

La philosophie et la physique, in Jean-François Mattéi (éd.), *Le Discours philosophique*, volume 4 de l'*Encyclopédie philosophique universelle*, Presses Universitaires de France, Paris, 1998, chap. 123, p. 2104-2122.

## *La philosophie et la physique*

Michel PATY

### Introduction

La physique et l'arbre de la philosophie : de tronc à surgon séparé

Configuration des connaissances

De la métaphysique à l'épistémologie

Niveaux de signification. Autonomie et relations

Adéquation des mathématiques. Structure systémique des théories physiques

La mathématisation des grandeurs

Sujet de la connaissance et réalité du monde physique

Les deux fonctions de l'expérience et la construction théorique

Penser les changements

### Bibliographie

#### Textes

1. Galilée
2. Descartes
3. Newton
4. D'Alembert
5. Kant                    photoc
6. Lagrange
7. Laplace
8. Riemann
9. Boltzmann
10. Mach                photoc
11. Poincaré
12. Duhem
13. Einstein
14. Bohr

## ***Philosophie et physique***

Michel PATY

Le rapport de la philosophie à la physique peut être vu comme un cas particulier de son rapport aux sciences en général, et c'est ainsi que nous l'envisagerons en premier lieu. Mais la physique possède une spécificité parmi les sciences de la nature, qui s'est fait jour avec sa constitution comme science exacte, par son lien à l'expérience quantifiée et par la formulation mathématique de ses grandeurs, de ses relations et de ses lois. C'est sous la modalité propre de cette *forme de pensée* et de son rapport à la *nature* (ou au *réel*), par lesquels elle pose des problèmes particuliers à la philosophie, que nous l'envisagerons ensuite, à travers la nature de ses *concepts* abstraits exprimés par des grandeurs mathématisées, de ses *principes* qui agencent les *structurations* théoriques entre ces concepts, lesquelles désignent des *contenus* et suscitent des problèmes d'*interprétation* ; interrogeant la *vérité* de ses propositions et la *réalité* de ses descriptions, sa pensée des *changements* conceptuels et structurels, examinant la question de son *unité* et de ses *raccordements* aux autres sciences descriptives d'objets, considérant sa nature de *construction symbolique* effectuée en rapport à des *pratiques* intellectuelles et matérielles, par élaborations et *découvertes*.

### ***La physique et l'arbre de la philosophie. De tronc à surgeon séparé***

Traditionnellement, la physique était en prise directe avec le discours philosophique, y compris la métaphysique, jusqu'à Descartes et même jusqu'à Newton. Définie comme *science générale de la nature*, elle faisait partie intégrante de la philosophie. Depuis Platon et Aristote, la *philosophie* était identifiée à la connaissance rationnelle, c'est-à-dire à la *science* dans son sens le plus général, en opposition à la connaissance des êtres et des événements particuliers, objets de l'*histoire* (Platon, *La République* ; Aristote, *La métaphysique*). Elle comprenait, pour Platon, la théorie de la connaissance, ou *logique*, la philosophie naturelle, ou *physique*, et l'*éthique*. Aristote ajoutait la *métaphysique*, science de l'existant en tant que tel.

Ces définitions étaient encore celles de Francis Bacon (*De la dignité et de l'augmentation des sciences*). Descartes considérait, pour sa part, "toute la *philosophie* (...) comme un arbre, dont les racines sont la *métaphysique*, le tronc est la *physique* et les branches qui sortent de ce tronc sont toutes les *autres sciences* qui se réduisent à trois principales, à savoir la médecine, la mécanique et la morale", entendant "la plus haute et parfaite morale qui, présupposant une entière connaissance des autres sciences, est le dernier degré de la *sagesse*" (Descartes, *Les Principes de la philosophie*, lettre au traducteur en français, souligné par nous). Quant à Newton, il se réclamait, comme avant lui Galilée, de la "philosophie naturelle".

Les conditions intellectuelles d'une pensée physique autonome par rapport à la théologie et à la métaphysique s'étaient cependant lentement mises en place à la faveur des transformations, amorcées dès la fin du Moyen-âge -chez les maîtres scolastiques des écoles de Paris et d'Oxford, au XIV<sup>e</sup> s.- et à la Renaissance, des conceptions sur la matière, le vide, le mouvement. Des grandeurs quantifiables, peu à peu discernables sur le fond de catégories ontologiques, s'en détachèrent à mesure qu'elles étaient pensées comme concepts physiques : par ex., la distinction de la matière et de l'être rendait possible la pensée du vide physique, désormais distinct du non-être. Les qualités se doublaient de quantités, par lesquelles elles furent ensuite supplantées -passage des lieux à l'espace, les vitesses comme rapports des distances aux durées, doctrine de l'*impetus*, etc..

Avec Galilée, Descartes et Newton, la physique acquit de fait une nouvelle définition qui la distinguait des autres sciences de la nature, et qui devait s'accompagner par la suite d'une nouvelle conception de son rapport à la philosophie. Cette nouvelle définition concerna d'abord la mécanique, comme science du mouvement des corps, susceptible de lois exactes de relations entre des grandeurs d'expression mathématique (position, vitesse, accélération, quantité de mouvement, force, masse, etc.), constituées sur la base de principes ou propriétés générales (principe d'inertie, composition des mouvements et des forces, équilibre...). Dès la loi de la chute des corps de Galilée, le temps fut pris comme la variable permettant de formuler la loi des espaces et des vitesses. Les grandeurs de la mécanique furent ensuite constituées de manière à ce que les lois soient exprimées sous forme différentielle, à la suite de la loi fondamentale de la dynamique newtonienne donnant la modification instantanée de la quantité de mouvement comme effet de la force appliquée.

La mécanique détermina ainsi un mode de traitement "physico-mathématique" fondé à la fois sur l'*observation* et l'*expérience* et sur la considération de *grandeurs définies mathématiquement* (en général continues). Ces grandeurs pouvaient être traitées par l'*analyse* -calcul différentiel et intégral-, une fois connus les *principes généraux* gouvernant leurs relations <4>, ce qui offrait dès lors la possibilité de formuler avec exactitude les *lois* de la physique, en général par des équations d'évolution des grandeurs considérées en fonction du temps. Après la *mécanique*, étendue, en devenant *analytique*, avec Euler, Clairaut, d'Alembert, puis Lagrange et Laplace, à l'ensemble des corps solides et aux fluides, et des corps terrestres aux corps célestes -du système solaire-, la *physique mathématique* ou *théorique* élargit progressivement, au XIX<sup>e</sup> s., son domaine à l'ensemble des phénomènes *physiques*, d'abord de la matière inerte, puis de ses transformations -de la thermodynamique à la chimie et à la physique atomique-, à l'exception des êtres animés.

### ***Configuration des connaissances***

En même temps que la physique affermissait ainsi la détermination de son objet par ses exigences méthodologiques propres, d'autres secteurs de l'étude de la nature gagnaient de leur côté le statut de science dans une acception précise du terme, mais selon des normes épistémologiques et des critères de scientificité différents, conçus en fonction de leur spécificité : les sciences naturelles ou

biologiques, pour ne rien dire ici des sciences humaines et sociales. Par là-même se trouvait posé le problème de la relation entre l'objet de la physique et celui de ces sciences, c'est-à-dire le problème des frontières disciplinaires.

Cette différenciation nette parmi les sciences de la nature et l'exigence de rigueur dans leur définition peuvent être considérées comme l'un des acquis du XVIII<sup>e</sup> siècle, époque où se marque également la préoccupation d'une connaissance tout aussi rigoureuse et assurée -scientifique- de l'enchaînement, de la genèse et des conditions de constitution de ces connaissances elles-mêmes en tant qu'elles résultent de l'activité de l'esprit humain -de Locke à Condillac, de d'Alembert et Hume à Kant. Avec la pensée des Lumières et la philosophie critique, et l'affirmation de l'impossibilité de systèmes philosophiques -métaphysiques- fondés sur la nature, de nouvelles formes de rapport entre la philosophie et les sciences se firent jour : parmi ces sciences, la physique occupa longtemps une place privilégiée, comme référence de la méthode, de la précision et de la certitude.

Tandis qu'étaient revendiquées une distinction et une séparation entre les sciences et la philosophie, une autre modalité s'était inventée pour leurs rapports explicites : la philosophie de la connaissance, ou *philosophie des sciences* (terme répandu par l'ouvrage d'Ampère, *Essai sur la philosophie des sciences*, 1838), ou, mieux encore, *l'épistémologie*, terme forgé plus récemment et que nous entendrons ici non seulement comme *théorie de la connaissance*, mais comme *étude critique des sciences particulières*, de leurs contenus et de leurs processus d'élaboration. On peut, pour ce qui est des mathématiques, de la physique et de l'astronomie, faire remonter à d'Alembert, au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, cette nouvelle manière de concevoir les rapports entre science et philosophie, mise en pratique dans ses propres analyses sur les propositions, les concepts, les principes et les méthodes de ces sciences. La philosophie de Kant consacrait de manière générale cette distribution des tâches en rapportant à la science la connaissance et à la philosophie l'expression des conditions de possibilité de cette connaissance (*Critique de la raison pure*).

Parmi les sciences de la nature, la physique se distingue par son rapport particulier aux mathématiques. Ce trait, déjà présent dès l'Antiquité dans certaines branches spécifiques des sciences -géométrie appliquée à la géodésie, astronomie mathématique, optique géométrique, acoustique, statique et hydrostatique-, apparut constitutif de la nouvelle science avec l'étude de la dynamique du mouvement et de la chute des corps, puis la théorie de la gravitation universelle, de Galilée à Newton, et s'avéra par la suite général pour toutes les branches de la physique. C'est dans toute l'extension de son champ -de la mécanique à l'optique et à l'électromagnétisme, de la thermodynamique à la chimie physique, au XIX<sup>e</sup> siècle et, au XX<sup>e</sup>, de la physique de la matière condensée à la physique atomique et subatomique ou physique nucléaire et des particules élémentaires, de l'astrophysique à la cosmologie-, que la physique s'est constituée par la *mathématisation*, c'est-à-dire par une élaboration mathématisée de ses représentations théoriques.

Ce caractère n'était pas encore systématiquement établi au XIX<sup>e</sup> s., où une physique expérimentale -mais portant sur des grandeurs quantifiables, soumises à la mesure- pouvait encore être conçue, dans certains domaines, en dehors de la physique théorique ou mathématique. Il paraît définitivement acquis aujourd'hui, de la physique du microcosme à celle des objets de l'univers en

passant par celle des “phénomènes quotidiens”, et cette particularité appartient désormais à la définition de cette science et de son objet.

En retour, les mathématiques ont régulièrement trouvé dans les problèmes posés en physique un terrain privilégié pour leurs constructions <11>. Ce rapport étroit n'est pas exclusif de liens différents entre les mathématiques et d'autres disciplines, ni de relations et de recouvrements d'objets entre la physique et d'autres sciences. Mais il est exceptionnel parmi les sciences et détermine une part importante des problèmes philosophiques posés par la physique, en particulier celui du rapport “entre les mathématiques et la réalité”.

### ***La physique et la philosophie, de la métaphysique à l'épistémologie***

La physique, tout en étant autonome par rapport à la philosophie, y touche cependant de près. Ses élaborations conceptuelles et théoriques posent le problème du fonctionnement de la pensée et de la signification de ses objets de pensée ; un autre problème fondamental est celui du rapport entre ces représentations symboliques abstraites et le monde matériel des phénomènes physiques. Le fait est, bien sûr, général, et les autres sciences tiennent également à la philosophie par un côté, à la nature -ou à la société- par un autre. On dira, pour aller vite, que les sciences touchent à la philosophie en ce qu'*elles sont pensée et pensée consciente d'elle-même*, et à la nature -ou à la société- *par leur objet* ou par leurs applications possibles à un objet, à l'exception des mathématiques, science d'*objets idéels* et, d'une manière générale, des sciences à contenus purement formels, dont la logique.

Dans la configuration présente de la philosophie et de la physique, les questions rencontrées se distribuent suivant que l'on considère, en philosophie, la *métaphysique* -qui concerne l'existence et l'être-, la *philosophie de l'expérience humaine et de la conscience*, la *philosophie de la connaissance* entendue en général, l'*épistémologie de la physique*, et enfin la *physique* proprement dite. Ces relations ne vont pas dans un seul sens : elles ne se ramènent pas simplement à une “philosophie de la physique”, mais concernent aussi l'influence que les connaissances en physique peuvent exercer sur la philosophie dans son ensemble, y compris sur la métaphysique.

Malgré les tentatives nombreuses, aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s., d'éradiquer la *métaphysique* du champ de la philosophie des sciences, des divers positivismes (Comte, Mach, etc.) au cercle de Vienne et à divers courants actuels, analytiques ou empiristes et pragmatiques, nous ne l'excluerons pas *a priori* des aspects de la philosophie pouvant intéresser la physique. La part de la métaphysique qui paraît inadéquate reste celle des questions d'essence et de finalisme, rejetées dès la constitution de la physique moderne. Elles sont cependant parfois résurgentes sous des aspects “modernisés” dans les débats philosophiques sur la physique. Par exemple, le finalisme transparait sous le “principe anthropique” invoqué par certains cosmologues actuels ; ou encore, une sorte de *philosophie de la nature* post-romantique voudrait transcrire directement en termes philosophiques et métaphysiques des résultats récents de la physique. Par ailleurs, les *questions limites* de certaines connaissances inspirent, par des extrapolations et des passages

d'un plan de signification à un autre dont la légitimité n'est pas établie, des conceptions générales sur l'être et le devenir -de la dégradation des formes et de la "mort de l'Univers", avec la notion thermodynamique d'entropie à la fin du siècle passé, à l'"origine des temps" pensée comme création de l'Univers, transcrite de la cosmologie évolutionnaire contemporaine.

En sens inverse, selon certaines orientations, la philosophie -incluant la question des fins et du sens- permettrait de justifier, en en rendant compte, ou, au contraire, de récuser, des résultats de la physique -ou d'autres sciences. Tel est le cas de doctrines créationnistes spiritualistes, ou de théories matérialistes dogmatiques, ou encore, d'interprétations "subjectivistes" qui font intervenir la conscience ou le psychisme dans les processus physiques. De telles conceptions, non critiques voire "fondamentalistes", ou même seulement naïves, sont clairement à rejeter par toute philosophie se réclamant de l'intelligible et du rationnel.

Sur un mode plus neutre et plus universel, des questions d'ordre métaphysique -existentielles ou ontologiques- se tiennent au soubassement de la pensée, du mouvement volontaire qui la porte à s'intéresser au monde, à s'en donner une représentation, selon des exigences -objectivité, exactitude, véracité, idée de réalité, etc.- qui puissent en garantir la solidité, le bien-fondé, la valeur de vérité. La motivation et le désir de connaissance renvoient en dernière instance à la métaphysique ainsi qu'à la *philosophie de la conscience* -un aspect de la *phénoménologie* au sens large selon Ricœur-, concernée par les choix de valeurs, lesquels se marquent aussi dans l'utilisation des connaissances et, d'une manière générale, assignent la responsabilité des scientifiques et des autres détenteurs et acteurs du savoir. Quant à la réflexion sur les exigences intellectuelles qui président à la recherche de la connaissance et sur les critères qui leur sont associés, elle-même relève de la *philosophie de la connaissance*.

Cette dernière concerne l'étude des conditions et des circonstances de la constitution des sciences, considérée tout d'abord selon ses modalités générales. Elle met avant tout l'accent sur les *significations* (Wittgenstein) et son discours et ses propositions échappent au caractère objectivant des descriptions, au point qu'on peut la qualifier de discipline "sans objet" (Granger). Elle est "non objectale", tout en se distinguant d'autres disciplines aux objets abstraits comme, en mathématiques, l'algèbre, dénuée d'objets tels que des nombres ou des figures, ou encore, en grammaire, la syntaxe d'une langue. Elle n'est pas que langage et forme, et analyse de ces derniers, puisque les *significations* désignent des contenus, qui se rapportent à des objets, qu'elle n'aborde cependant que de manière indirecte et médiate.

