entre la vérité et l'erreur, mais en définitive les questions se décideront et les décisions seront prises non par un quelconque groupe scientifique, mais par la Nature. C'est pourquoi les idées scientifiques se répandent parmi ceux qui se passionnent pour elles d'une manière qui diffère entièrement de la propagation des idées politiques.

Alors que les idées politiques peuvent prendre une grande influence sur les masses populaires simplement parce qu'elles correspondent ou semblent

correspondre aux intérêts primordiaux du peuple, les idées scientifiques ne se répandent que parce qu'elles sont justes. Il existe des critères objectifs et décisifs nous assurant qu'une affirmation scientifique est exacte.

Naturellement, ce que nous avons dit de la coopération internationale et de l'échange des idées s'applique à toutes les branches de la science et n'est aucunement l'apanage de la physique atomique. La physique moderne n'est à ce sujet qu'une des nombreuses parties de la science ; et même si ses applications techniques – les armes et l'utilisation pacifique de l'énergie atomique – donnent à cette branche un poids spécial, il n'y a pas de raison pour considérer la coopération internationale dans ce domaine comme beaucoup plus importante que dans n'importe quel autre domaine. Mais il est nécessaire que nous discutons une fois de plus les caractéristiques de la physique actuelle qui diffèrent essentiellement du développement antérieur des sciences expérimentales ; et pour cela il nous faut revenir encore une fois à l'histoire européenne de cette évolution, née de l'association entre la science et la technologie.

Les historiens se sont souvent demandé si le progrès des sciences expérimentales après le XVI^e siècle était une conséquence naturelle des courants antérieurs de la pensée humaine. On peut prétendre que certaines tendances de la philosophie chrétienne ont conduit à un concept très abstrait de la Divinité et qu'elles ont placé Dieu si haut au-dessus du Monde qu'on commença à considérer le Monde sans voir en même temps Dieu dans le Monde ; le partage cartésien peut être envisagé comme l'étape finale de cette évolution. Ou bien l'on peut faire remarquer que les controverses théologiques du XVI^e siècle avaient provoqué un mécontentement général envers les problèmes qui ne pouvaient être vraiment réglés par la raison et qui étaient exposés aux luttes politiques de l'époque, et que ce mécontentement favorisait l'intérêt pour les problèmes qui se trouvaient être entièrement en dehors des luttes théologiques. Ou bien encore l'on peut tout simplement se référer à l'immense activité et au nouvel esprit qui

avaient surgi dans les sociétés européennes de la Renaissance. De toute manière, une nouvelle autorité était apparue – complètement indépendante de la religion ou de la philosophie chrétienne ou de l'Église – autorité de l'expérience, du fait empirique. On peut faire remonter cette autorité aux plus anciennes tendances philosophiques, par exemple à la philosophie d'Occam et de Duns Scot ; mais elle ne devint une force vitale de l'activité humaine qu'à partir du XVI^e siècle : Galilée ne se contenta pas de *penser* aux mouvements mécaniques, au pendule ou à la pierre qui tombe ; il chercha par des expériences quantitatives à voir comment se produisaient ces mouvements. Cette nouvelle activité n'avait certes pas à ses débuts l'intention de représenter une déviation à la religion chrétienne traditionnelle ; au contraire, on parlait de deux sortes de révélations de Dieu : l'une était inscrite dans la Bible et l'autre avait à être découverte dans le grand livre de la Nature. Les Saintes Écritures avaient été écrites par l'homme, donc étaient sujettes à l'erreur, alors que la Nature était l'expression directe des intentions de Dieu.

Mais l'accent mis sur l'expérience n'était pas sans rapport avec un changement lent et graduel des aspects de la réalité. Alors qu'au Moyen Âge, ce que nous appelons maintenant la signification symbolique d'une chose était dans un certain sens sa réalité primordiale, l'aspect de la réalité évolua ensuite vers ce que nous pouvons percevoir par nos sens : ce que nous pouvons voir et toucher devint la réalité primordiale. Et ce nouveau concept de réalité pouvait se relier à une activité nouvelle : l'on pouvait faire des expériences et voir ce que les choses *étaient*. On s'aperçut facilement que cette nouvelle attitude signifiait un envol de l'esprit humain vers un immense domaine de nouvelles possibilités ; et il est bien compréhensible que l'Église ait perçu dans ce nouveau mouvement les dangers plutôt que les espoirs ; le célèbre procès fait à Galilée à propos de ses vues sur le système de Copernic marqua le début d'une lutte qui se poursuivit pendant plus d'un siècle. Dans cette controverse, les partisans

