

Les concepts de la physique : contenus rationnels et constructions dans l'histoire*

par

Michel PATY#

RESUME.

La physique, aux différentes étapes de la connaissance, se propose comme une description objective du monde naturel, et met en œuvre pour cela des concepts rationnels, proposés comme universels. Cependant, ceux-ci sont construits par la pensée humaine dans des situations subjectives et historiques particulières, et se transforment. Est-il possible de concilier ces deux perspectives, l'objectif et le relatif ? Et comment concevoir de telles transformations, sous le signe de l'intelligibilité, tant de cette science que de l'histoire ?

RESUMO. *Os conceitos da física : conteúdos racionais e construção histórica*

A Física, nas várias etapas do conhecimento, se propõe como uma descrição objetiva do mundo natural, e com tal finalidade põe em prática conceitos racionais, considerados como sendo universais. No entanto, estes conceitos são construídos pelo pensamento humano em situações subjetivas e históricas particulares, e se transformam. É possível conciliar estas duas perspectivas, a do objetivo e a do relativo ? E como conceber tais transformações, sob o signo da inteligibilidade, desta ciência bem como da história ?

ABSTRACT. *The concepts of physics : rational contents and historical construction.*

Physics, at the various stages of knowledge, presents itself as an objective description of the natural world, and makes use, for this purpose, of rational concepts, proposed as universal. However, these concepts are built by human thought in particular subjective and historical situations, and are submitted to transformation processes. Is it possible to conciliate these two points of views, the objective and the relative ones ? And how to conceive such transformations, under the sign of intelligibility, of this science and of history as well ?

TABLE.- INDICE.- CONTENTS.- 1. Introduction. Représentation objective et pensée symbolique.- 2. Le sujet de la connaissance objective.- 3. Contenus conceptuels.- 4. Construction historique.- 5. Le creuset transcendantal (la pensée rationnelle du monde empirique).- Références bibliographiques.

* Ce texte reprend les éléments d'une conférence sous ce titre donnée dans le cadre du cycle «Trente Ans de Paris 7», Université Paris 7-Denis Diderot, 2 avril 2001, et de la conférence inaugurale "Os conceitos da Física : conteúdos racionais e construção histórica", prononcée en langue portugaise au *Segundo Simposio Internacional Principia*.- *Second Principia International Symposium*, Florianopolis (SC, Brésil), 6-10 août 2001 (le 6).

Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot, Centre Javelot, F- 75251 Paris-Cedex 05. Courriel : paty@paris7.jussieu.fr

MOTS-CLES. Concepts, Construction, Contenus, Epistémologie, Historicité, Intelligibilité, Intuition, Nature, Objectivité, Physique, Rationalité, Subjectivité, Sujet, Théories.

PALAVRAS-CHAVES. Conceitos, Construção, Conteúdos, Epistemologia, Historicidade, Intelligibilidade, Intuição, Natureza, Objectividade, Física, Racionalidade, Subjectividade, Sujeito, Teorias.

KEY-WORDS. Concepts, Construction, Contents, Epistemology, Historicity, Intelligibility, Intuition, Nature, Objectivity, Physics, Rationality, Subjectivity, Subject, Theories.

1.

INTRODUCTION.

REPRESENTATION OBJECTIVE ET PENSÉE SYMBOLIQUE.

Les physiciens (comme d'autres scientifiques, d'une manière générale) travaillent avec des systèmes de lois et de théories, de principes physiques et de concepts si bien établis qu'ils paraissent intouchables et définitifs : sinon ceux sur lesquels ils travaillent, qui ne sont pas encore totalement assurés, du moins ceux sur la base desquels ils travaillent, qu'ils considèrent comme acquis. Ils tiennent alors, leur semble-t-il, le véritable correspondant, dans la pensée représentative, de ce qui existe dans la nature, corps, rayonnements, objets, propriétés, rapportés à des entités que l'on appelle d'une manière générale "systèmes physiques" (dénomination qui a l'avantage d'être philosophiquement neutre). Comme ces représentations, ou ces éléments de représentation, sont rationnels (ils sont liés entre eux et justifiés par des raisonnements, des preuves, des déductions, des inférences...), cette rationalité même paraît être formulée à l'image des éléments objectifs, indépendants de la pensée, qui sont supposés exister dans la nature : ou, sinon à leur image, du moins en correspondance étroite avec eux.