La philosophie entretient, certes, une relation avec le *langage*, d'un côté avec le *langage courant*, de l'autre avec l'*analyse du langage* et avec la *logique*, mais sans s'y confondre. On peut considérer en elle une part "exacte" qui est une sorte de *logique* ou d'*axiomatique* des propositions de la science, permettant d'importantes clarifications sur un certain ordre de signification des énoncés et sur la structure des théories (cf., pour les théories physiques, Carnap, Reichenbach, Destouches, Février, Stegmüller, Bunge, di Francia, dalla Chiara, etc.), voire sur la décidabilité du comportement de théories dynamiques (da Costa). Ces analyses, quant elles portent sur des théories précises, appartiennent à l'épistémologie structurale.

Nous réservons ici la qualification d'*épistémologie* (d'une science) à la

part plus précise et spécifique de la philosophie de la connaissance dont on peut qualifier l'«objet», qui désigne directement les objets et les contenus des sciences particulières, en s'attachant à l'examen critique de leurs concepts, de leurs propositions ou énoncés, de leurs méthodes, de leurs procédures expérimentales et théoriques, ainsi qu'à leur genèse et à leurs transformations, ou encore à leur aspect structural évoqué plus haut. Cette approche disciplinaire et locale, qui porte sur les concepts, les structures ou l'évolution de cette science et de ses théories, reste inséparable de la philosophie de la connaissance dans le sens plus général. L'épistémologie de la physique est en même temps regard extérieur, participant de l'approche non objectale de la philosophie, et réflexion de la physique sur elle-même -examen de ses représentations-, par laquelle son objet propre touche à l'objet même de la physique, soit actuel, soit dans ses états passés -pour l'épistémologie historique, et elle fait alors appel à l'histoire des sciences.

### ***Niveaux de signification. Autonomie et relations***

Ces diverses instances de la philosophie dans son rapport aux sciences, et en particulier à la physique, quoique distinctes, s'articulent avec un certain «jeu». Les conditions générales de possibilité ou d'effectivité de la connaissance, qui tiennent à la constitution de la pensée scientifique et au rapport de celle-ci et du monde, déterminent en partie la pensée des contenus de connaissance qui relèvent de l'épistémologie dans son sens précis. Les questions de signification attribuées fondamentalement à la philosophie de la connaissance dans le sens large parcourent aussi les autres instances, et sont présentes également dans la physique proprement dite.

On n'analysera pas de la même façon, par exemple, tel concept physique ou telle tendance de la physique actuelle, suivant que l'on privilégie une conception empiriste ou rationaliste. Cependant, des éléments de l'analyse épistémologique pourront être communs à des positions philosophiques différentes : en particulier, ceux qui concernent la *description* de contenus de concepts, l'énoncé de propositions portant sur des propriétés, comme c'est le cas, par exemple, avec la signification physique de l'espace et du temps de la théorie de la relativité. Les différences se marqueront au niveau des *interprétations*, des *significations*, entendues cette fois pour un niveau plus large du *sens* donné aux propositions, rapporté aux caractères généraux de la représentation : voir le sens attribué, en mécanique quantique, à la fonction d'onde, aux probabilités, aux relations d'«indétermination», etc. <7> <14> Et cependant ces grandeurs et relations théoriques fondamentales sont utilisées par tous les physiciens, indépendamment de leurs conceptions philosophiques -réalistes ou observationalistes. <13>

Plutôt que de tenter un panorama des diverses positions ou manières de voir existantes, nous prendrons le point de vue délibéré d'une approche rationnelle de ces aspects philosophiques, en considérant l'objet de la physique tel que nous pouvons le concevoir aujourd'hui. Qu'est-ce que la physique, du point de vue de la philosophie ? mais aussi, de son propre point de vue ? Ne devrait-on pas s'attendre à voir ces deux points de vue coïncider si, du moins, la pensée physique,

en se retournant sur elle-même, se fait nécessairement philosophique ? Cette affirmation est, certes, elle-même une position philosophique. Elle soutient qu'il n'y a pas une science des scientifiques et une science des philosophes, mais une seule science, qui peut être soit pratiquée, soit réfléchie, et qu'entre l'approche réflexive du praticien de cette science et celle du philosophe, la différence n'est que de degré. Le second parcourra seulement de manière plus systématique les différents plans de l'instance philosophique, mettant en relation leurs divers niveaux de sens. Un dialogue devrait donc toujours être possible entre le physicien et le philosophe.

La physique a pour objet le monde physique -la matière inanimée et ses phénomènes-, qui pose lui-même des problèmes de définition et de frontières -avec les autres disciplines. La philosophie, quand elle s'intéresse à la *pensée* en tant que telle *du monde physique*, ne peut ignorer la *pensée* qui s'occupe de représenter ce monde, et qui est *la physique*. Représentant le monde, la pensée de la physique est contrainte par lui : la pensée philosophique trouve matière à réflexion à ce stade même, et c'est déjà sur un aspect du rapport de la *pensée* et de la *réalité*. Malgré leur relative indépendance, la physique et la philosophie ont à voir l'une avec l'autre, par la rationalité de leur approche et de leur objet -pour autant, en ce qui concerne la seconde, que celui-ci se laisse caractériser. Si la physique se préoccupe d'abord de décrire et d'expliquer le monde vu sous l'angle physique -par opposition à biologique, neurophysiologique, psychologique, social, etc.-, et la philosophie d'exprimer des significations, leurs propos ne peuvent être indifférents l'un envers l'autre.

La connaissance philosophique et la connaissance scientifique -et en particulier celle de la physique- ont, de fait, toujours entretenu un dialogue étroit et fécond, le type de pensée qu'est la philosophie obligeant à poser pour toute nouvelle connaissance acquise la question de sa signification. Et cette question appartient aussi à la démarche scientifique, directement concernée par l'intelligibilité, sans laquelle on serait bien en peine de dire ce qu'est une représentation d'objet du monde : c'est pourquoi la philosophie se tient -au moins implicitement- au cœur même de la démarche scientifique comme l'une de ses dimensions, elle-même trouvant de son côté à se nourrir notamment des problèmes posés par la connaissance scientifique. Les modifications survenues au cours de l'histoire dans les modalités du rapport entre science et philosophie sont elles-mêmes une manifestation de cet échange : elles tiennent aux changements de la pensée scientifique dans son approche de ses objets, tout autant qu'aux changements de conception que cette pensée se fait d'elle-même -celle-ci directement liée à la pensée philosophique.

Si l'approche épistémologique part de la spécificité des objets et des procédures d'une science, et donc si elle est intimement liée à la connaissance de cette science, elle prend nécessairement appui sur deux autres piliers qui nourrissent sa réflexion, la philosophie et l'histoire des sciences. La tradition qui mène aux œuvres désormais classiques de Gaston Bachelard et d'Alexandre Koyré et de chercheurs de leur lignée témoigne de ce lien pour ce qui concerne la physique. Il est plus rare de trouver cet équilibre chez les auteurs dont on parle aujourd'hui, qui privilégient soit l'une soit l'autre approche, opposant en quelque sorte l'examen structural, conçu comme "reconstruction logique", et l'étude historique de l'évolution des concepts. Nous reviendrons plus loin sur ces problèmes. D'un autre

coté, on constate la permanence d'une tradition vivace de physiciens venus à des réflexions philosophiques, épistémologiques ou historiques à partir de problèmes posés par leur discipline et leur objet d'étude, dans la lignée de Mach, Boltzmann, Duhem, Henri Poincaré, Einstein, Bohr, Schrödinger, Heisenberg, von Weizsäcker : voir Margenau, Bohm, John Bell, pour ne mentionner que des disparus...

### ***Adéquation des mathématiques Structure systémique des théories physiques***

L'adéquation qui paraît souvent parfaite entre la représentation théorique des phénomènes physiques, à l'aide de grandeurs mathématiques, et les observations correspondantes, déterminées avec précision par des mesures, est fréquemment une source d'étonnement et d'interrogations. Attribuée au pouvoir des mathématiques, elle suscite parfois l'idée, platonicienne, que la nature serait mathématique ; ou, au contraire, une conception purement instrumentale, quantitative voire numérique, de l'utilisation des mathématiques pour traduire l'observation. Il n'est pas rare, dans les deux cas, que la physique soit considérée de fait comme simple *application* des mathématiques sur le monde des objets réels dans le premier cas, ou sur les données d'expérience dans le deuxième. A distance d'une conception "mystique" des mathématiques -des polyèdres réguliers des cosmologies platonicienne et képlérienne aux "grandeurs vraies et mathématiques" du néo-platonisme newtonien- comme d'une vue purement instrumentaliste rapportant la connaissance à la seule référence de l'observation, il semble plus raisonnable de s'interroger sur la nature de la *théorie physique* elle-même, comme instance intermédiaire entre les mathématiques, d'une part, et les phénomènes et objets du monde physique, d'autre part.

Une théorie physique n'est pas une entité de nature absolue et intemporelle : elle se présente à un moment donné de l'état du savoir, succédant à d'autres et remplacée ultérieurement à son tour ; elle forme système dans la synchronie et résulte, à chaque époque, et pour chaque nouveau domaine de problèmes abordés, d'une *construction*, qui met en jeu le "système" de la mathématique et de la physique de cette époque ainsi que la nature et la signification des concepts et grandeurs physiques concernés. Les théories physiques sont des *constructions symboliques* sur des *concepts* reliés entre eux, représentés par des *grandeurs* posées comme *constitutives* pour la *représentation* des objets et des phénomènes physiques.

Les théories physiques relient rationnellement des éléments de représentation symbolique de phénomènes physiques donnés dans l'expérience. Ces éléments sont des énoncés généraux ou *principes* qui se tiennent au soubassement des autres, correspondant à des propriétés physiques constatées dans l'expérience et universelles pour le domaine considéré, des *concepts* exprimés sous forme de *grandeurs* d'expression mathématique, des énoncés factuels ou *faits* empiriques donnés ou déduits, des *lois* des phénomènes physiques pouvant être exprimées sous forme d'*équations* entre ces grandeurs. Deux conditions règlent la possibilité de mathématiser complètement une théorie physique de telle façon qu'elle se présente sous la forme d'un système cohérent recouvrant la représentation des

phénomènes de son domaine. La première est la connaissance de ses principes directeurs (tels les trois principes de la mécanique rationnelle classique, le principe de moindre action de la dynamique, le principe de relativité restreint ou généralisé, les deux principes de la thermodynamique, les principes de symétrie des théories quantique des champs de jauge, etc.). La seconde est la formulation des concepts représentatifs et des grandeurs correspondantes, que la théorie relie en enchaînements déductifs, sous forme de lois et d'équations, exprimant l'unité sous-jacente des phénomènes du monde physique. Les théories physiques peuvent ainsi décrire des propriétés observées, mais aussi en prédire de nouvelles : cette capacité est caractéristique de la physique, en raison de la forme de systèmes mathématisés de ses théories. La conséquence en est la possibilité de tester avec précision la validité des théories, soit par leur réfutation, soit par la détermination de leur degré de vérité.

La validité et la vérité d'une théorie physique sont toujours relatives à un domaine de pertinence, qui tient à sa nature construite. Elles sont estimées par la confrontation à l'expérience, mais aussi en fonction des particularités théoriques, et même épistémologiques.

Le caractère systémique des éléments théoriques implique, d'une part, que la signification, ou contenu physique, de ces éléments est donné au sein même de la structure théorique, et qu'elle varie d'une théorie à une autre. Ceci n'implique pas une quelconque "incommunicabilité" entre des théories différentes, par exemple en succession chronologique, puisque les théories s'engendrent à partir de théories précédentes, et que l'on peut faire correspondre des éléments appartenant à ces théories, comparer leurs statuts respectifs et évaluer les transformations de leurs énoncés (p. ex., un fait empirique dans l'une devient principe ou énoncé théorique dans une autre, etc.). Une autre implication de la systémicité est que la comparaison des énoncés théoriques et des concepts aux données empiriques ne se fait pas dans l'absolu et terme à terme, mais en tenant compte des relations de structure. Ce *holisme épistémologique* a été énoncé en premier par Duhem et s'oppose à l'empirisme au sens strict. <12> <13>

On peut distinguer trois aspects de la physique dans son état de mathématisation actuel, suivant l'angle d'approche adopté pour les objets et les méthodes : la *physique mathématique*, qui s'attache aux propriétés du formalisme et à l'instrument mathématique lui-même, la *physique théorique*, orientée sur la représentation des contenus physiques correspondant aux phénomènes, et donc sur les principes et les concepts qui leur sont appropriés, et la *physique expérimentale*, préoccupée de l'obtention précise des connaissances empiriques, soit qu'il s'agisse de décrire, de reproduire, d'analyser les phénomènes, ou de préparer la vérification de leur anticipation théorique. <11>

Pour ces raisons, complétées par d'autres qui vont suivre, il est difficile de se satisfaire de l'expression de "science empirique" par laquelle il est courant de voir qualifier la physique. L'expression ancienne de "science de la nature" était évidemment meilleure, sans réduction implicite à des actes de connaissance empirique. La physique tient étroitement, en tant que construction théorique et symbolique, à ces "sciences à contenus formels" que sont les mathématiques, tout en désignant des contenus portant sur le monde naturel, physique. Il serait donc préférable de la désigner comme une "science à contenus empiriques".

### *La mathématisation des grandeurs*

Pour justifier le caractère mathématique des grandeurs et des lois physiques, Galilée invoquait, à propos du mouvement des corps, l'idée que le "livre de la nature" serait écrit dans la langue des figures et des nombres <1>. Mais la raison avancée par Descartes s'appuyait sur une conception moins arbitraire et plus directe de l'intelligibilité qui nous concerne encore : celle d'une double fonction des mathématiques dans l'exercice de la raison, en particulier touchant la connaissance de la nature. Les mathématiques servent de modèle et de garant de certitude dans l'enchaînement des propositions, et elles règlent l'expression des grandeurs par lesquelles nous représentons le monde. Descartes définissait la *grandeur en général*, relative à tout objet, en se servant de la notion de *dimension* selon l'étendue spatiale de la géométrie, prise pour archétype de toute grandeur accessible à l'ordre et à la mesure, selon la règle 14 des *Règles pour la direction de l'esprit* <2>.

Cet aspect *quantitatif* des grandeurs, qui les rend "mesurables", ne doit pas être entendu dans le sens restreint de la seule détermination numérique, auquel on le ramène trop souvent. L'important, pour Descartes, est la *relation* dans laquelle s'exprime la grandeur, c'est-à-dire sa forme -par exemple dans une expression algébrique- : elle est, écrit-il, "le seul point où réside proprement la science". Lorsque Descartes parle de la mesure, il faut, d'une manière générale, l'entendre dans le sens -que l'on dira "qualitatif", malgré l'ambiguïté du terme, par opposition à une détermination numérique précise- qui désigne avant tout ce que la grandeur a de *relationnel*. La leçon est encore bonne à entendre : le contenu conceptuel d'une grandeur, même mathématisée, ne s'évanouit pas sous l'attribution précise d'une valeur par un nombre, et il est donné dans la relation même qui la détermine.

A partir du moment où des grandeurs conçues à l'aide d'une forme mathématique -grandeur *extensive* d'une dimension spatiale, ou *intensives*, constituée sur le mode de la première- sont prises pour représenter des aspects conceptualisés des objets et des phénomènes du monde sensible, il s'ensuit naturellement que les relations de ces grandeurs seront celles-là même des mathématiques qui en traitent. Dès lors le système des concepts physiques se voit tissé par la mathématisation des grandeurs. Cette conception, qui prend son point de départ dans l'analyse cartésienne de la grandeur, reprise avec la constitution de la physique mathématique au dix-huitième siècle, dans des termes exprimés notamment par d'Alembert, est pour l'essentiel celle de la physique théorique développée depuis lors. <4>

La pensée des grandeurs s'est enrichie de tout le développement des mathématiques, et la physique s'en est nourrie, incorporant à l'expression de ses concepts les nouveaux objets mathématiques et les théories et méthodes de calcul associées, dont elle suscita d'ailleurs parfois l'invention. Elle met en jeu, dans l'expression de ses lois, des grandeurs de genres divers, de forme de plus en plus abstraite et éloignée de celle, intuitive et génératrice, de la dimension spatiale. La nécessité de dépasser l'antinomie des grandeurs continues (distance et durée) et des abstractions du point matériel et de l'instant singulier suscita l'élaboration de nouvelles formes de grandeurs, les dérivées et différentielles, totales et partielles, et

les intégrales, autour d'une nouvelle théorie mathématique. <3> <4> <6> Le calcul différentiel et intégral se révéla d'application générale en physique : les équations aux dérivées partielles devinrent la "langue" -construite dans ce but- de la physique des milieux continus et des champs. Ces formes mathématiques devinrent le moyen indispensable de la pensée physique qui put ainsi étendre son domaine et ses objets.