des sciences expérimentales pouvaient prétendre que l'expérience offre une vérité indéniable, qu'on ne peut laisser une autorité humaine quelconque décider de ce qui se passe réellement dans la Nature et que cette décision est prise par la Nature elle-même ou, dans un sens, par Dieu. Les partisans de la religion traditionnelle, de leur côté, pouvaient prétendre qu'en accordant trop d'attention au monde matériel, à ce que nos sens perçoivent, nous perdons le lien avec les valeurs essentielles de la vie humaine, avec justement cette partie de la réalité qui échappe au monde matériel. Ces deux positions n'ont aucun point de contact, de sorte que le problème ne pouvait se régler par aucun accord ou aucune décision.

Pendant ce temps, les sciences expérimentales commençaient à dégager une image plus claire et plus large du monde matériel. En physique, il fallait décrire cette image à l'aide de concepts qu'aujourd'hui nous appelons les concepts de physique classique. Le Monde consistait en choses qui existent dans l'espace et le temps ; ces choses sont faites de matière ; la matière peut produire des forces et subir l'action de celles-ci. Les phénomènes découlent de l'interaction entre matière et forces ; chaque phénomène est à la fois résultat et cause d'autres phénomènes. En même temps, l'attitude humaine envers la Nature passa d'une attitude contemplative à une attitude pragmatique : l'on ne s'intéressait pas tant à la Nature telle qu'elle est, mais plutôt à ce qu'on pourrait en faire. C'est pourquoi les sciences expérimentales se transformèrent en techniques ; tout progrès de la connaissance fut lié avec l'usage pratique qu'on pouvait en tirer. Cela était vrai non seulement en physique, mais l'attitude était essentiellement la même en chimie et en biologie ; et le succès des nouvelles méthodes appliquées à la médecine et à l'agriculture contribua essentiellement à la propagation des nouvelles tendances.

C'est ainsi que, pour finir, le XIX^e siècle mit au point un cadre extrêmement rigide pour les sciences de la Nature, cadre qui forma non seulement la science, mais aussi le point de vue général des grandes masses

populaires. Ce cadre prenait appui sur les concepts fondamentaux de la physique classique, l'espace, le temps, la matière et la causalité ; le concept de réalité s'appliquait aux choses ou aux phénomènes que nous pouvons percevoir par nos sens ou qui peuvent être observés au moyen des instruments perfectionnés que la technique avait fournis. La matière était la réalité primordiale et le progrès scientifique était dépeint comme une croisade de conquête du monde matériel. L'utilité était le mot d'ordre de l'époque.

D'autre part, ce cadre était si rigide et si étroit qu'il était difficile d'y découvrir une place pour les nombreux concepts de notre langage qui avaient toujours appartenu à sa substance même, par exemple le concept d'esprit, d'âme humaine ou de vie. L'esprit ne pouvait être introduit dans le schéma général que comme une sorte de miroir du monde matériel ; et quand on étudiait les propriétés de ce miroir à l'aide de la psychologie, les scientifiques étaient toujours tentés – si j'ose pousser la comparaison jusque-là – d'accorder davantage d'attention à ses propriétés mécaniques qu'à ses propriétés optiques. Mais même là, on essayait d'appliquer les concepts de physique classique et en premier lieu celui de causalité. De la même manière, la vie devait s'expliquer comme processus physico-chimique gouverné par les lois naturelles et complètement déterminé par la causalité. Le concept darwinien d'évolution fournissait d'amples preuves étayant cette interprétation. Il était particulièrement difficile de trouver dans ce cadre de la place pour les secteurs de la réalité qui avaient été l'objet de la religion traditionnelle et qui semblaient maintenant plus ou moins imaginaires. Dans les pays européens, où l'on avait l'habitude de pousser les idées jusqu'à leurs extrêmes, il se développa donc une hostilité ouverte de la science envers la religion ; et même dans les autres pays, il y eut tendance croissante à l'indifférence envers de telles questions ; seules les valeurs morales de la religion chrétienne firent exception à cette tendance, tout au moins temporairement. La confiance dans la méthode scientifique et

la pensée rationnelle remplaça toutes les autres sauvegardes de l'esprit humain.

