



**HAL**  
open science

## La philosophie et la physique

Michel Paty

► **To cite this version:**

Michel Paty. La philosophie et la physique. Jean-François Mattéi. Le Discours philosophique, volume 4 de l'Encyclopédie philosophique universelle, Presses Universitaires de France, p. 2104-2122., 1998. halshs-00167295

**HAL Id: halshs-00167295**

**<https://shs.hal.science/halshs-00167295>**

Submitted on 17 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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.

Sans les textes d'auteurs.

## *La philosophie et la physique*

Michel PATY

### Introduction

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

## ***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 chirurgien 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 doublerent 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 coté 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 réfléchi, 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 côté, 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 képlerienne 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 tétoitement, 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 susciteront ultérieurement la critique de l'*a priori* kantien, et les empiristes logiques proclameront 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 un 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 rapport 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 tentations 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, 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. Arfektirft, 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>è</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 scienz*, 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., *Philosophiae 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.