On doit faire ici une mention spéciale de l'étude systématique, faite par Riemann dans sa dissertation de 1854 "Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie", des propriétés qu'il est possible de formuler mathématiquement pour une *variété* -ou grandeur- continue quelconque à un nombre  $n$  de dimensions, et de leur rapport éventuel aux grandeurs physiques. Ces propriétés sont soit topologiques soit métriques, et Riemann proposa d'établir une connexion directe entre les relations métriques de l'espace à trois dimensions et les propriétés physiques des corps, préparant ainsi le cadre mathématique de cette théorie physique géométrisée -de la gravitation- que serait la théorie de la relativité générale <8> <13>. Il apparaît de plus en plus concevable que les propriétés topologiques de grandeurs de dimensions quelconques se révèlent également comme un outil conceptuel indispensable de la physique à venir (gravitation quantique, etc.).

D'autres grandeurs mathématiques de forme différente s'ajoutèrent à celles mentionnées, qui furent annexées par la physique au fur et à mesure de leur apparition, comme les nombres complexes, les vecteurs, les tenseurs et le calcul différentiel absolu, les matrices, les spineurs, les fonctions "de carré sommable" définies sur des espaces de Hilbert et les opérateurs linéaires agissant sur ces fonctions -socle de la mécanique quantique-, les distributions, etc. <11> <13>. Une place particulière devrait être faite ici à la théorie mathématique des probabilités et à ses utilisations en physique <7> <9>.

### ***Sujet de la connaissance et réalité du monde physique***

Du point de vue philosophique proprement dit, la tentative la plus significative après Descartes pour fonder l'intelligibilité du monde sensible de la physique -en même temps que la mathématique du continu- par l'entendement reste celle de Kant dans la *Critique de la raison pure*, avec "l'analytique transcendantale" qui est la "décomposition de toute notre connaissance a priori dans les éléments de la connaissance pure de l'entendement" -qui fait suite à l'"esthétique transcendantale", "science de tous les principes de la sensibilité a priori", où l'espace et le temps sont établis comme *formes pures a priori de l'intuition sensible*, permettant la formation par l'entendement d'une connaissance *synthétique a priori* comme celle de la géométrie, et l'appréhension des phénomènes (Kant [1781, 1787], tr. fr., p. 781-811). Avec les "anticipations de la perception", dont le principe est que "dans tous les phénomènes, le réel, qui est un objet de la sensation, a une grandeur qui est un degré", Kant constitue dans le sujet transcendantal la condition d'appréhension des grandeurs continues, tant *extensives* -pour lesquelles la représentation des parties rend possible la représentation du tout, et qui sont objet d'*intuition* dans l'espace ou dans le temps- qu'*intensives* -relatives au degré de la *sensation* occasionnée-, en s'inspirant de la pensée des grandeurs dérivées et différentielles de l'analyse et de la physique newtonienne (*ibid.*, p. 902-914).

Pour concevoir une grandeur intensive, Kant imagine un changement graduel de la conscience empirique en conscience pure par la diminution progressive et continue de la sensation, de telle façon que le réel disparaît complètement et “qu'il ne reste qu'une conscience purement formelle (*a priori*) du divers dans l'espace et dans le temps”. D'autre part, il assigne la possibilité pour les phénomènes d'être donnés et d'apparaître reliés entre eux dans l'unité de l'expérience à des “lois transcendantales de la nature”, qui sont les “analogies de l'expérience”, principes régulateurs des objets ou des phénomènes, non constitutifs de ces derniers mais relatifs à l'*usage empirique* de l'entendement (*ibid.*, p. 914-948). L'anticipation de l'expérience est également rendue possible par cette “unité synthétique *a priori*” (*Ibid.*, p. 947) <5>.

Les géométries non euclidiennes et les développements de la physique avec les théories de la relativité suscitèrent ultérieurement la critique de l'*a priori* kantien, et les empiristes logiques proclamèrent la “dissolution du synthétique *a priori*”. Mais, si ce dernier n'est plus soutenable tel quel, il reste, dans une perspective rationaliste, si l'on veut rétablir les droits de l'entendement, que des éléments théoriques de référence sont nécessaires pour structurer la représentation des phénomènes donnés dans l'expérience : on invoque alors quelque chose comme un “synthétique *a priori*” construit et modifiable comme référence provisoire, dans l'entendement, de l'exigence de réalité -et de l'unité du réel- pour le sujet connaissant.

Les éléments qui constituent une théorie physique sont des constructions de la raison, dont le caractère provisoire et relatif <10> ne doit cependant pas estomper la nécessité : la physique, pour être pensée, exige de tels éléments et les symboles abstraits qui les représentent, souvent fort éloignés des observations empiriques : le spin d'une particule ne se rencontre pas dans la nature comme un objet que l'on pourrait désigner du doigt ou tenir, et cependant ce concept est indispensable pour comprendre les propriétés des particules -qui elles-mêmes sont des entités très éloignées de l'intuition commune. Mais l'expérience seule ne nous aurait pas fourni ce concept, qui excède l'équipement sensoriel et cérébral usuel des individus. Cet “abstrait-concret” construit est un objet intellectuel qui porte une part de convention - il est le fruit d'une invention- et une part de nécessité. Il sera donc toujours susceptible de remise en cause et de révision. Mais ce statut mouvant n'a rien d'exceptionnel : il est celui de toute connaissance humaine et de la raison elle-même.

C'est donc dans le sens indiqué que l'on parle du concept de spin -ou de tout autre concept physique analogue- comme d'une *réalité physique*. Nous n'entrerons pas ici dans le débat, philosophique plutôt qu'épistémologique, du réalisme ou de l'observationalisme, du rationalisme ou de l'empirisme, dont la littérature philosophique sur la physique ne cesse de se grossir : c'est un débat classique, qui se renouvelle par rapport aux termes des anciennes controverses, et la physique quantique lui a longtemps donné une coloration particulière, peut-être plutôt par effet de perspective et d'illusion. Car le problème fondamental reste bien celui de la nature des constructions symboliques par lesquelles le sujet connaissant se donne une représentation du monde, et de leur rapport à ce monde ; existe-t-il, en fin de compte, une réalité extérieure et indépendante, et comment pouvons-nous en parler ?

La légitimité et la signification physique de ces grandeurs “abstraites”

par la forme, mais qui deviennent “concrètes” pour notre représentation, proviennent d'une part des exigences de l'entendement, et d'autre part de la confrontation répétée à l'expérience, par la reproductibilité des phénomènes et la prédictivité. Leur justification ne tient pas à une évidence de notre intuition, même si leur invention est généralement liée à l'intuition du chercheur. L'*intuition*, comme fonction de l'entendement, est diversement conçue chez les auteurs qui s'y sont intéressés, de Descartes à Kant, Poincaré ou Einstein, mais elle correspond indéniablement à une pratique intellectuelle qui appartient au travail rationnel de la pensée, tant pour l'invention de connaissances nouvelles que pour la compréhension. Elle opère comme une représentation synthétique qui fournit l'intelligence comme instantanée du phénomène, ramené à ses relations de structure.

### ***Les deux fonctions de l'expérience et la construction théorique***

La notion d’“*expérience de pensée*”, invoquée fréquemment par Einstein, éclaire assez bien ce qui est en jeu dans la conception d'un contenu physique de concepts au sein d'une théorie. Elle partage à cet égard des traits de l'expérience au sens ordinaire, en donnant une vue, ici synthétique, du phénomène - non pas réalisé mais *virtuel*, et l'on pourrait parler de "*contenu physique virtuel*"-, faisant voir ce qu'est un contenu par l'imbrication des concepts : c'est une expérience sans mesure, qui transcrit en des termes “intuitifs” le recouvrement du “contenu formel” et du contenu empirique.

Quant à l'expérience effective, elle sort au contraire de la théorie, en ouvrant celle-ci au monde naturel, à la “réalité extérieure”, l'obligeant à échapper à sa fermeture systémique et la déstabilisant. Les réajustements -objets de choix rationnels-, qui ne transforment peut-être dans un premier temps que des éléments du système théorique, obligent en fin de compte à transformer tout le système lui-même. Car, même s'ils se contentent d'augmenter des propriétés, d'ajouter des grandeurs pour des concepts supplémentaires, ces derniers devront trouver leur juste place dans la structure théorique. C'est ainsi qu'on a vu récemment la physique contemporaine changer la base de ses principes dynamiques, à la suite de l'introduction de nouveaux “nombres quantiques”, qui transforment les particules en assemblages de quarks, ceux-ci devenant la source de champs dont la propriété de “symétrie de jauge” s'est finalement imposée comme la base même de la construction qui permet de les concevoir.

L'aspect de *construction théorique* est essentiel pour comprendre la nature de la physique et l'usage propre qu'elle fait des mathématiques. Cette construction possède une signification originale, qui n'est ni celle des mathématiques pures, ni celle de l'observation brute. A un premier niveau elle définit les grandeurs physiques dont elle part à partir de grandeurs mathématiques et de règles élémentaires de coordination avec les corps ou les effets étudiés -par exemple, l'espace, le temps, etc.. Sur ces grandeurs, d'autres sont construites à partir des relations auxquelles obligent les principes -p. ex. d'invariance-, et le travail théorique qui les combine et les transforme aboutit à des réorganisations des propositions qui visent à décrire les phénomènes physiques, cette correspondance se présentant comme une conséquence nécessaire du travail effectué aux stades

précédents.

Une théorie physique n'est pas un simple "système formel interprété" sinon dans une perspective seulement axiomatique, utile pour analyser sa structure, mais artificielle car séparée de ses contenus effectifs. Une théorie physique est un système de concepts formalisés, constitués par *construction* à travers des opérations sur des grandeurs relationnelles, porteuses de *contenus* qui se rapportent à une *pensée des phénomènes*. L'expérience, en amont et en aval de la construction, *réalise* la pensée du phénomène, qu'elle produit et peut reproduire grâce à la description théorique.

### ***Penser les changements***

De nombreux aspects des rapports entre la philosophie et la physique n'ont pu être abordés ici : mais nous avons indiqué en commençant l'axe directeur de cette réflexion, orientée sur le caractère mathématisé des théories physiques. Nous ne ferons, pour terminer, que mentionner quelques problèmes qui mériteraient d'être examinés davantage. La pensée des changements subis par les représentations de la physique constitue l'un de ces problèmes, comportant plusieurs aspects qui, tous, mettent en évidence l'intérêt de considérer à la fois la dimension *structurelle* et systémique des théories, et leur caractère modifiable et *évolutif*.

A l'une des extrémités de cette double dimension de la physique et de ses théories, se tient la question de l'*invention*, de la *découverte* et de la *rationalité* des processus de pensée -individuelle et subjective- qui y mènent. Cette rationalité de la découverte, longtemps négligée en ce siècle-ci dans les analyses des philosophes qui réservaient à la rationalité les réorganisations de la "justification", paraît cependant évidente, au moins dans une certaine mesure, mais décisive, si l'on considère que le projet de *travail* des physiciens -et, d'une manière générale, des scientifiques- correspond à une formulation rationnelle de problèmes. Même s'ils ne l'accomplissent pas linéairement dans la voie qu'ils se proposaient, et si des éléments non rationnels interviennent dans le cours du processus, il va de soi que cette problématisation, ou cette attention, est essentielle pour caractériser ce qui fait le travail scientifique. A la notion de "travail" de la pensée, on adjoindra aussi celle de "*style*" (cf. Granger), en soulignant l'importance des comparaisons dans l'analyse des œuvres.

A l'autre extrémité du processus de transformation, se trouve la question de la *réception* des nouvelles connaissances ou conceptions, qui fait appel à la raison des individus et à celles des "communautés" ou groupes sociaux. L'ensemble des questions de transformation des connaissances, de la découverte à l'assimilation, suppose l'attention aux faits et aux contextes *historiques*, et au décentrement qu'elle suppose de la part de l'analyste par rapport à sa propre représentation. Le dialogue sans réduction entre les préoccupations du philosophe, celles de l'épistémologue et celles de l'historien -sans oublier, bien entendu le physicien-, apparaît comme la condition méthodologique nécessaire pour tenir compte, dans les problèmes qui nous concernent ici, de la *réalité effective de cette science*, la physique, comme champ de problèmes et comme activité.

Il serait certainement fécond d'aborder dans une telle perspective

d'autres questions ayant trait à la nature même de la physique, comme ses *unifications* et *élargissements* -visibles au long de son développement-, sa diversification ou son unité -de la physique des objets ordinaires à celle des champs quantifiés-, les mouvements qui s'opèrent entre ses objets et ses théories du *simple* au *complexe* -et les notions de *niveau d'organisation* et de *propriétés émergentes*, les déplacements disciplinaires, le statut des sciences limites comme la cosmologie, d'une part -aux objets uniques et aux événements non reproductibles-, et la physique subatomique, d'autre part, et celui de leur rencontre -l'Univers et les particules-, les questions posées par l'adoption de théories portées au rang de "modèles standard", etc.

Tout ceci sans compter la *nature de la physique* comme science sous d'autres angles que celui que nous avons examiné, par exemple -problème actuel de la méthodologie-, les rapports de la pensée et de la pratique, la matérialité de la pensée, les changements de conception ou d'évaluation entraînés par les "pratiques sociales".

Ces problèmes sont intéressants par eux-mêmes, car la fonction intellectuelle ne peut être séparée des autres dimensions de l'homme dans son être et sa subjectivité, comme son affectivité, son désir, sa volonté. L'acte de connaissance est intimement lié au désir de connaissance, et le travail de la pensée s'effectue dans des contextes sociaux. Rien de tout cela n'enlèvera, cependant, aux idées d'être des idées, des objets de la pensée, vécues comme telles et se présentant ainsi, saisissables par les moyens de la pensée rationnelle. On tiendra donc compte de ces dimensions, mais en refusant la confusion des tentatives réductionnistes de certaines approches sociologiques, "paradigme des paradigmes" et, pour certains, dissolution de la pensée des objets rationnels dans les pratiques sociales et donc inutilité de l'épistémologie et de la philosophie. On triera plus tard les vrais ou faux débats ; du moins la pensée critique, philosophique, est-elle assurée de survivre aux modes, car elle choisit toujours la raison contre l'opinion.