Pour revenir aux contributions apportées par la physique moderne, on peut dire que le changement le plus important dû à ses résultats, c'est d'avoir brisé ce cadre rigide de concepts du XIX^e siècle. Bien sûr, de nombreuses tentatives avaient été faites auparavant pour sortir de ce cadre inflexible visiblement trop étroit pour la compréhension de parties essentielles de la réalité. Mais l'on n'avait pas su voir ce qui pouvait être erroné dans des concepts fondamentaux comme ceux de matière, d'espace, de temps et de causalité, concepts qui avaient si bien réussi au cours de l'histoire des sciences. Seule la recherche expérimentale elle-même, faite avec tout l'équipement perfectionné que la technique pouvait offrir et associée à son interprétation mathématique, fournit – ou, pourrions-nous dire, imposa – la base d'une analyse critique de ces concepts, avec pour conséquence finale la démolition de ce cadre rigide.

Cette démolition se fit en deux étapes distinctes. La première fut la découverte, grâce à la théorie de la relativité, que des concepts aussi fondamentaux que ceux d'espace et de temps pouvaient être changés et en fait devaient l'être à cause des expériences nouvelles. Ce changement ne concernait pas les concepts assez vagues d'espace et de temps dans le langage normal, mais il touchait à leur formulation précise dans le langage scientifique de la mécanique newtonienne, mécanique qu'on avait à tort acceptée comme définitive. La seconde étape fut la discussion du concept de matière, discussion imposée par les résultats expérimentaux concernant la structure atomique. L'idée de réalité de la matière avait probablement été la partie la plus solide du cadre rigide du XIX^e siècle, et cette idée dut finalement être modifiée pour tenir compte de l'expérience nouvelle. Là encore, les concepts demeurèrent inchangés dans la mesure où ils appartenaient au langage naturel. On n'éprouvait aucune difficulté à parler de matière ou de faits ou de réalité quand on avait à décrire les expériences

atomiques et leurs résultats. Mais l'exploration scientifique de ces concepts dans les parties les plus cachées de la matière ne pouvait se faire de la façon simple suggérée par la physique classique, bien qu'elle ait à tort déterminé le point de vue général sur le problème de la matière.

Les nouveaux résultats durent tout d'abord être considérés comme une sérieuse mise en garde contre l'application quelque peu forcée des concepts scientifiques à des domaines auxquels ils n'appartenaient pas. Par exemple, l'application des concepts de physique classique en chimie avait été une faute. Par conséquent, on se sentira aujourd'hui moins enclin à supposer que les concepts de physique et même ceux de physique quantique peuvent s'appliquer sans méfiance à toute la biologie ou à d'autres sciences. Au contraire, nous essayerons de garder la porte ouverte à l'entrée de nouveaux concepts, même dans les parties de la science où les vieux concepts ont rendu de précieux services permettant de comprendre les phénomènes. C'est surtout là où l'application des anciens concepts semble quelque peu forcée et ne paraît pas très adéquate au problème que nous essayerons d'éviter toute conclusion téméraire.

De plus, une des caractéristiques les plus importantes de l'évolution et de l'analyse de la physique moderne, c'est le fait que les concepts du langage normal, avec leurs définitions vagues, semblent plus stables au cours de l'expansion de la connaissance que les termes précis du langage scientifique, lesquels sont une idéalisation portant seulement sur un groupe limité de phénomènes. Ce n'est pas surprenant, puisque les concepts du langage normal sont fournis par le contact direct avec le réel ; ils représentent la réalité. Il est vrai qu'ils ne sont pas bien définis et qu'ils peuvent donc subir des changements au cours des siècles, exactement comme la réalité elle-même, mais ils ne perdent jamais le contact direct avec le réel. D'autre part, les concepts scientifiques sont une idéalisation : ils sont tirés de l'expérience obtenue grâce à des instruments scientifiques perfectionnés et ne sont définis avec précision que par le truchement

d'axiomes et de définitions ; ce n'est que par ces définitions précises qu'il est possible de rattacher ces concepts à un formalisme mathématique et de déduire mathématiquement l'infinie variété des phénomènes possibles dans ce domaine. Mais avec ce processus d'idéalisation et de définitions précises, on perd le contact direct avec la réalité : les concepts correspondent encore de façon très directe à la réalité dans la partie de la Nature qui est l'objet de la recherche, mais cette correspondance peut avoir été perdue dans d'autres domaines qui contiennent d'autres groupes de phénomènes.