## **Bibliographie**

- D'ALEMBERT, J., *Essai sur les élémens de philosophie*, Paris, 1758 (ré-éd. Paris, Fayard, 1986) – AMPERE, A. M., *Essai sur la philosophie des sciences*, Paris, 1838.– BACHELARD, G., *Le nouvel esprit scientifique* (1934), Paris, P.U.F., 1966.– BELL, J.S., *Speakable and Non Speakable in Quantum Physics*, Cambridge University Press, 1987.– BELLONE, E., *I modelli e la concezione del mondo nella fisica moderna da Laplace a Bohr*, Milano, Feltrinelli, 1973.– BERGSON, H., *Durée et simultanéité : à propos de la théorie d'Einstein*, Paris, Alcan, 1922 ; 2<sup>ème</sup> éd. augm., 1923 (1925 ; 1929) ; in H. B., *Mélanges*, éd. par A. Robinet, Paris, Presses Univ. de France, 1972. *La pensée et le mouvant*, 1934, in H.B., *Oeuvres*, Paris, Presses Univ. de France, 1959.– BOHM, D., *Causality and chance in modern physics*, London, Routledge, 1957 (1967) ; *Wholeness and the Implicate Order*, London, Routledge, 1980.– BOHR, N., *Atomphysik og menneskelig erkendelse*, Kobenhavn, 1957, trad. fr., *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard, 1991.– BOLTZMANN, L., *Theoretical physics and philosophical problems*, Dordrecht, Reidel, 1974.– BRIDGMAN, P. W., *The logic of modern physics*, New York, Mc Millan, 1927 ; *The nature of physical theory*, New York, Dover, 1936.– BUNGE, M., *Philosophy of Physics*, Dordrecht, Reidel, 1973, trad. fr., *Philosophie de la physique*, Seuil, Paris, 1975 ; *Treatise on basic philosophy*, 8 vols. en 9 t., Dordrecht, Reidel, 1974-1989.– CARNAP, R., *Der logische Aufbau der Welt*, 1928, trad. angl., *The logical structure of the world*, Londres, Routledge, 1967 ; *Philosophical foundations of physics*, New York, Basic Books, 1966, trad. fr., *Les fondements philosophiques de la physique*, Paris, Armand Colin, 1973.– CASSIRER, E., *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin, B. Cassirer, 1910 ; *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie*, B. Cassirer, Berlin, 1921 ; trad. angl. de ces deux ouvrages, *Substance and function and Einstein's theory of relativity*, Chicago, Open Court, 1923 (New York, Dover, 1953) ; *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Göteborg, H. Arfvefirt, 1936.– DALLA CHIARA, M.L. (éd.), *Italian Studies in the Philosophy of Science*, Dordrecht, Reidel, 1981.– DA COSTA, N., *O conhecimento científico*, São Paulo, Discurso Editorial, 1997.– DESCARTES, R., *Regulæ ad directionem ingenii* (vers 1728), in AT, vol. 10, p. 349-48 ; trad. en fr., *Règles pour la direction de l'esprit*, Paris, Vrin, 1970 ; *Discours de la méthode, et Essais de cette méthode : La Dioptrique, Les Météores, La Géométrie*, Leyde, 1637 ; in AT, vol. 6 ; *Principia philosophiæ*, 1<sup>ère</sup> éd. princeps, Amsterdam, Elzevier, 1644 ; in AT, vol. 8, p. 1-353 ; trad. en fr., *Principes de la philosophie*, in AT, vol. 9, p. 1-362 ; *Oeuvres*, publ. par Ch. Adam et P. Tannery, 11 vols., 1896-1913 ; nouv. éd. rév., 1964-1974 (1996, indiquée AT).– DESTOUCHES, J.-L., *Qu'est-ce que la physique mathématique ?*, Paris, Gauthier-Villars, 1967.– DUHEM, P., *La théorie physique. Son objet, sa structure* (1906 ; 2<sup>e</sup> éd. revue, augm., 1914 ; ré-éd., Vrin, Paris, 1981). EINSTEIN, A, *Mein Weltbild*, éd. par C. Seelig, Zurich, 1953, Europa-Verlages ; West-Berlin, Ullstein Bücher, 1960 ; *Ideas and Opinions*, trad. angl, New-York, Crown, 1954 (ré-éd. New-York, Laurel, 1981) ; *Oeuvres choisies*, Paris, trad. fr., Seuil/éd. du CNRS, 6 vols., 1989-1993 ; *The collected papers of Albert Einstein* (publ. en cours), Princeton, Princeton Univ. Press, 1987-suiv. – ENRIQUES, F., *Causalité et déterminisme dans la philosophie et l'histoire des sciences*, Paris, Hermann, 1941.– FEVRIER, P. [1951]. *La structure des théories physiques*, Paris, P.U.F., 1951.– GALILEE, G., *Il Saggiatore*, Roe, 1623 ; tr. fr., *L'Essayeur*, éd. C. Chauviré, Paris, Belles Lettres, 1979 ; *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Florence, 1632 ; tr. fr., *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Paris, Seuil, 1992 ; *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Leyde, Elzevir, 1638, éd. Garugo et L. Geymonat, Turin, 1958 ; tr. fr., *Discours concernant deux sciences nouvelles*, éd. M. Clavelin, Paris, A. Colin,

1970.– GEYMONAT, L., *Scienza e realismo*, Milan, Feltrinelli, 1977. – GRANGER, G. G., *Essai d'une philosophie du style*. Paris, Armand Colin, 1968 (éd. revue, Paris, O. Jacob, 1988) ; *Pour la connaissance philosophique*, Paris, O. Jacob, 1988 ; *La vérification*, Paris, O. Jacob, 1992 ; *Formes, opérations, objets*, Paris, Vrin, 1994 ; *Le probable, le possible et le virtuel*, Paris, O. Jacob, 1995.– GRUNBAUM, A., *Philosophical problems of space and time*, New York, Knopf, 1963 (2<sup>e</sup> éd. augm., Dordrecht, Reidel, 1973).– HEISENBERG, W., *Der Teil und der Ganze. Gespräche in Umkreis der Atomphysik*, München, Piper, 1969, trad. fr., *La partie et le tout. Le monde de la physique atomique (Souvenirs, 1920-1965)*, Paris, Albin Michel, 1972 (1990).– HELMHOLTZ, H. von, *Schriften zur Erkenntnistheorie*, éd. par P. Hertz et M. Schlick, Berlin, Springer, 1921 ; trad. angl. *Epistemological writings*, éd. par R.S. Cohen et Y. Elkana, Dordrecht, Reidel, 1978.– HUME, D., *Philosophical essays concerning human understanding*, 1748 ; repris sous le titre *Inquiry concerning human understanding*, 1758 : New York, Bobbs Merrill, 1955.– KANT, I., *Critik der reinen Vernunft*, Riga, J.F. Hartknoch, 1781 (2<sup>e</sup> éd., 1787) ; trad. fr., in Kant, E., *Oeuvres philosophiques*, vol. 1, Paris, Gallimard, 1980, p. 705-1470 ; *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, 1796 ; trad. fr., *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, in Kant, E., *Oeuvres philosophiques*, vol. 2, Paris, Gallimard, 1985, p. 347-493.– KOYRE, A., *Etudes galiléennes*, Paris, Hermann, 1939 ; *Etudes newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968.– KUHN, T., *The Essential tension, Selected Studies in Scientific Traditions and Changes*, Chicago, Univ. Chicago Press, 1977.– LAKATOS, I., *Philosophical papers, vol. 1: The methodology of scientific research programmes*, éd. par J. Worrall et G. Currie, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1978.– LAPLACE, P. S. de, *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), in Laplace, *Oeuvres complètes*, Paris, Gauthier-Villars, vol. 7, 1886.– LEPLIN, Jarett 1984. *Scientific realism*, University of California Press, Berkeley, 1984.– MACH, E., *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883 (autres éd. augm. de 1888 à 1933) ; trad. fr. (sur la 4<sup>e</sup> éd. all.), *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Paris, Hermann, 1904 (ré-éd., 1923) ; *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, Leipzig, J. A. Barth, 1905 (2<sup>e</sup> éd. augm., 1906 ; autres éd.: 1917, 1920, 1926) ; trad. fr. (abrégée, sur la 2<sup>e</sup> éd. all.), *La connaissance et l'erreur*, Paris, Flammarion, 1908 (ré-éd., 1922) ; trad. angl. (sur la 5<sup>e</sup> éd. all.), *Knowledge and error*, Dordrecht, Reidel, 1976.– MARGENAU, H., *Physics and Philosophy : Selected Essays*, Dordrecht, Reidel, 1978 – MERLEAU-PONTY, J., *Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle. Etude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Paris, Gallimard, 1965 ; *La science de l'univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Paris, Vrin, 1983.– MEYERSON, E., *Identité et réalité*, Paris, Alcan, 1908 (5<sup>e</sup> éd., Paris, Vrin, 1951) ; *De l'explication dans les sciences*, 2 vols., Paris, Payot, 1921 ; *La déduction relativiste*, Paris, Payot, 1925.– NEWTON, I., *Philosophiæ Naturalis principia mathematica*, London, 1687 (3<sup>e</sup> éd., 1726) ; trad. angl. par A. Motte, *The mathematical principles of natural philosophy*, 1729 ; trad. rév. par F. Cajori, Berkeley, Univ. California Press, 1934 ; *Optics or a Treatise of the reflections, refractions, inflections, and colours of light*, 1704 (4<sup>e</sup> éd. corrigée, Londres, 1721 ; Londres, Bells, 1931).– NEWTON SMITH, W. H., *The rationality of science*, Routledge, London, 1981.– PATY, M., *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Paris, Archives contemporaines, 1988 ; *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, Paris, L'Harmattan, 1990 ; L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, in Dilworth, C. (ed.), *Intelligibility in science*, Amsterdam, Rodopi, 1992, p. 73-110 ; *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Paris, P.U.F., 1993 ; *D'Alembert ou la raison physico-mathématique au siècle des*

*Lumières*, Paris, Belles Lettres, 1998.– POINCARÉ, H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902 (1968) ; *La valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905 (1970) ; *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 1908 ; *Dernières pensées*, Paris, Flammarion, 1913 (1963).– POPPER, K., *Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*, Wien, Springer Verlag, 1934 (ré-éd. avec additions, 1959 ; 1968 ; trad. angl., *The logic of scientific discovery*, 1959 (1968) ; trad. fr., *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973 ; *Objective knowledge, an evolutionary approach*, Oxford, Clarendon Press, 1972 ; trad. fr. partielle, *La connaissance objective*, Bruxelles, Complexe, 1978 ; *Realism and the aim of science, from the Postscript to the logic of scientific discovery, vol. 1*, éd. par W. W. Bartley III, London, Hutchinson, 1983 ; trad. fr., Paris, Hermann, 1990.– RADNITZKY, G. et ANDERSSON, G. (éds.), *Progress and rationality in science*, Dordrecht, Reidel, 1978.– REICHENBACH, H., *Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit-Lehre*, Vieweg, Braunschweig, 1924 ; trad. angl., *Axiomatisation of the theory of relativity*, Berkeley, Univ. California Press, 1969 ; *Philosophie der Raum Zeit Lehre*, Berlin, de Gruyter, 1928 ; trad. angl., *The philosophy of space and time*, New York, Dover, 1957 ; *Experience and prediction*, Chicago, Univ. Chicago Press, 1938 ; *The rise of scientific philosophy*, Berkeley, Univ. California Press, 1951 (1973) ; trad. fr., *L'avènement de la philosophie scientifique*, Paris, Flammarion, 1955 ; *Modern philosophy of science*, éd. par M. Reichenbach, Londres, Routledge and Kegan Paul, 1959 ; *Selected writings*, éd. par R. S. Cohen et M. Reichenbach, 2 vols, Dordrecht, Reidel, 1978.– SCHILPP, P.A. (éd.), *Albert Einstein, philosopher and scientist*, La Salle (Ill.), The library of living philosophers, Open Court, 1949.– SHIMONY, A., *Search for a naturalistic world view*, 2 vols. Cambridge Univ. Press, 1993.– SCHLICK, M., *Philosophical papers*, éd. par H. L. Mulder et B. F. B. van de Velde-Schlick, trad. angl., 2 vols., Dordrecht, Reidel, 1979.– SCHRÖDINGER, E., *Science and humanism. Physics in our times*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1951 ; trad. fr. in E.S., *Physique quantique et représentation du monde*, Paris, Seuil, 1992 ; *What is life ? The physical aspects of the living cell*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1955 ; *Meine Weltansicht*, Hambourg, P. Zsolnay, 1961, trad. fr., *Ma conception du monde*, Paris, Mercure de France/Le Mail, 1982.– STEGMULLER, W., *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie*, 2 vols., Heidelberg, Springer, 1973 ; *The structuralist view of theories. A possible analogue of the Bourbaki programme in physical science*, Berlin, Springer, 1979.– TORALDO DI FRANCA, G., *Le cose e loro nomi*, Milan, Laterza, 1986.– TORRETTI, R., *Creative understanding. Philosophical reflections on physics*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1990.– VAN FRASSEN, B., *The scientific image*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1980 ; *Laws and symmetry*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1989 ; trad. fr., *Lois et symétries*, Paris, Vrin, 1995.– VUILLEMIN, J., *Physique et métaphysique kantienne*, Paris, Presses Univ. de France, 1955 ; *Physique et métaphysique chez Descartes*, Paris, 1960 (1987) ; *La logique et le monde sensible. Etude sur les théories contemporaines de l'abstraction*, Paris, Flammarion, 1971.– WARTOFSKY, M. W., *Conceptual Foundations of Scientific Thought. An Introduction to the Philosophy of Science*, London, Mac Millan, 1968.– ZAHAR, E., *Einstein's revolution. A study in heuristics*, La Salle (Ill.), Open Court, 1989.

**Textes**

<1> Galileo GALILEI, *Il Saggiatore*, Rome, 1623 tr. fr., *L'Essayeur*, éd. C. Chauviré, Paris, Belles Lettres, 1979, p. 141, 241.

La philosophie est écrite dans cet immense livre qui se tient toujours ouvert devant nos yeux, je veux dire l'Univers, mais on ne peut le comprendre si l'on ne s'applique d'abord à en comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit dans la langue mathématique et ses caractères sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques, sans le moyen desquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot. Sans eux c'est une errance vaine dans un labyrinthe obscur.

(...)

Que, dans les corps extérieurs, il faille, pour susciter en nous les saveurs, les odeurs et les sons, autre chose que des grandeurs, des figures, des nombres, et des mouvements lents ou rapides, je ne le crois pas ; et j'estime que si l'on supprime les oreilles, la langue et le nez, il reste bien les figures, les nombres et les mouvements, mais non plus les odeurs, ni les saveurs ni les sons qui, en dehors de l'animal vivant, à ce que je crois, ne sont pas autre chose que des noms (...).

<2> René DESCARTES, *Regulæ ad directionem ingenii* (vers 1728), in *Descartes Oeuvres*, publ. par Ch. Adam et P. Tannery, 11 vols., 1896-1913 ; nouv. éd. rév., 1964-1974 ; republ., 1996, vol. 10, p. 349-488 ; trad. en fr. par J. Sirven, *Règles pour la direction de l'esprit*, Paris, Vrin, 1970, p. 106-125.

*Règle XIV* (extraits).

En déduisant un objet déterminé et inconnu d'un autre déjà connu antérieurement, on ne trouve pas pour cela chaque fois un nouveau genre d'être. Il y a seulement une extension de toute notre connaissance qui nous fait comprendre que d'une manière ou d'une autre l'objet cherché participe de la nature de ceux qui nous ont été donnés dans la proposition. (...) Certes, tous ces êtres déjà connus, tels que l'étendue, la figure, le mouvement, et choses semblables, qu'il n'est pas à propos d'énumérer ici, sont connus en divers sujets par le moyen d'une même idée, et nous n'imaginons pas autrement la figure d'une couronne, si elle est d'argent, que si elle est d'or. Cette idée commune ne se transfère d'un sujet à un autre que par une simple comparaison : nous affirmons que ce qu'on cherche est sous tel ou tel rapport semblable, identique ou égal à un objet donné, de telle sorte que, dans tout raisonnement, c'est par une comparaison seulement que nous connaissons la vérité d'une manière précise. (...)

Dans sa plus grande partie, l'industrie humaine ne consiste pas à autre chose qu'à transformer ces proportions de manière à voir clairement l'égalité qui existe entre ce que ce qu'on cherche et ce qu'il y a de connu. Il faut noter ensuite que rien ne peut se ramener à cette égalité si ce n'est ce qui emporte le plus et le moins, et tout cela est compris sous le nom de grandeur. De la sorte, une fois qu'(...) les termes de la difficulté ont été abstraits de tout sujet, nous voyons ici que n'avons dans la suite qu'à nous occuper des grandeurs en général. (...)

Rien ne se dit des grandeurs en général qui ne puisse aussi se rapporter spécialement à n'importe laquelle en particulier. Il est facile d'en conclure qu'il ne nous sera pas peu utile d'appliquer ce que nous comprendrons être dit des grandeurs en général à l'espèce de grandeur qui entre toutes sera représentée le plus facilement et le plus distinctement dans notre imagination. Cette espèce de grandeur est l'étendue réelle du corps, abstraction faite de tout le reste sauf de la figure (...)

Dès lors, il suffit à notre dessein de considérer dans l'étendue elle-même tous les aspects qui peuvent nous aider à exposer les différences de proportions, et il ne s'en présente que trois, savoir la dimension, l'unité et la figure. Par dimension, nous n'entendons pas autre chose que le mode et la manière selon laquelle un sujet est considéré comme mesurable : de la sorte, non seulement la longueur, la largeur et la profondeur sont les dimensions du corps, mais encore la pesanteur est la dimension suivant laquelle les sujets sont pesés, la vitesse est la dimension du mouvement, et infinité d'autres choses de cette sorte. Car la division elle-même en plusieurs parties égales, qu'elle soit réelle ou intellectuelle seulement, est proprement la dimension selon laquelle nous comptons les choses, et cette façon de constituer un nombre s'appelle proprement une espèce de dimension, bien qu'il y ait quelque diversité dans la signification du mot de division. En effet, si nous considérons les parties par rapport au tout, on dit alors que nous comptons ; si au

contraire nous avons égard au tout en tant qu'il est divisé en parties, nous le mesurons.

Il en résulte manifestement qu'il peut y avoir dans le même sujet une infinité de dimensions diverses et qu'elles n'ajoutent absolument rien aux choses qui les possèdent, mais qu'on les comprend de la même manière, soit qu'elles aient un fondement réel dans les sujets eux-mêmes, soit qu'elles aient été imaginées au gré de notre intelligence. (...) Il en va de même pour toutes ces choses, si on les considère seulement sous le rapport de la dimension, comme il faut le faire ici et dans les disciplines mathématiques ; car il appartient plutôt aux physiciens d'examiner si leur fondement est réel. (...)

L'unité est cette nature commune de laquelle (...) doivent également participer toutes les choses que l'on compare entre elles. S'il n'y en a pas déjà quelqu'une de déterminée dans la question, nous pouvons prendre à sa place soit une des grandeurs déjà données, soit n'importe quelle autre, et ce sera la mesure commune à toutes les autres. Nous comprendrons qu'il existe en elle autant de dimensions qu'il y en a dans les extrêmes à comparer entre eux. (...)

En ce qui regarde les figures de leurs diverses espèces innombrables, nous n'emploierons ici que celles par lesquelles on exprime le plus facilement toutes les différences des rapports ou proportions. Or, il y a seulement deux genres de choses que l'on compare entre elles : les pluralités et les grandeurs. Nous avons aussi deux genres de figures qui nous servent à les concevoir : car, par exemple, les points [ordonnés dans l'espace] qui désignent un nombre triangulaire ou l'arbre qui fait connaître la généalogie de quelqu'un, etc., sont des figures pour représenter la pluralité ; mais celles qui sont continues et indivises, comme un triangle, un carré, etc., font connaître les grandeurs. (...)

Maintenant, afin d'exposer quelles sont de toutes ces figures celles dont nous allons nous servir ici, il faut savoir que tous les rapports qui peuvent exister entre des êtres de même genre doivent se rapporter à deux points essentiels, qui sont l'ordre ou la mesure. (...)

On doit savoir aussi que les grandeurs continues peuvent, grâce à une unité d'emprunt, être parfois ramenées complètement à une pluralité, et toujours au moins en partie. La pluralité des unités peut ensuite être disposée dans un tel ordre que la difficulté, qui se rapportait à la connaissance de la mesure, dépende finalement de l'ordre seul : c'est dans ce progrès que l'art nous est du plus grand secours. (...)

<3>. Isaac NEWTON, *Philosophiae Naturalis principia mathematica*, London, 1687 (3<sup>e</sup> éd., 1726). Trad. fr. in M.-C. Biarnais, *Les Principia* de Newton. Genèse et structure des chapitres fondamentaux avec traduction nouvelle, *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, n<sup>o</sup> 2, 1982.

a/ *Préface* (mai 1687).

Tandis que les Anciens ont fait le plus grand cas de la *mécanique* dans l'investigation des choses de la nature (...) et que des auteurs plus récents ont entrepris, après rejet des formes substantielles et des qualités occultes, de ramener les phénomènes de la nature à des lois mathématiques, on se propose, dans ce traité, de perfectionner, par la *mathesis*, la *mécanique*, en tant que celle-ci se rapporte à la philosophie. Les Anciens, il est vrai, constituèrent une double *mécanique* : la *rationnelle* qui procède rigoureusement par voie démonstrative, et la *pratique*. A la pratique se rapportent tous les arts manuels desquels la *mécanique* a principalement tiré son nom.

Mais, comme les artisans ont coutume d'opérer peu exactement, on en est venu à distinguer toute la *mécanique* de la *géométrie* de sorte qu'on rapporte tout ce qui est exact à la *géométrie* et tout ce qui l'est moins à la *mécanique*. Cependant, les erreurs ne viennent pas de l'art, mais de ceux qui le pratiquent. Un mécanicien est d'autant plus imparfait qu'il opère avec une moindre exactitude et il est le plus parfait de tous s'il est capable d'opérer avec la plus grande exactitude. Car, les descriptions et des lignes droites et des cercles sur lesquelles la *géométrie* est fondée concernent la *mécanique*. Ces lignes, la *géométrie* n'enseigne pas à les décrire, mais elle les postule. Elle postule en effet que le néophyte apprenne à les décrire exactement avant d'atteindre le seuil de la *géométrie* ; cette science enseigne, ensuite, la manière de résoudre les problèmes au moyen de ces descriptions. Certes, décrire des droites et des cercles constitue bien des problèmes mais ils ne sont pas géométriques. De la *mécanique*, on tire leur solution ; en *géométrie*, on enseigne le parti à tirer des problèmes résolus.

Et la *géométrie* se vante de prouver tant avec si peu de principes tirés d'ailleurs. La *géométrie* est donc fondée sur la pratique *mécanique* et elle n'est rien de plus que cette autre partie de la *mécanique* universelle où l'on propose et démontre l'art de mesurer avec rigueur. Mais, comme les arts manuels s'appliquent principalement à mouvoir les corps, on en est venu à rapporter communément la *géométrie* à la grandeur, la *mécanique* au mouvement. Et c'est en ce sens que la *mécanique* rationnelle sera la science et des mouvements qui résultent de forces quelconques et des forces qui sont requises pour des mouvements quelconques. Cette science sera [ici] établie et démontrée rigoureusement. (...)

b/ *Livre I. - Méthode des premières et dernières raisons.*

La sous-tendante évanouissante d'un angle de contact, dans toutes les courbes ayant une courbure finie au point de contact, est à la fin [du temps d'évanouissement] en raison double de la sous-tendante de l'arc, qui délimite cet angle.

(...) Ce que l'on a démontré pour les lignes courbes et les surfaces qu'elles embrassent s'applique facilement aux surfaces courbes des solides et à ce qu'elles contiennent. De fait, j'ai mis ce lemme en premier lieu, afin d'échapper à l'ennui de déployer de longues démonstrations jusqu'à l'absurde, selon la coutume des anciens géomètres. En effet, la méthode des indivisibles permet de restreindre davantage les démonstrations. Mais, parce que l'hypothèse des indivisibles est plus rigide et que cette méthode en est jugée moins géométrique, j'ai préféré conduire les démonstrations des choses qui suivent [dans ce livre] au moyen des dernières sommes et raisons de quantités évanouissantes et aux premières sommes et raisons de quantités naissantes ; c'est-à-dire jusqu'aux limites de ces sommes et raisons; et c'est pour cela que j'ai placé en premier lieu et aussi brièvement que possible les démonstrations de ces limites. (...)

Par la suite donc, quand je parlerai de quantités aussi petites que possible, évanouissantes ou dernières, parce que j'ai soin de rendre mon propos facile à concevoir, qu'on se garde bien de comprendre par là des quantités déterminées par leur grandeur, mais qu'on pense toujours qu'elles doivent diminuer sans limites.

<4>. Jean D'ALEMBERT, *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*, Paris, David, 1752 (ré-éd. Bruxelles, Culture et civilisation, 1966), p. vii-xliii.

*Introduction* (extraits).

Les sciences qu'on appelle Physico-mathématiques (...) consistent dans l'application du calcul aux phénomènes de la nature. (...) C'est à la plus subtile Géométrie qu'il est permis de tenter cette théorie [de la résistance des fluides]. L'invention du calcul différentiel et intégral nous a mis en état de suivre en quelque manière le mouvement des corps jusque dans leurs élémens ou dernières particules. C'est avec le secours seul de ces calculs qu'il est permis de pénétrer dans les fluides, et de découvrir le jeu de leurs parties, l'action qu'exercent les uns sur les autres ces atomes innombrables dont un fluide est composé et qui paraissent tout à la fois unis et divisés, dépendants et indépendants les uns des autres. Aussi le mécanisme intérieur des fluides, si peu analogue à celui des corps solides que nous touchons et sujet à des lois toutes différentes, devrait être pour les philosophes un objet particulier d'admiration, si l'étude de la nature, des phénomènes les plus simples, des éléments même de la matière, ne les avoit accoutumés à ne s'étonner de rien, ou plutôt à s'étonner également de tout. Aussi peu éclairés que le peuple sur les premiers principes de toutes choses, ils n'ont et ne peuvent avoir d'avance que dans la combinaison qu'ils font de ces principes, et les conséquences qu'ils en tirent ; et c'est dans cette espèce d'analyse, que les mathématiques leur sont utiles. Cependant avec ce secours même, la résistance des fluides renferme encore des difficultés (...) considérables (...).

Il m'a paru que le peu de progrès qu'on y a fait jusqu'à présent, vient de ce que l'on n'a pas encore saisi les vrais principes, d'après lesquels il faut la traiter. J'ai donc cru devoir m'appliquer à chercher ces principes et la manière d'y appliquer le calcul s'il est possible. Car il ne faut point confondre ces deux objets, et les géomètres modernes n'ont peut-être pas été assez attentifs sur ce point. C'est souvent le désir de pouvoir faire usage du calcul qui les détermine dans le choix des principes, au lieu qu'ils devraient examiner d'abord les principes en eux-mêmes, sans songer d'avance à les plier de force au calcul. La Géométrie qui ne doit qu'obéir à la Physique, quand elle se réunit avec elle, lui commande quelquefois. S'il arrive que la question qu'on veut examiner soit trop compliquée pour que tous les élémens puissent entrer dans la comparaison analytique qu'on en veut faire, on sépare les plus incommodes, on leur en substitue d'autres, moins gênants, mais aussi moins réels, et l'on est étonné de n'arriver, malgré un travail pénible, qu'à un résultat contredit par la nature comme si, après l'avoir déguisée, tronquée ou altérée, une combinaison purement mécanique pouvait nous la rendre.

Je me suis proposé d'éviter cet inconvénient dans l'ouvrage que je donne aujourd'hui. J'ai cherché les principes de la résistance des fluides comme si l'analyse ne devoit y entrer pour rien, et ces principes une fois trouvés, *j'ai essayé* d'y appliquer l'Analyse. (...)

La théorie de la résistance des fluides (...) est encore très imparfaite dans ses éléments mêmes. Ces raisons m'ont engagé à traiter cette matière par une méthode entièrement nouvelle et sans rien emprunter de ceux qui m'ont précédé

dans le même travail. La théorie que j'expose dans cet ouvrage, ou plutôt dont je vais donner les principes, a, ce me semble, l'avantage de n'être appuyée sur aucune supposition arbitraire : je suppose seulement, ce que personne ne peut me contester, qu'un fluide est un corps composé de particules très petites, détachées et capables de se mouvoir librement. (...)

Je crois encore devoir donner à ceux qui dans la suite approfondiront cette matière, un avis dont je commencerai par profiter moi-même : c'est de ne pas ériger trop légèrement des formules d'algèbre en vérités ou propositions physiques. L'esprit de calcul, qui a chassé l'esprit de système, règne peut-être un peu trop à son tour. Plus on peut tirer d'utilité de l'application de la Géométrie à la Physique, plus on doit être circonspect dans cette application. C'est à la simplicité de son objet que la Géométrie est redevable de sa certitude ; à mesure que l'objet devient plus composé, la certitude s'obscurcit et s'éloigne. Il faut donc savoir s'arrêter sur ce qu'on ignore, ne pas croire que les mots de théorème et de corollaire, fassent par quelque vertu secrète l'essence d'une démonstration, et qu'en écrivant à la fin d'une proposition ce qu'il fallait démontrer, on rendra démontré ce qui ne l'est pas. (...)

<5>. Immanuel KANT, *Critik der reinen Vernunft*, Riga, J.F. Hartknoch, 1781 (2<sup>e</sup> ed., 1787) ; trad. fr. par J.-L. Delamarre et F. Marty, in Kant, *Oeuvres philosophiques*, dir. F. Alquié, Paris, Gallimard, 1980, vol. 1, p. 705-1470 : extraits de l'*Analytique transcendantale*, p. 899-916.

[Les principes synthétiques de l'entendement pur sont : les axiomes de l'intuition, les anticipations de la perception, les analogies de l'expérience, les postulats de la pensée empirique en général.]

[Principe des *axiomes de l'intuition*] : Toutes les intuitions sont des grandeurs intensives. (...) J'appelle grandeur extensive celle dans laquelle la représentation des parties rend possible la représentation du tout (et par conséquent la précède nécessairement). (...)

*Anticipations de la perception*. En voici le principe :

**insérer ici les photocopies Kant/1 et 2**

[Ces deux principes, des Axiomes de l'intuition et des Anticipations de la perception, sont des principes] mathématiques parce qu'ils nous autoris[ent] à appliquer la mathématique aux phénomènes, se rapportent aux phénomènes selon leur simple possibilité, et nous enseign[ent] comment ces phénomènes peuvent être produits, suivant les règles d'une synthèse mathématique, aussi bien selon leur intuition que selon le réel de leur perception. On peut donc employer, dans l'un comme dans l'autre, les grandeurs numériques et, avec elles, la détermination du phénomène comme grandeur (...) (p. 916).

<6>. Joseph Louis LAGRANGE, *Mécanique analytique* [1ère éd., Paris, 1788]. édition complète réunissant les notes de la 3<sup>e</sup> et de 4<sup>e</sup> éd., 2 vols., Paris, Blanchard, 1965. (extr. des Avertissements, p. i-iv).

On a déjà plusieurs Traités de mécanique, mais le plan de celui-ci est entièrement neuf. Je me suis proposé de réduire la théorie de cette science, et l'art de résoudre les problèmes qui s'y rapportent, à des formules générales, dont le simple développement donne toutes les équations nécessaires pour la solution de chaque problème. J'espère que la manière dont j'ai tâché de remplir cet objet ne laissera rien à désirer. (...) Cet ouvrage aura d'ailleurs une autre utilité ; il réunira et présentera sous un même point de vue les différents principes trouvés jusqu'ici pour faciliter la solution des questions de Mécanique, en montrera la liaison et la dépendance mutuelle, et mettra à portée de juger de leur justesse et de leur étendue. Je le divise en deux parties : la Statique ou la théorie de l'équilibre, et la Dynamique ou la théorie du mouvement ; et chacune de ces parties traitera séparément des corps solides et des fluides.

On ne trouvera point de figures dans cet ouvrage. Les méthodes que j'y expose ne demandent ni constructions, ni raisonnemens géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une marche régulière et uniforme. Ceux qui aiment l'Analyse, verront avec plaisir la Mécanique en devenir une nouvelle branche, et me sauront gré d'en avoir étendu ainsi le domaine. (...)

On a conservé la notation ordinaire du Calcul différentiel, parce qu'elle répond au système des infiniment petits, adopté dans ce Traité. Lorsqu'on a bien conçu l'esprit de ce système, et qu'on s'est convaincu de l'exactitude de ses résultats par la méthode géométrique des premières et dernières raisons, ou par la méthode analytique des fonctions dérivées, on peut employer les infiniment petits comme un instrument sûr et commode pour abréger et simplifier les démonstrations. C'est ainsi qu'on abrège les démonstrations des Anciens, par la méthode des indivisibles. (...)

<7>. Pierre Simon LAPLACE, *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), in Laplace, *Oeuvres complètes*, Paris, Gauthier-Villars, vol. 7. Extraits tirés de l'édition de l'*Essai*, Paris, Bourgois, 1986, p. 31-35, 42.