Gardant à l'esprit la stabilité intrinsèque des concepts du langage normal au cours de l'évolution scientifique, on voit que – après l'expérience de la physique moderne – notre attitude envers des concepts comme l'esprit humain, l'âme, la vie ou Dieu sera différente de celle qu'avait le XIX^e siècle, car ces concepts appartiennent au langage normal et ont des liens directs avec la réalité. Il est vrai que nous nous rendrons également compte que ces concepts ne sont pas bien définis au sens scientifique et que leur application peut conduire à diverses contradictions ; et que, pour le moment, nous pouvons avoir à adopter ces concepts tels qu'ils sont, sans analyse ; mais nous savons quand même qu'ils sont en contact avec la réalité. À ce sujet, il serait utile de se souvenir que, même dans la branche la plus précise des sciences, les mathématiques, nous ne pouvons éviter d'utiliser des concepts impliquant des contradictions : par exemple, il est bien connu que le concept d'infinité mène à des contradictions qui ont été analysées, mais il serait pratiquement impossible de se passer de ce concept quand on élabore les principales branches des mathématiques.

La tendance générale de la pensée humaine du XIX^e siècle a été la confiance croissante dans la méthode scientifique et dans les termes rationnels précis et a conduit à un scepticisme général vis-à-vis de ces concepts du langage normal qui ne s'adaptent pas au cadre fermé de la pensée scientifique, par exemple les concepts de religion. La physique

moderne a beaucoup renforcé ce scepticisme ; mais en même temps, elle a appliqué ce scepticisme à la surestimation des concepts scientifiques précis, à une vue trop optimiste du progrès en général et, pour finir, au scepticisme lui-même. Le scepticisme envers les concepts scientifiques précis ne signifie pas qu'il doive y avoir une limitation nette à l'application de la pensée rationnelle. Au contraire, on peut dire que la capacité humaine à comprendre peut se trouver, en un certain sens, illimitée. Mais les concepts scientifiques existants ne couvrent jamais qu'une partie très limitée de la réalité ; et l'autre partie, celle qui n'a pas encore été comprise, est infinie. Chaque fois que nous allons du connu à l'inconnu, nous pouvons espérer comprendre, mais nous pouvons avoir à apprendre en même temps une nouvelle signification du mot « compréhension ». Nous savons que toute compréhension doit, pour finir, être fondée sur le langage normal, car ce n'est que là que nous pouvons être sûrs de toucher du doigt la réalité et nous devons donc nous montrer sceptiques envers tout scepticisme vis-à-vis de ce langage normal et de ses concepts essentiels ; nous pouvons par conséquent utiliser ces concepts comme ils l'ont toujours été. C'est de cette manière que la physique moderne a peut-être ouvert la porte à un point de vue plus large sur les rapports entre l'esprit humain et la réalité.

C'est sous cet aspect que la science moderne est en train de pénétrer dans d'autres parties du Monde où les traditions culturelles ont été entièrement différentes de celles de la civilisation européenne. Le choc que cause cette nouvelle activité expérimentale et technique doit se faire sentir dans ces régions plus profondément encore qu'en Europe, car les changements dans les conditions de vie qui ont pris deux ou trois siècles pour se réaliser en Europe se produiront là en quelques décennies. Il faut s'attendre qu'en beaucoup d'endroits cette activité nouvelle apparaisse forcément comme un déclin de l'ancienne culture, comme une attitude impitoyable et barbare qui bouleverse le délicat équilibre sur lequel repose le bonheur humain. De telles répercussions sont inévitables et elles doivent

être acceptées comme un aspect de notre époque. Mais encore une fois, l'ouverture d'esprit de la physique moderne peut jusqu'à un certain point aider à concilier les anciennes traditions et les nouveaux courants de pensée. Par exemple, la grande contribution apportée par le Japon à la théorie quantique depuis la dernière guerre peut être un indice d'une certaine parenté entre les idées philosophiques traditionnelles de l'Extrême-Orient et le contenu philosophique de la théorie quantique. Il est possible qu'il soit plus facile de s'adapter au concept quantique de la réalité quand on n'est pas passé par le mode de pensée d'un matérialisme naïf qui régnait encore en Europe pendant les premières décennies du ^{xx}e siècle.

Il ne s'agit bien sûr pas de prendre ces remarques comme une sous-estimation du mal qui peut être fait ou a été fait aux anciennes traditions culturelles par l'impact du progrès technique. Mais puisque toute cette évolution a depuis longtemps échappé au contrôle des forces humaines, nous avons à l'accepter comme une des caractéristiques les plus essentielles de notre époque et nous devons la lier le plus possible aux valeurs humaines qui ont été le but des anciennes traditions culturelles et religieuses. Que l'on me permette ici de citer un récit tiré de la religion hassidique.

Il était une fois un vieux rabbin, célèbre par sa sagesse, à qui tout le monde venait demander conseil. Vint le trouver un homme désespéré devant tous les changements qui se produisaient autour de lui et déplorant tout le mal causé par le prétendu progrès : « Tout ce fatras technique, s'exclama-t-il, n'est-il pas complètement dénué de valeur comparé aux vraies valeurs de la vie ? – C'est possible, répondit le rabbin, mais lorsqu'on prend une attitude juste, on peut apprendre quelque chose de n'importe quoi. – Non, répliqua le visiteur, on ne peut rien apprendre de choses aussi absurdes que le chemin de fer, le téléphone ou le télégraphe. » Et le rabbin lui répondit : « Tu te trompes. Le chemin de fer peut t'apprendre que, par un seul instant de retard, tu peux tout perdre. Le télégraphe peut t'apprendre que chaque mot compte. Et le téléphone peut

t'enseigner que ce que nous disons ici peut être entendu là-bas. » Le visiteur comprit le sens de la leçon du rabbin et s'en fut.

Enfin, la science moderne pénètre dans les grandes régions du Monde actuel où se sont installées il y a quelques décennies de nouvelles doctrines, fondements de nouvelles sociétés puissantes. La science moderne se trouve là en présence non seulement du contenu de doctrines qui remontent aux idées philosophiques de l'Europe du XIX^e siècle (Hegel et Marx), mais aussi du phénomène d'une croyance intransigeante. Cette science moderne jouant forcément un grand rôle dans ces pays à cause de ses applications pratiques, il n'est guère possible d'éviter que l'étroitesse des doctrines soit ressentie par ceux qui ont vraiment compris la physique moderne et sa signification philosophique. Par conséquent, il se peut qu'une interaction entre la science et le courant général de pensée se produise. Il ne faut naturellement pas surestimer l'influence de la science ; mais il est possible que l'ouverture d'esprit de la science moderne rende plus facile à des groupes même plus vastes de gens de s'apercevoir que les doctrines ne sont peut-être pas aussi importantes pour la société qu'on l'avait supposé. De cette manière, l'influence de la science moderne pourrait favoriser une attitude de tolérance et se montrer ainsi utile.

D'autre part, ce phénomène de croyance intransigeante a beaucoup plus de poids que certaines notions philosophiques spéciales du XIX^e siècle. Nous ne pouvons fermer les yeux devant le fait que la grande majorité des gens ne peuvent guère former un jugement bien fondé sur l'exactitude de certaines importantes idées générales ou doctrines. Pour cette majorité, le mot « croyance » peut ne pas signifier « percevoir la vérité de quelque chose », mais n'être compris que sous l'angle de « prendre cela comme base de vie ». On voit facilement que ce second genre de croyance est bien plus solide, plus ancré que le premier et qu'il peut persister même devant la preuve expérimentale directe du contraire ; dans ce cas, on ne pourra donc l'ébranler par un afflux nouveau de connaissances scientifiques. L'histoire