*De la Probabilité.*

Tous les événements, ceux mêmes qui par leur petitesse semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature, en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du soleil. Dans l'ignorance des liens qui les unissent au système entier de l'univers, on les a fait dépendre des causes finales, ou du hasard, suivant qu'ils arrivaient et se succédaient avec régularité, ou sans ordre apparent ; mais ces causes imaginaires ont été successivement reculées avec les bornes de nos connaissances, et disparaissent entièrement devant la saine philosophie, qui ne voit en elles que l'expression de l'ignorance où nous sommes des véritables causes.

Les événements actuels ont avec les précédents une liaison fondée sur le principe évident, qu'une chose ne peut pas commencer d'être, sans une cause qui la produise. Cet axiome, connu sous le nom de *principe de la raison suffisante*, s'étend aux actions mêmes que l'on juge indifférentes. La volonté la plus libre ne peut sans un motif déterminant leur donner naissance ; car si, toutes les circonstances de deux positions étant exactement semblables, elle agissait dans l'une et s'abstenait d'agir dans l'autre, son choix serait en effet sans cause : elle serait alors, dit Leibniz, le hasard aveugle des épicuriens. L'opinion contraire est une illusion de l'esprit qui, perdant de vue les raisons fugitives du choix de la volonté dans les choses indifférentes, se persuade qu'elle s'est déterminée d'elle-même et sans motifs.

Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'Astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en Mécanique et en Géométrie, jointes à celle de la pesanteur universelle, l'ont mis à portée de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde. En appliquant la même méthode à quelques autres objets de ses connaissances, il est parvenu à ramener à des lois générales les phénomènes observés, et à prévoir ceux que des circonstances données doivent faire éclore. Tous ces efforts dans la recherche de la vérité tendent à le rapprocher sans cesse de l'intelligence que nous venons de concevoir, mais dont il restera toujours infiniment éloigné. (...)

La courbe décrite par une simple molécule d'air ou de vapeurs est réglée d'une manière aussi certaine que les orbites planétaires : il n'y a de différence entre elles que celle qu'y met notre ignorance. La probabilité est relative en partie à cette ignorance, en partie à nos connaissances. (...) Chacune des causes auxquelles un

événement observé peut être attribué est indiquée avec d'autant plus de vraisemblance qu'il est plus probable que, cette cause étant supposée exister, l'événement aura lieu ; la probabilité de l'existence d'une quelconque de ces causes est donc une fraction dont le numérateur est la probabilité de l'événement, résultante de cette cause, et dont le dénominateur est la somme des probabilités semblables relatives à toutes les causes(...). Si ces diverses causes considérées *a priori* sont inégalement probables, il faut au lieu de la probabilité de l'événement, résultante de chaque cause, employer le produit de cette probabilité, par la possibilité de la cause elle-même. (...)

<8> Bernhard RIEMANN, Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen [Mémoire présenté le 10 juin 1854 à la Faculté philosophique de Göttingen], *Abhandlungender königlichen Gessellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, vol. 13, 1867 ; également in Riemann, *Gesammelte mathematische Werke. Nachträge*, éd. par M. Noether et W. Wirtinger, Leipzig, 1902. Trad. fr. par J. Houel, Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie, in Riemann, *Oeuvres mathématiques*, Paris, 1898 (nouv. tirage, Paris, Blanchard, 1968, p. 272-287).

On sait que la Géométrie admet comme données préalables non seulement le concept de l'espace, mais encore les premières idées fondamentales des constructions dans l'espace. Elle ne donne de ces concepts que des définitions nominales, les déterminations essentielles s'introduisant sous forme d'axiomes. Les rapports mutuels de ces données primitives restent enveloppés de mystère ; on n'aperçoit pas bien si elles sont nécessairement liées entre elles, ni jusqu'à quel point elles le sont, ni même *a priori* si elles peuvent l'être.

Depuis Euclide jusqu'à Legendre, pour ne citer que le plus illustre des réformateurs modernes de la Géométrie, personne, parmi les mathématiciens ni parmi les philosophes, n'est parvenu à éclaircir ce mystère. La raison en est que le concept général des grandeurs de dimensions multiples, comprenant comme cas particulier les grandeurs étendues, n'a jamais été l'objet d'aucune étude. En conséquence, je me suis posé d'abord le problème de construire, en partant du concept général de grandeur, le concept d'une grandeur de dimensions multiples. Il ressortira de là qu'une grandeur de dimensions multiples est susceptible de différents rapports métriques, et que l'espace n'est par suite qu'un cas particulier d'une grandeur de trois dimensions. Or, il s'ensuit de là nécessairement que les propositions de la Géométrie ne peuvent se déduire des concepts généraux de grandeur, mais que les propriétés, par lesquelles l'espace se distingue de toute autre grandeur imaginable de trois dimensions, ne peuvent être empruntées qu'à l'expérience. De là surgit le problème de rechercher les faits les plus simples au moyen desquels puissent s'établir les rapports métriques de l'espace, problème qui, par la nature même de l'objet, n'est pas complètement déterminé ; car on peut indiquer plusieurs systèmes de faits simples, suffisants pour la détermination des rapports métriques de l'espace. Le plus important, pour notre but actuel, est celui qu'Euclide a pris pour base. Ces faits, comme tous les faits possibles, ne sont pas nécessaires ; ils n'ont qu'une certitude empirique, ce sont des hypothèses. On peut donc étudier leur probabilité, qui est certainement très considérable dans les limites de l'observation, et juger d'après cela du degré de sûreté de l'extension de ces faits en dehors de ces mêmes limites, tant dans le sens des immensurablement grands que dans celui des immensurablement petits. (...)

En essayant maintenant de traiter le premier de ces problèmes, relatif au développement du concept d'une grandeur de dimensions multiples, je me crois d'autant plus obligé de solliciter l'indulgence des lecteurs, que je suis moins exercé dans les travaux philosophiques de cette nature, dont la difficulté réside plutôt dans la conception que dans la construction. (...)

Une partie d'une variété, séparée du reste par une marque ou par une limite, s'appelle un quantum. La comparaison des quanta au point de vue de la

quantité, s'effectue, pour les grandeurs discrètes, au moyen du dénombrement; pour les grandeurs continues, au moyen de la mesure. (...)

Les recherches [sur le cas de l'absence de mesure] forment une branche générale de la théorie des grandeurs, indépendante des déterminations métriques, et dans laquelle elles ne sont pas considérées comme existant indépendamment de la position, ni comme exprimables au moyen d'une unité, mais comme des régions dans une variété. (...)

Dans cette branche générale de la théorie des grandeurs étendues (...) l'on ne suppose rien de plus que ce qui est déjà renfermé dans le concept de ces grandeurs. (...)

Les rapports des variétés de deux dimensions peuvent se représenter géométriquement par des surfaces, et (...) ceux des variétés d'un plus grand nombre de dimensions peuvent se ramener à ceux des surfaces qu'elles renferment. (...) Lorsqu'on étend les constructions de l'espace à l'immensurablement grand, il faut faire la distinction entre l'illimité et l'infini ; le premier appartient aux rapports d'étendue, le second aux rapports métriques. Que l'espace soit une variété illimitée de trois dimensions, c'est là une hypothèse qui s'applique dans toutes nos conceptions du monde extérieur. (...) Mais l'infinité de l'espace n'en est en aucune manière la conséquence; au contraire, si l'on suppose les corps indépendants du lieu, et qu'ainsi l'on attribue à l'espace une mesure de courbure constante, l'espace serait nécessairement fini, dès que cette mesure de courbure aurait une valeur positive, si petite qu'elle fût. (...) Mais si cette indépendance entre les corps et le lieu n'existe pas, alors, des rapports métriques reconnus dans le grand, on ne peut rien conclure pour ceux de l'infiniment petit. (...)

Il semble que les concepts empiriques sur lesquels sont fondées les déterminations métriques de l'étendue, le concept du corps solide et celui du rayon lumineux, cessent de subsister dans l'infiniment petit. Il est donc très légitime de supposer que les rapports métriques de l'espace dans l'infiniment petit ne sont pas conformes aux hypothèses de la géométrie, et c'est ce qu'il faudrait effectivement admettre, du moment où l'on obtiendrait par là une explication plus simple des phénomènes. La question de la validité des hypothèses de la géométrie dans l'infiniment petit est liée avec la question du principe intime des rapports métriques dans l'espace. (...)

Des recherches partant de concepts généraux, comme l'étude que nous venons de faire, ne peuvent avoir d'autre utilité que d'empêcher que ce travail ne soit entravé par des vues trop étroites, et que le progrès dans la connaissance de la dépendance mutuelle des choses ne trouve un obstacle dans les préjugés traditionnels.

Ceci nous conduit dans le domaine d'une autre science, dans le domaine de la Physique.

<9>. Ludwig BOLTZMANN, *Vorlesungen über Gastheorie*, 2 vols., Leipzig, Barth, 1896, 1898 ; trad. fr. par A. Gallioti, *Leçons sur la théorie des gaz*, Introd. et notes par Marcel Brillouin, 2 vols., Paris, 1905. Extr., p. 248-255.

*Sur le retour d'un système à son ancien état.*

Ce n'est en aucune façon le signe avec lequel on compte les temps qui constitue la différence caractéristique entre un état organisé et un état dénué d'organisation. Si, dans l'état que l'on a adopté comme état initial de la représentation mécanique de l'univers, on venait à inverser exactement les directions de toutes les vitesses sans changer ni leurs grandeurs ni les positions des parties du système ; si l'on parcourait, pour ainsi dire à reculons, les différents états du système, ce serait encore un état non probable par lequel on débiterait et un état plus probable qu'on atteindrait par la suite. C'est seulement pendant le laps de temps qui conduit d'un état initial très peu probable à un état ultérieur beaucoup plus probable, que les états se transforment d'une façon différente dans la direction positive des temps et dans la direction négative.

Le passage d'un état organisé à un état non organisé est seulement extrêmement probable. Le passage inverse présente aussi une certaine probabilité calculable, bien que sa faiblesse dépasse l'imagination, et cette probabilité ne tend vers zéro, en fait, que dans le cas limite où le nombre des molécules devient infini. Donc, le fait qu'un système fermé composé d'un nombre fini de molécules, qui présentait au début un état organisé, et qui est passé ensuite à un état dénué d'organisation, vient à reprendre à nouveau un état organisé, après l'écoulement d'un laps de temps de longueur inouïe quand le nombre des molécules est énorme, non seulement n'est pas un démenti donné à notre théorie, mais en est une confirmation.

*Relations avec le deuxième principe de la Thermodynamique.*

Si donc nous nous représentons l'univers sous la forme d'un système mécanique de dimensions colossales, composé d'un nombre énorme d'atomes, provenant d'un état initial complètement organisé et possédant encore actuellement un état organisé au moins dans ses parties essentielles, nous déduisons de cette hypothèse des conséquences qui concordent parfaitement en apparence avec les faits observés. Mais, au point de vue purement théorique, je pourrais dire philosophique, par opposition au point de vue de la Thermodynamique générale, qui repose sur une base purement phénoménologique, cette conception présente certains côtés nouveaux. La Thermodynamique générale procède de ce fait fondamental que tous les phénomènes naturels, autant que nos observations ont pu les atteindre, se sont toujours, jusqu'à présent, comportés comme irréversibles.

Selon les principes de la phénoménologie, la Thermodynamique générale formule donc son second principe de telle sorte que l'irréversibilité de tous les phénomènes naturels, sans restriction, est posée comme un soi-disant axiome, exactement comme la Physique générale, conçue au point de vue purement phénoménologique, pose comme axiome la divisibilité illimitée et indéfinie de la

matière.

(...) La Thermodynamique générale est indissolublement liée à l'irréversibilité absolue de tous les phénomènes naturels sans restriction. Elle admet une fonction (l'entropie), dont la valeur, dans chaque phénomène naturel, ne peut jamais varier que dans un seul sens, à savoir : croître. Chaque état de l'univers diffère donc de tout état antérieur par une valeur de l'entropie sensiblement plus grande. Tous les phénomènes de la nature sont provoqués par l'écart existant entre la valeur actuelle de l'entropie et sa valeur maximum et cette différence va constamment en décroissant. Malgré l'invariabilité du montant total de l'énergie, son pouvoir de transformation ira donc toujours en diminuant, les phénomènes naturels seront de plus en plus ternes et toute restauration de l'ancienne valeur de l'entropie sera exclue.

On ne peut pas affirmer qu'une telle conséquence soit en contradiction avec l'expérience, puisqu'elle repose sur nos observations actuelles ; mais on avouera qu'il n'est guère satisfaisant de considérer a priori comme absolument nécessaire l'extension à l'univers tout entier d'une telle conclusion, basée sur l'expérience. La découverte d'un expédient satisfaisant de toute façon, que l'on regarde le temps comme infini ou bien comme formant un anneau fermé, paraît bien désirable. En tout cas, nous regarderons plutôt ce caractère irréversible du temps, qui nous est donné par l'expérience, comme une simple apparence due au point de vue particulier et restreint auquel nous nous plaçons. (...)

<10>. Ernst MACH, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883 (autres éd. augm. de 1888 à 1933) ; trad. fr. (sur la 4<sup>e</sup> éd. all.), *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Paris, Hermann, 1904 (ré-éd., 1923). Extr., p.449-457.

<11>. Henri POINCARÉ, *La valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905 ; 1970. Extr. du chap. 5, L'analyse et la physique, p. 104-113.

### *L'analyse et la physique*

La physique mathématique et l'analyse pure ne sont pas seulement des puissances limitrophes, entretenant des rapports de bon voisinage; elles se pénètrent mutuellement et leur esprit est le même.

Le physicien ne peut demander à l'analyste de lui révéler une vérité nouvelle ; tout au plus celui-ci pourrait-il l'aider à la pressentir. (...)

Toutes les lois sont (...) tirées de l'expérience, mais pour les énoncer il faut une langue spéciale ; le langage ordinaire est trop pauvre, il est d'ailleurs trop vague, pour exprimer des rapports si délicats, si riches et si précis. Voilà donc une première raison pour laquelle le physicien ne peut se passer des mathématiques; elles lui fournissent la seule langue qu'il puisse parler. (...) L'analyste, qui poursuit un but purement esthétique, contribue par cela même à créer une langue plus propre à satisfaire le physicien.

(...) La loi sort de l'expérience, mais elle n'en sort pas immédiatement. L'expérience est individuelle, la loi qu'on en tire est générale, l'expérience n'est qu'approchée, la loi est précise ou du moins prétend l'être. L'expérience se fait dans des conditions toujours complexes, l'énoncé de la loi élimine ces complications. C'est ce qu'on appelle «corriger les erreurs systématiques». En un mot, pour tirer la loi de l'expérience, il faut généraliser ; c'est une nécessité qui s'impose à l'observateur le plus circonspect.

Mais comment généraliser ? Toute vérité particulière peut évidemment être étendue d'une infinité de manières. Entre ces mille chemins qui s'ouvrent devant nous, il faut faire un choix, au moins provisoire ; dans ce choix, qui nous guidera ? Ce ne pourra être que l'analogie. Mais que ce mot est vague ! L'homme primitif ne connaît que les analogies grossières, celles qui frappent les sens, celles des couleurs ou des sons. Ce n'est pas lui qui aurait songé à rapprocher par exemple la lumière de la chaleur rayonnante. Qui nous a appris à connaître les analogies véritables profondes, celles que les yeux ne voient pas et que la raison devine ? C'est l'esprit mathématique, qui dédaigne la matière pour ne s'attacher qu'à la forme pure. C'est lui qui nous a enseigné à nommer du même nom des êtres qui ne diffèrent que par la matière, à nommer du même nom par exemple la multiplication des quaternions et celle des nombres entiers.

Comment faut-il traiter les équations de la physique mathématique ? Devons-nous simplement en déduire toutes les conséquences, et les regarder comme des réalités intangibles ? Loin de là; ce qu'elles doivent nous apprendre surtout, c'est ce qu'on peut et ce qu'on doit y changer.