des vingt dernières années a montré par de nombreux exemples qu'on peut parfois s'accrocher à ce genre de croyance à un point qui semble parfaitement absurde et qui dure alors jusqu'à la mort du croyant. La science et l'histoire nous enseignent que ce genre de conviction peut devenir un grand danger pour ceux qui la partagent. Mais savoir cela ne nous avance en rien puisque nous sommes incapables de voir comment l'éviter, de sorte que de telles convictions ont toujours fait partie des grandes forces de l'histoire humaine. D'après la tradition scientifique du XIX^e siècle, on serait naturellement enclin à espérer que toute conviction doit être fondée sur l'analyse rationnelle de chaque argument après mûre réflexion, et que l'autre genre de conviction (d'après laquelle une vérité réelle ou apparente est tout simplement prise comme base de vie) ne devrait pas exister. Il est exact qu'une mûre réflexion fondée sur des arguments purement rationnels peut nous préserver de bien des erreurs et dangers car elle permet de se réadapter à des situations nouvelles, condition qui peut être nécessaire à la vie. Mais si nous nous rappelons nos expériences en physique moderne, il est aisé de voir qu'il doit toujours y avoir complémentarité fondamentale entre la réflexion et la décision. Dans les décisions pratiques de la vie, on ne pourra presque jamais passer en revue tous les arguments pour ou contre et l'on sera donc toujours obligé d'agir d'après des données insuffisantes. Pour finir, on se décide en mettant de côté tous les arguments – ceux qu'on a compris et d'autres qui pourraient surgir si l'on réfléchissait davantage – et l'on met fin à toute méditation. La décision sera peut-être le résultat de cette méditation, mais elle lui est en même temps complémentaire : elle l'exclut. Les décisions, même les plus importantes de la vie, comportent forcément toujours cet élément inévitable d'irrationalisme. La décision elle-même est nécessaire puisqu'il faut qu'il y ait quelque chose sur quoi s'appuyer, un principe pour guider nos actions ; si l'on n'adoptait pas cette base ferme, nos propres actions perdraient tout élan. Par conséquent, on ne peut éviter qu'une quelconque vérité, réelle ou

apparente, forme la base de vie ; et il faut savoir reconnaître ce fait pour les groupes de gens qui ont choisi une base différente de la nôtre.

Pour conclure maintenant tout ce que nous avons dit de la science actuelle, nous pouvons peut-être déclarer que la physique moderne n'est qu'une partie – mais une partie très caractéristique – d'un processus historique général qui tend à une unification et à un élargissement de notre Monde actuel. Ce processus tendrait par lui-même à diminuer les tensions culturelles et politiques qui créent le grand danger de notre époque. Mais il s'accompagne d'un autre processus agissant en sens inverse : le fait que de grandes masses populaires prennent conscience de ce processus d'unification conduit à stimuler toutes les forces des communautés culturelles existantes qui tentent d'assurer à leurs valeurs traditionnelles le plus grand rôle possible dans l'état final d'unification. Les tensions en sont accrues et les deux processus en concurrence sont si étroitement liés l'un à l'autre que toute intensification du processus unifiant – par exemple grâce au progrès technique – intensifie aussi la lutte pour l'influence possible dans l'état final et ajoute ainsi à l'instabilité de l'état transitoire. La physique moderne ne joue peut-être qu'un faible rôle dans ce dangereux processus d'unification, mais elle aide sur deux points très décisifs à guider ce développement vers un genre d'évolution plus calme. *Primo*, elle montre que l'emploi des armes nucléaires serait désastreux ; et *secundo*, par son ouverture d'esprit envers tous les genres de concepts, elle fait naître l'espoir que, dans l'état final d'unification, de nombreuses traditions culturelles pourraient vivre côte à côte et combiner différentes tentatives humaines en un nouveau genre d'équilibre entre la pensée et l'action, entre l'activité et la méditation.

ESPACES *libres* ■

SCIENCES

Notre troisième cerveau, La nouvelle révolution psychologique, Jean-Michel Oughourlian
Le Vivant comme modèle, Pour un biomimétisme radical, Gauthier Chapelle et Michèle Decoust
Biodiversité, L'avenir du vivant, Patrick Blandin
Vie et Mœurs des abeilles, Karl von Frisch
Conversations avec le sphinx, Les paradoxes en physique, Étienne Klein
Les Oies cendrées, Konrad Lorenz

HISTOIRE

Les Routes de l'esclavage, Histoire des traites africaines, VI^e-XX^e siècle, Catherine Coquery-Vidrovitch
Les Juifs dans le Coran, Meir M. Bar-Asher
Les Califes maudits, I, La déchirure, Hela Ouardi
Une grande divergence, La Chine, l'Europe et la construction de l'économie mondiale, Kenneth Pomeranz
Juifs et Musulmans, Échanges et différences entre deux cultures, sous la dir. d'A. Meddeb, B. Stora et S. A. Goldberg
Les Derniers Jours de Muhammad, Hela Ouardi
Le Geste et la Parole, I, Technique et langage, André Leroi-Gourhan
Le Geste et la Parole, II, La mémoire et les rythmes, André Leroi-Gourhan