Ainsi les analogies mathématiques, non seulement peuvent nous faire pressentir les analogies physiques, mais encore ne cessent pas d'être utiles, quand ces dernières font défaut. En résumé, le but de la physique mathématique n'est pas seulement de faciliter au physicien le calcul numérique de certaines constantes ou l'intégration de certaines équations différentielles. Il est encore, il est surtout de lui faire connaître l'harmonie cachée des choses en les lui faisant voir d'un nouveau

biais.

De toutes les parties de l'analyse, ce sont les plus élevées, ce sont les plus pures, pour ainsi dire, qui seront les plus fécondes entre les mains de ceux qui savent s'en servir. Mais ce n'est pas tout; la physique ne nous donne pas seulement [à nous, les mathématiciens] l'occasion de résoudre des problèmes, elle nous aide à en trouver les moyens, et cela de deux manières. Elle nous fait pressentir la solution ; elle nous suggère des raisonnements.

<12>. Pierre DUHEM, *La théorie physique. Son objet, sa structure*, 1906 ; 2<sup>e</sup> éd. revue, augm., 1914 ; ré-éd., Vrin, Paris, 1981. Extr., p. 278-285.

*Qu'une expérience de physique ne peut jamais condamner une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble théorique. (...)*

Un physicien se propose de démontrer l'inexactitude d'une proposition ; pour déduire de cette proposition la prévision d'un phénomène, pour instituer l'expérience qui doit montrer si ce phénomène se produit ou ne se produit pas, pour interpréter les résultats de cette expérience et constater que le phénomène prévu ne s'est pas produit, il ne se borne pas à faire usage de la proposition en litige ; il emploie encore tout un ensemble de théories, admises par lui sans conteste ; la prévision du phénomène dont la non-production doit trancher le débat ne découle pas de la proposition litigieuse prise isolément, mais de la proposition litigieuse jointe à tout cet ensemble de théories ; si le phénomène prévu ne se produit pas, ce n'est pas la proposition litigieuse seule qui est mise en défaut, c'est tout l'échafaudage théorique dont le physicien a fait usage ; la seule chose que nous apprenne l'expérience, c'est que, parmi toutes les propositions qui ont servi à prévoir ce phénomène et à constater qu'il ne se produisait pas, il y a au moins une erreur ; mais où gît cette erreur, c'est ce qu'elle ne nous dit pas. Le physicien déclare-t-il que cette erreur est précisément contenue dans la proposition qu'il voulait réfuter et non pas ailleurs ? C'est qu'il admet implicitement l'exactitude de toutes les autres propositions dont il a fait usage ; tant vaut cette confiance, tant vaut sa conclusion. (...)

En résumé, le physicien ne peut jamais soumettre au contrôle de l'expérience une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble d'hypothèses ; lorsque l'expérience est en désaccord avec ses prévisions, elle lui apprend que l'une au moins des hypothèses qui constituent cet ensemble est inacceptable et doit être modifiée ; mais elle ne lui désigne pas celle qui doit être changée.

Nous voici bien loin de la méthode expérimentale telle que la conçoivent volontiers les personnes étrangères à son fonctionnement. On pense communément que chacune des hypothèses dont la physique fait usage peut être prise isolément, soumise au contrôle de l'expérience, puis, lorsque des épreuves variées et multipliées en ont constaté la valeur, mise en place d'une manière définitive dans le système de la physique. En réalité, il n'en est pas ainsi ; la physique n'est pas une machine qui se laisse démonter ; on ne peut pas essayer chaque pièce isolément et attendre, pour l'ajuster, que la solidité en ait été minutieusement contrôlée ; la science physique, c'est un système que l'on doit prendre tout entier ; c'est un organisme dont on ne peut faire fonctionner une partie sans que les parties les plus éloignées de celle-là entrent en jeu, les unes plus, les autres moins, toutes à quelque degré ; si quelque gêne, quelque malaise se révèle, dans ce fonctionnement, c'est par l'effet produit sur le système tout entier que le physicien devra deviner l'organe qui a besoin d'être redressé ou modifié, sans qu'il lui soit possible d'isoler cet organe et de l'examiner à part.

<13> Albert EINSTEIN, Réponse aux critiques [1949], trad. fr. par M.P., d'après l'original allemand et la version anglaise augmentée par Einstein pour la publication) : Bemerkungen zu den in diesen bande Vereinigten Arbeiten, in P.A. Schilpp (éd.), *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1955, p. 493-511 ; et Reply to criticisms, in *Albert Einstein: philosopher-scientist*, Open Court, Lassalle (Ill.), 1949 (ré-éd., 1970), p. 663-693. Extraits.

a/ *Un dialogue sur la géométrie et la physique.*

« Une géométrie est-elle vérifiable (ou falsifiable) du point de vue physique ? » Reichenbach, ainsi que Helmholtz, répondent : « Oui, à condition qu'un corps donné empiriquement "réalise" le concept de "distance" ». Poincaré, lui, répond : « Non » ; et, pour cette raison, il se voit condamné par Reichenbach. Il s'ensuit la brève discussion suivante. - Poincaré : Les corps empiriquement donnés ne sont pas rigides et ne peuvent donc servir à réaliser les segments de la géométrie. Les lois de la géométrie ne sont donc pas vérifiables. Reichenbach : J'accorde qu'il n'existe pas de corps qui puissent servir *de façon immédiate* à donner une « définition réelle » de ce qu'est un segment. Mais on peut arriver à donner une « définition réelle » en tenant compte de la dépendance du volume avec la température, de l'élasticité, de l'électro- et de la magnétostriktion, etc. La physique classique a montré que cela est réellement possible, et de façon non contradictoire. - Poincaré : En améliorant ainsi cette « définition réelle », vous avez fait usage de lois physiques dont la formulation présuppose ici la géométrie euclidienne. La vérification (...) ne se rapporte donc pas seulement à la géométrie mais à tout le système des lois physiques (...). Pourquoi ne pourrais-je pas alors choisir la géométrie qui me soit commode (l'euclidienne) et d'adapter les autres lois (les lois « physiques »...) à ce choix, de façon à ne pas être en contradiction avec l'expérience ? (...) [Einstein met alors en scène, au lieu de Poincaré, un « non-positiviste ».] - Reichenbach : (...) Ne sommes-nous pas justifiés (...) à opérer, au moins à titre d'essai, avec le concept de longueur mesurable, comme s'il existait des règles rigides ? (...). Contre Poincaré, on soulignera que ce qui importe réellement, ce n'est pas tant d'obtenir la plus grande simplicité possible pour la géométrie que la plus grande simplicité pour la physique (y compris la géométrie). C'est cela qui est en cause dans le fait qu'aujourd'hui nous ne puissions plus accepter de nous en tenir à la géométrie euclidienne. » - Le non-positiviste : Si (...) vous tenez le concept de distance pour légitime, que devient alors votre principe fondamental *signification = vérification* ? Ne devriez-vous pas, alors, dénier toute signification aux concepts et aux théorèmes géométriques et ne l'accorder qu'à la théorie de la relativité générale sous sa forme complètement développée (non encore obtenue) ? Ne devez-vous pas admettre qu'aucune signification, dans le sens que vous donnez à ce mot, ne peut être attribuée aux concepts et aux énoncés individuels d'une théorie physique, et qu[e le concept de distance] n'en confère une au système entier que dans la mesure où il rend « intelligible » ce qui est donné dans l'expérience ? (...) En outre, vous sous-estimez ce qui constitue le mérite réellement significatif de la philosophie de Kant. Kant avait appris de Hume qu'il existe des concepts (par exemple celui de lien causal) qui jouent un rôle prépondérant dans notre pensée et

qui pourtant ne peuvent être déduits par un processus logique à partir du donné empirique (...). Qu'est-ce qui justifie l'utilisation de tels concepts? [Si Kant s'en était tenu à répondre que penser est nécessaire pour comprendre le donné empirique et que les *concepts et les catégories sont nécessaires en tant qu'éléments indispensables de la pensée*, il aurait échappé au scepticisme] vous ne trouveriez rien à lui reprocher. [Il faut seulement] critiquer le caractère de validité absolue donné aux jugements synthétiques *a priori*]. Vos reproches s'adressent moins à Kant lui-même qu'à ceux qui aujourd'hui persévèrent dans l'erreur des « jugements synthétiques *a priori* ».

(...)

b/ *L'épistémologie et la science.*

Le rapport réciproque de l'épistémologie [*Erkenntnistheorie*] et de la science est d'une nature assez remarquable. Elles dépendent l'une de l'autre. L'épistémologie, en l'absence de contact avec la science, n'est qu'un schème vide. La science sans épistémologie est -pour autant qu'elle soit alors seulement pensable- primitive et confuse. Cependant, à peine l'épistémologue [*Erkenntnistheoriker*, littéralement, le théoricien de la connaissance], qui recherche un système clair, s'est-il frayé un chemin vers un tel système, il est tenté d'interpréter le contenu de pensée de la science dans le sens de son système et de rejeter tout ce qui n'y entre pas. Le scientifique [*der Scientist*], pour sa part, ne peut pas se permettre de pousser aussi loin son effort en direction d'une systématisation épistémologique [*erkenntnistheoretischer Systematik*]. Il accepte avec reconnaissance l'analyse conceptuelle de l'épistémologie; mais les conditions externes, qui interviennent pour lui au travers des faits de l'expérience, ne lui permettent pas de se laisser trop restreindre dans la construction de son univers conceptuel par l'adhésion à un système épistémologique quelqu'il soit. Il doit donc apparaître à l'épistémologue systématique comme une sorte d'opportuniste sans scrupule : il apparaît comme un *réaliste* dans la mesure où il cherche à décrire un monde indépendant des actes de la perception; comme un *idéaliste* dès lors qu'il considère les concepts et les théories comme des libres inventions de l'esprit humain (elles ne peuvent être déduites logiquement du donné empirique); comme un *positiviste* s'il considère que ses concepts et ses théories ne sont justifiés *que* dans la mesure où ils fournissent une représentation logique des relations entre les expériences des sens. Il peut même apparaître comme un *platonicien* ou un *pythagoricien* s'il considère que le point de vue de la simplicité logique est un outil indispensable et effectif de sa recherche.

<14>. Niels BOHR, *Atomphysics and human knowledge*, 1958, trad. fr. par E. Bauer et R. Omnès, revue et éd. par C. Chevalley, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard, 1991. Extr., p. 275-288.

L'étude des atomes, dont les conséquences devaient avoir une si vaste portée et dont les progrès ont été acquis par une coopération universelle, a non seulement approfondi nos vues dans un nouveau domaine d'expérience mais encore jeté une lumière nouvelle sur les problèmes généraux de la connaissance. (...) Les lois empiriques régissant les spectres de raies des éléments, lois entièrement incompréhensibles jusqu'alors, (...) furent pour nous un premier indice de l'importance décisive du quantum d'action dans la stabilité et le rayonnement des atomes. (...) Le point de départ fut (...) ce qu'on appelle le postulat quantique, selon lequel tout changement dans l'énergie d'un atome est le résultat d'une transition complète entre deux de ses états stationnaires (...) [avec] l'émission ou l'absorption d'un seul quantum de lumière (...).

Aucune explication de l'indivisibilité des processus de transition, ou de leur apparition dans certaines conditions, ne pouvait être donnée dans le cadre d'une description déterministe. (...) Il fut de plus en plus clair que, pour arriver à une théorie cohérente des phénomènes atomiques, il était nécessaire de renoncer davantage encore à se servir d'images, et qu'il fallait reformuler radicalement toute notre description pour faire place à tous les aspects impliqués par le quantum d'action. (...)

La solution fut d'une simplicité surprenante. Comme dans le cas de la relativité, on trouva dans certaines abstractions mathématiques hautement développées les outils adéquats pour formuler la théorie. Les quantités qui servent en physique classique à décrire l'état d'un système sont remplacées, dans le formalisme de la mécanique quantique, par des opérateurs symboliques dont la commutativité est limitée par des règles contenant le quantum. Il en résulte que l'on ne peut attribuer simultanément des valeurs définies à des quantités comme les coordonnées de position d'une particule et les composantes correspondantes de l'impulsion. Le caractère statistique du formalisme apparaît ainsi comme une généralisation naturelle de la description par la physique classique. Cette généralisation permet en outre d'énoncer de manière cohérente les règles qui limitent l'irréductibilité des particules identiques, règles qui ne peuvent, comme le quantum lui-même, être exprimées à l'aide des images physiques usuelles (...)

Toute analyse des conditions de la connaissance doit reposer sur une étude du caractère et de la portée de nos moyens de communication. Notre base est évidemment le langage qui a été développé pour nous orienter dans le monde qui nous environne et pour organiser les communautés humaines. Cependant, l'extension de notre expérience a sans cesse conduit à nous demander si les concepts et les représentations qui prennent corps dans le langage quotidien étaient suffisants. Par suite de leur simplicité, relative, les problèmes de la physique conviennent particulièrement à l'étude de l'applicabilité de nos moyens de communication. Et c'est justement le développement de la physique atomique qui nous a appris comment il est possible, sans abandonner le langage ordinaire, de créer un cadre assez vaste pour permettre une description exhaustive d'expériences nouvelles. (...) Dans la description même du fonctionnement des appareils de

mesure, toutes les interactions entre ceux-ci et les objets atomiques, telles que les implique le quantum d'action, font partie indissoluble[ment] des phénomènes. (...)

Le formalisme de la mécanique quantique, dont le seul propos est d'unifier des observations obtenues dans des conditions expérimentales décrites par des concepts physiques simples, donne d'un très vaste domaine d'expérience une description exhaustive. Nous ne renonçons aux images que pour l'état des objets atomiques, et nous conservons entièrement le fondement de la description des conditions expérimentales, ainsi que la liberté de choisir celles-ci. Tout ce formalisme qui ne peut s'appliquer qu'à des phénomènes clos doit, sous tous ces rapports, être considéré comme une généralisation rationnelle de la physique classique. (...)