IDÉES

Ce que sait la main, La culture de l'artisanat, Richard Sennett
Le Ventre des femmes, Capitalisme, racialisation, féminisme, Françoise Vergès
Arendt et Heidegger, La destruction dans la pensée, Emmanuel Faye
Pourquoi lire les philosophes arabes, L'héritage oublié, Ali Benmakhlouf

Et si Platon revenait... , Un regard philosophique sur le monde d'aujourd'hui, Roger-Pol Droit
Walden ou La vie dans les bois, Henry David Thoreau
N'oublie pas de vivre, Goethe et la tradition des exercices spirituels, Pierre Hadot
La Place de l'homme dans la nature, Le groupe zoologique humain, Pierre Teilhard de Chardin
Le Temps des victimes, Caroline Eliacheff et Daniel Soulez Larivière
La Politique, Manuel à l'usage des citoyens qui n'y comprennent plus rien, Antoine Houlou-Garcia
Chemins de traverse, Vivre l'économie autrement, Emmanuel Faber

ÉCRITURES

Le Livre du Vide médian, François Cheng
Entre source et nuage, Voix de poètes dans la Chine d'hier et d'aujourd'hui, François Cheng
Le roi vient quand il veut, Propos sur la littérature, Pierre Michon
L'Encre du voyageur, Gilles Lapouge
Histoire d'âme, Christiane Singer
Les Âges de la vie, Christiane Singer
Une passion, Entre ciel et chair, Christiane Singer
La Conférence des oiseaux, Jean-Claude Carrière
Les Échos du silence, Sylvie Germain
Qu'Allah bénisse la France !, Abd al Malik

PSYCHOLOGIE

Amour et Rupture, Les destins du lien affectif, John Bowlby
Amour et Violence, La vie relationnelle en famille, John Bowlby
Aiôn, Études sur la phénoménologie du Soi, Carl Gustav Jung
L'Âme et le Soi, Renaissance et individuation, Carl Gustav Jung
Pourquoi j'ai faim ?, De la peur de manquer à la folie des régimes, Marie Thirion
Empathie et Manipulations, Les pièges de la compassion, Serge Tisseron
Père-Fille, Une histoire de regard, Didier Lauru
Le Harcèlement fusionnel, Les ressorts cachés de la dépendance affective, Eudes Séméria
Les Verrous inconscients de la fécondité, Joëlle Desjardins-Simon et Sylvie Debras
La Pornographie, Une agression sexuelle sur mineurs, Gérard Bonnet
L'Éducation selon Dolto, Ce qu'elle a vraiment dit pour aider les parents, Elisabeth Bami et Patrick Delaroche
L'Enfant cassé, L'inceste et la pédophilie, Catherine Bonnet

TABLE DES MATIÈRES

Titre

Copyright

1. - Tradition ancienne et tradition nouvelle
2. - Historique de la théorie des quanta
3. - L'interprétation de Copenhague
4. - La théorie quantique et les racines de la science atomique
5. - Le développement des idées philosophiques depuis Descartes et la nouvelle situation en théorie quantique
6. - Rapports entre la théorie quantique et les autres sciences expérimentales
7. - Théorie de la relativité
8. - Critiques et contrepropositions à l'interprétation de Copenhague
9. - Théorie quantique et structure de la matière
10. - Langage et réalité en physique actuelle
11. - Rôle de la physique moderne dans l'évolution actuelle de la pensée humaine

1. Le présent ouvrage reproduit le texte des *Gifford Lectures*, conférences prononcées par l'auteur à l'Université de St Andrews (Écosse), durant l'hiver 1955-1956. Le volume fait partie de la collection « World Perspectives », publiée à New York par Harper & Brothers, et dirigée par Ruth Nanda Anshen, assistée par un comité composé de MM. Niels Bohr, Richard Courant, Hu Shi, Ernest Jäckh, Robert M. MacIver, Jacques Maritain, J. Robert Oppenheimer, Isidor Isaac Rabi, Sarvepalli Radhakrishnan, Alexander Sachs. (*N.d.E.*)

-
1. Une expérience, fondée sur « l'effet Mössbauer », vient d'être réalisée en laboratoire, notamment à Harvard (v. *Physical Review Letters*, 1^{er} avril 1960), qui, si elle était confirmée, transformerait la situation. (*N. d. T.*)

-
1. En fait, on a obtenu vingt-huit milliards en 1959. (*N.d.T.*)

-
1. D'après les traductions de Gérard de Nerval et d'Henri Lichtenberger.