### ***Bibliographie intégrale***

D'ALEMBERT, J., *Essai sur les élémens de philosophie*, Paris, 1858 (ré-éd. Paris, Fayard, 1986) – AMPERE, A. M., *Essai sur la philosophie des sciences*, Paris, 1838.– BACHELARD, G. 1929. *La valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin, 1929 ; 1934. *Le nouvel esprit scientifique* (1934), Paris, P.U.F., 1966.– BACON, F. *The advancement of Learning*, 1605, remanié ultérieurement en *De dignitas et augmentis scientiarum (De la dignité et de l'augmentation des sciences)*, 1723 : cf. Spedding, Ellis and Heath (eds.), *The Works of Francis Bacon*, 14 vols., London, 1857-1874.– BELL, J.S., *Speakable and Non Speakable in Quantum Physics*, Cambridge University Press, 1987.– BELLONE, E., *I modelli e la concezione del mondo nella fisica moderna da Laplace a Bohr*, Milano, Feltrinelli, 1973.– BERGSON, H., *Durée et simultanéité : à propos de la théorie d'Einstein*, Paris, Alcan, 1922 ; 2<sup>ème</sup> éd. augm., 1923 (1925 ; 1929) ; in H. B., *Mélanges*, éd. par A. Robinet, Paris, Presses Univ. de France, , 1972. *La pensée et le mouvant*, 1934, in H.B., *Oeuvres*, Paris, Paris, Presses Univ. de France, 1959.– BITBOL, M., *Mécanique quantique. Une introduction philosophique*, Paris, Flammarion, 1996.– BOHM, D., *Causality and chance in modern physics*, London, Routledge, 1957 (1967) ; *Wholeness and the Implicate Order*, London, Routledge, 1980.– BOHR, N., *Atomphysik og menneskelig erkendelse*, Kobenhavn, 1957, trad. fr., *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard, 1991.– BOLTZMANN, L., *Theoretical physics and philosophical problems*, Dordrecht, Reidel, 1974.– BRIDGMAN, P. W., *The logic of modern physics*, New York, Mc Millan, 1927 ; *The nature of physical theory*, New York, Dover, 1936.– BUNGE, M., *Philosophy of Physics*, Dordrecht, Reidel, 1973, trad. fr., *Philosophie de la physique*, Seuil, Paris, 1975 ; *Causality in modern science* (3<sup>ème</sup> éd. rev.), New York, Dover, 1979 ; *Epistemologia*, Barcelone, Ariel, 1980, tr. fr., *Epistémologie*, Paris, Maloine, 1983 ; *Treatise on basic philosophy*, 8 vols. en 9 t., Dordrecht, Reidel, 1974-1989.– CARNAP, R., *Der logische Aufbau der Welt*, 1928, trad. angl., *The logical structure of the world*, Londres, Routledge, 1967 ; *Philosophical foundations of physics*, New York, Basic Books, 1966, trad. fr., *Les fondements philosophiques de la physique*, Paris, Armand Colin, 1973.– CASSIRER, E., *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin, B. Cassirer, 1910 ; *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie*, B. Cassirer, Berlin, 1921 ; trad. angl. de ces deux ouvrages, *Substance and function and Einstein's theory of relativity*, Chicago, Open Court, 1923 (New York, Dover, 1953) ; *Determinismus und Indeterminismus im der modernen Physik*, Göteborg, H. Arfeetirft, 1936.– CHATELET, Gilles, *Les enjeux du mobile : mathématiques, physique, philosophie*, Paris, Seuil, 1993.– DALLA CHIARA, M.L. (éd.), *Italian Studies in the Philosophy of Science*, Dordrecht, Reidel, 1981.– DA COSTA, N., *Lógica indutiva e probabilidade*, São Paulo, Hucitec, 1990 (São Paulo, Edusp, 1993) ; *Logiques classiques et non classiques. Essai sur les fondements de la logique*, trad. du portug., Paris, Masson, 1997 ; *O conhecimento científico*, São Paulo, Discurso Editorial, 1997.– DESCARTES, R., *Regulæ ad directionem ingenii* (vers 1728), in AT, vol. 10, p. 349-48 ; trad. en fr., *Règles pour la direction de l'esprit*, Paris, Vrin, 1970 ; *Le monde ou Traité de la lumière*, in AT, vol. 11, p. 1-118 ; *Discours de la méthode, et Essais de cette méthode : La Dioptrique, Les Météores, La Géométrie*, Leyde, 1637 ; in AT, vol. 6 ; *Meditationes de Prima philosophia*, 1<sup>ère</sup> éd., M. Soly, 1641 ; 2<sup>ème</sup> éd. augm., Amsterdam, Elsevier, 1642 ; in AT, vol. 7, p. 1-612. Trad. en fr., *Méditations*, in AT, vol. 9, p. 1-254 ; *Principia philosophiæ*, 1<sup>ère</sup> éd. princeps, Amsterdam, Elsevier, 1644 ; in AT, vol. 8, p. 1-353 ; trad. en fr., *Principes de la philosophie*, in AT, vol. 9, p. 1-362 ; *Oeuvres*, publ. par Ch. Adam et P. Tannery, 11 vols., 1896-1913 ; nouv. éd. rév., 1964-1974 (1996, indiquée AT).– DESTOUCHES, J.-L., *Qu'est-ce que la physique*

*mathématique ?*, Paris, Gauthier-Villars, 1967.– DIRAC, P. A. M., *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford, Clarendon Press, 1930 (4<sup>e</sup> éd. rév., 1958 ; 1981).– DUHEM, P., *La théorie physique. Son objet, sa structure* (1906 ; 2<sup>e</sup> éd. revue, augm., 1914 ; ré-éd., Vrin, Paris, 1981). EINSTEIN, A., *Mein Weltbild*, éd. par C. Seelig, Zurich, 1953, Europa-Verlages ; West-Berlin, Ullstein Bücher, 1960 ; *Ideas and Opinions*, trad. angl, New-York, Crown, 1954 (ré-éd. New-York, Laurel, 1981) ; *Oeuvres choisies*, Paris, trad. fr., Seuil/éd. du CNRS, 6 vols., 1989-1993 ; *The collected papers of Albert Einstein* (publ. en cours), Princeton, Princeton Univ. Press, 1987-suiv. – ENRIQUES, F., *Causalité et déterminisme dans la philosophie et l'histoire des sciences*, Paris, Hermann, 1941.– D'ESPAGNAT, B., *À la recherche du réel. Le regard d'un physicien*, Paris, Gauthier-Villars, 1979 ; *Une incertaine réalité. Le monde quantique, la connaissance et la durée*, Paris, Gauthier-Villars, 1985 ; *Penser la science ou les enjeux du savoir*, Paris, Bordas, 1990 ; *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*, Paris, Fayard, 1994.– FEVRIER, P. [1951]. *La structure des théories physiques*, Paris, P.U.F., 1951.– FEYERABEND, P. , *Against method* (1975), trad. fr., *Contre la méthode, esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Paris, Seuil, 1979 ; *Philosophical papers*, 2 vols., Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1981.– GALILEE, G., *Il Saggiatore*, Roe, 1623 tr. fr., *L'Essayeur*, éd. C. Chauviré, Paris, Belles Lettres, 1979 ; *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Florence, 1632 ; tr. fr., *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Paris, Seuil, 1992 ; *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Leyde, Elzevir, 1638, éd. Garugo et L. Geymonat, Turin, 1958 ; tr. fr., *Discours concernant deux sciences nouvelles*, éd. M. Clavelin, Paris, A. Colin, 1970.– GEYMONAT, L., *Scienza e realismo*, Milan, Feltrinelli, 1977. – GRANGER, G. G., *Essai d'une philosophie du style*. Paris, Armand Colin, 1968 (éd. revue, Paris, O. Jacob, 1988) ; *Pour la connaissance philosophique*, Paris, O. Jacob, 1988 ; *La vérification*, Paris, O. Jacob, 1992 ; *Formes, opérations, objets*, Paris, Vrin, 1994 ; *Le probable, le possible et le virtuel*, Paris, O. Jacob, 1995.– GRUNBAUM, A., *Philosophical problems of space and time*, New York, Knopf, 1963 (2<sup>e</sup> éd. augm., Dordrecht, Reidel, 1973).– HEISENBERG, W., *Der Teil und der Ganze. Gespräche in Umkreis der Atomphysik*, München, Piper, 1969, trad. fr., *La partie et le tout. Le monde de la physique atomique (Souvenirs, 1920-1965)*, Paris, Albin Michel, 1972 (1990).– HELMHOLTZ, H. von, *Schriften zur Erkenntnistheorie*, éd. par P. Hertz et M Schlick, Berlin, Springer, 1921 ; trad. angl. *Epistemological writings*, éd. par R.S. Cohen et Y. Elkana, Dordrecht, Reidel, 1978.– HUME, D., *Philosophical essays concerning human understanding*, 1748 ; repris sous le titre *Inquiry concerning human understanding*, 1758 : New York, Bobbs Merrill, 1955.– JAMMER, M., *The philosophy of quantum mechanics. The interpretation of quantum mechanics in historical perspective*, New York, Wiley, 1974.– KANT, I., *Critik der reinen Vernunft*, Riga, J.F. Hartknoch, 1781 (2<sup>e</sup> éd., 1787) ; trad. fr., in Kant, E., *Oeuvres philosophiques*, vol. 1, Paris, Gallimard, 1980, p. 705-1470 ; *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, 1796 ; trad. fr., *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, in Kant, E., *Oeuvres philosophiques*, vol. 2, Paris, Gallimard, 1985, p. 347-493.– KOYRE, A., *Etudes galiléennes*, Paris, Hermann, 1966 ; *Etudes newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968.– KUHN, T., *The structure of scientific revolutions* (1962), 2<sup>e</sup> éd. augm., Chicago, Univ. Chicago Press, 1970 ; trad. fr., *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1972 ; *The Essential tension, Selected Studies in Scientific Traditions and Changes*, Chicago, Univ. Chicago Press, 1977.– LAKATOS, I., *Philosophical papers, vol. 1: The methodology of scientific research programmes*, éd. par J. Worrall et G. Currie, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1978.– LAPLACE, P. S. de, *Exposition du système du monde*, Paris, 1796 (ré-éd. augm., 1835 ; rééd., Paris, Fayard, 1984) ; *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), in Laplace, *Oeuvres*

complètes, Paris, Gauthier-Villars, vol. 7, 1886.– LARGEAULT, J., *Philosophie de la nature*, Créteil, Univ. Paris XII, 1984.– LEPLIN, Jarett 1984. *Scientific realism*, University of California Press, Berkeley, 1984.– MACH, E., *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883 (autres éd. augm. de 1888 à 1933) ; trad. fr. (sur la 4<sup>e</sup> éd. all.), *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Paris, Hermann, 1904 (ré-éd., 1923) ; *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, Leipzig, J. A. Barth, 1905 (2<sup>e</sup> éd. augm., 1906 ; autres éd.: 1917, 1920, 1926) ; trad. fr. (abrégée, sur la 2<sup>e</sup> éd. all.), *La connaissance et l'erreur*, Paris, Flammarion, 1908 (ré-éd., 1922) ; trad. angl. (sur la 5<sup>e</sup> éd. all.), *Knowledge and error*, Dordrecht, Reidel, 1976.– MARGENAU, H., *Physics and Philosophy : Selected Essays*, Dordrecht, Reidel, 1978 – MERLEAU-PONTY, J., *Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle. Etude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Paris, Gallimard, 1965 ; *La science de l'univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Paris, Vrin, 1983.– MEYERSON, E., *Identité et réalité*, Paris, Alcan, 1908 (5<sup>e</sup> éd., Paris, Vrin, 1951 ; *De l'explication dans les sciences*, 2 vols., Paris, Payot, 1921 ; *La déduction relativiste*, Paris, Payot, 1925.– MITTELSTAEDT, P., *Philosophical problems of modern physics*, Dordrecht, Reidel, 1976.– NEWTON, I., *Philosophiæ Naturalis principia mathematica*, London, 1687 ; trad. angl. par A. Motte, *The mathematical principles of natural philosophy*, 1729 (3<sup>e</sup> éd., 1726 ; trad. rév. par F. Cajori, Berkeley, Univ. California Press, 1934) ; *Opticks or a Treatise of the reflections, refractions, inflections, and colours of light*, 1704 (4<sup>e</sup> éd. corrigée, Londres, 1721 ; Londres, Bells, 1931).– NEWTON SMITH, W. H., *The rationality of science*, Routledge, London, 1981.– OMNES, R., *The interpretation of quantum mechanics*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1994 ; *Philosophie de la science contemporaine*, Paris, Gallimard, 1994.– PARROCHIA, D. [1997]. *Les grandes révolutions scientifiques du XX<sup>e</sup> siècle*, Paris, P.U.F., 1997.– PATY, M., *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Paris, Archives contemporaines, 1988 ; *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, Paris, L'Harmattan, 1990 ; L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, in Dilworth, C. (ed.), *Intelligibility in science*, Amsterdam, Rodopi, 1992, p. 73-110 ; *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Paris, P.U.F., 1993 ; *D'Alembert ou la raison physico-mathématique au siècle des Lumières*, Paris, Belles Lettres, 1998.– POINCARÉ, H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902 (1968) ; *La valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905 (1970) ; *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 1908 ; *Dernières pensées*, Paris, Flammarion, 1913 (1963).– POPPER, K., *Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*, Wien, Springer Verlag, 1934 (ré-éd. avec additions, 1959 ; 1968 ; trad. angl., *The logic of scientific discovery*, 1959 (1968) ; trad. fr., *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973 ; *Objective knowledge, an evolutionary approach*, Oxford, Clarendon Press, 1972 ; trad. fr. partielle, *La connaissance objective*, Bruxelles, Complexe, 1978 ; *Realism and the aim of science, from the Postscript to the logic of scientific discovery, vol. 1*, éd. par W. W. Bartley III, London, Hutchinson, 1983 ; trad. fr., Paris, Hermann, 1990.– RADNITZKY, G. et ANDERSSON, G. (éds.), *Progress and rationality in science*, Dordrecht, Reidel, 1978.– REICHENBACH, H., *Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit-Lehre*, Vieweg, Braunschweig, 1924 ; trad. angl., *Axiomatisation of the theory of relativity*, Berkeley, Univ. California Press, 1969 ; *Philosophie der Raum Zeit Lehre*, Berlin, de Gruyter, 1928 ; trad. angl., *The philosophy of space and time*, New York, Dover, 1957 ; *Experience and prediction*, Chicago, Univ. Chicago Press, 1938 ; *The rise of scientific philosophy*, Berkeley, Univ. California Press, 1951 (1973) ; trad. fr., *L'avènement de la philosophie scientifique*, Paris, Flammarion, 1955 ; *Modern*

*philosophy of science*, éd. par M. Reichenbach, London, Routledge and Kegan Paul, 1959 ; *Selected writings*, éd. par R. S. Cohen et M. Reichenbach, 2 vols, Dordrecht, Reidel, 1978 ; RIEMANN, B., Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liege (1854), in Riemann, *Gesammelte mathematische Werke. Nachträge*, éd. par M. Noether et W. Wirtinger, Leipzig, 1902, p. 272-287 ; trad. fr., Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie, in Riemann, *Oeuvres mathématiques*, trad. fr., Paris, 1898 (1968), p. 280-299.– RUSSELL, B., *The analysis of matter*, London, Allen and Unwin, 1927 ; trad. fr., *L'Analyse de la matière*, Paris, Payot, 1965.– SCHILPP, P.A. (éd), *Albert Einstein, philosopher and scientist*, La Salle (Ill.), The library of living philosophers, Open Court, 1949.– SHIMONY, A., *Search for a naturalistic world view*, 2 vols. Cambridge Univ. Press, 1993.– SCHLICK, M., *Philosophical papers*, éd par H. L. Mulder et B. F. B. van de Velde-Schlick, trad angl., 2 vols., Dordrecht, Reidel, 1979.– SCHRÖDINGER, E., *Science and humanism. Physics in our times*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1951 ; trad. fr. in E.S., *Physique quantique et représentation du monde*, Paris, Seuil, 1992 ; *What is life ? The physical aspects of the living cell*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1955 ; *Meine Weltansicht*, Hambourg, P. Zsolnay, 1961, trad. fr., *Ma conception du monde*, Paris, Mercure de France/Le Mail, 1982.– STEGMULLER, W., *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie*, 2 vols., Heidelberg, Springer, 1973 ; *The structuralist view of theories. A possible analogue of the Bourbaki programme in physical science*, Berlin, Springer, 1979.– SUPPES, P., *Logique du probable. Démarche bayésienne et rationalité*, trad. en fr., Paris, Flammarion, 1981 ; (ed.), *Space, time and geometry*, Dordrecht, Reidel, 1983. – TORALDO DI FRANCIA, G., *Le cose e loro nomi*, Milan, Laterza, 1986.– TORRETTI, R., *Relativity and Geometry*, Oxford, Pergamon, 1983 ; *Creative understanding. Philosophical reflections on physics*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1990.– VAN FRASSEN, B., *The scientific image*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1980 ; *Laws and symmtry*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1989 ; trad. fr., *Lois et symétries*, Paris, Vrin, 1995.– VUILLEMIN, J., *Physique et métaphysique kantienne*, Paris, Presses Univ. de France, 1955 ; *Physique et métaphysique chez Descartes*, Paris, 1960 (1987) ; *La logique et le monde sensible. Etude sur les théories contemporaines de l'abstraction*, Paris, Flammarion, 1971.– WARTOFSKY, M. W., *Conceptual Foundations of Scientific Thought. An Introduction to the Philosophy of Science*, London, Mac Millan, 1968.– von WEIZSÄCKER, C. F., *Die Einheit der Natur*, München, Carl Hanser Vg, 1971 ; trad. angl., *The Unity of Nature*, Farrar, Straus and Giroux, New York, 1980. – WITTGENSTEIN, L., *Logisch-Philosophische Abhandlung, Annalen der Naturphilosophie*, 1921 ; trad. angl., *Tractatus logico-philosophicus*, London, Routledge and Kegan Paul, 1961 ; trad. fr. G.-G. Granger, *Tractatus logico-philosophicus*, Paris, Gallimard, 1993.– ZAHAR, E., *Einstein's revolution. A study in heuristics*, La Salle (Ill.), Open Court, 1989.