Le fait que ces objets ou systèmes existent réellement (ou qu'ils puissent être produits) dans la nature est ce qui leur confère le caractère d'être "physiques". Sont déclarées "physiques" les propriétés (on parle de propriétés physiques de systèmes physiques), mais aussi bien les éléments de connaissance de ces propriétés (principes, concepts, grandeurs... : on parle de principes physiques, de concepts physiques, de grandeurs physiques, etc.) qui correspondent à des phénomènes caractérisés dans la nature. Telle est, du moins, la conception courante des physiciens quand ils pensent ordinairement, dans leur pratique, les objets de leur discipline. «Penser physiquement», c'est penser en rapport à des phénomènes ou des objets de la nature dont l'approche relève des sciences physiques (par contraste avec la biologie par exemple).

Les physiciens aiment souvent à dire, au sujet de cette connaissance stable sur la base de laquelle ils font leurs recherches, que les phénomènes ou les choses qu'ils décrivent sont tels qu'ils les décrivent, et leur manière de parler porte la trace de ce réalisme naïf. A les en croire, leurs représentations théoriques

s'identifient avec les “objets” dont elles rendent compte : les quarks, les neutrinos, les particules élémentaires d'une manière générale, les atomes, les trous noirs, les quasars, les galaxies. Toutes ces entités, infimes ou immenses par la taille en regard de la notre, que nul n'a, à strictement parler, jamais vues directement, et qui ont été portées à notre connaissance d'une manière indirecte (théorique et expérimentale ou observationnelle), sont supposés exister fermement avec les propriétés que les théories qui leur sont relatives leur octroient. Et non seulement exister, mais être à l'image même de ces descriptions : ce qui, soit dit en passant, leur pose des problèmes, quand le caractère très abstrait et «non intuitif» de telles entités ne leur permet pas de s'en faire une image, ce qui est évidemment le cas pour les particules quantiques mentionnées, mais aussi bien pour les trous noirs et les quasars. Quant aux galaxies, si l'on peut, certes, s'en faire une image visuelle, dans le lointain, par les photographies des observatoires astronomiques, c'est en laissant de côté d'autres aspects de leurs structures qui sont portés à la connaissance par des moyens autres que visuels (tels que les bouffées de rayons γ , les forces d'attraction mutuelle non traditionnelle par la «matière noire», etc.). Il faudrait peut-être discuter ici de ce que l'on entend par «exister», du point de vue de la physique (et aussi par «réalité»), ainsi que du rapport entre ce qui est dit «exister» (ou «être réel») et sa «représentation» par la théorie physique¹. Mais nous n'aborderons pas ici de front ces questions épistémologiques et philosophiques fondamentales, sans pour autant vouloir les éviter : elles nous accompagneront au long de notre parcours, et peut-être celui-ci nous permettra d'entrer quelque peu en familiarité avec elles.

Et cependant, soit les physiciens eux-mêmes, quand leur pensée se fait réflexive, prend du recul, se met à distance de leur pratique, soit d'autres, qui considèrent la physique de l'extérieur (comme, par exemple, les philosophes, les historiens, les sociologues, les anthropologues, des sciences), tous savent bien qu'il ne peut être question au sens strict d'identification, aussi fine et puissante soit une théorie physique, entre cette représentation et l'objet qu'elle vise. Cet «objet» est supposé appartenir à la nature et être extérieur à la pensée, tandis que sa «représentation» n'existe pas dans la nature, ou du moins n'existe que comme forme symbolique, produite par la pensée humaine, conçue dans une subjectivité, reçue et communiquée à d'autres, partagée et modifiée, au travers de relations intersubjectives et sociales, certes, mais dont l'instance élémentaire est toujours un sujet connaissant (rationnel ou transcendantal). En outre, ce symbolique est construit, dans certaines conditions qui sont celles de la pensée (conditions neurophysiologiques, psychologiques, subjectives), au sein d'un environnement culturel (qui inclut son insertion scientifico-technique), social, religieux ou idéologique, politique, économique, et il est marqué, d'une certaine façon, par ces conditions : ce qui fait, précisément que ses formes ne sont pas les mêmes selon les cultures et selon l'époque dans l'histoire.

Ceci soulève le problème de la subjectivité de la connaissance, la connaissance scientifique en particulier. Il est vrai que nous serions bien en mal de concevoir la connaissance sans un sujet pour la recevoir, l'assimiler, la formuler, ou la renouveler, qu'il s'agisse de connaissances empiriques ou rationnelles. En tant qu'elles correspondent à une vue «intégrée» d'éléments tels que des principes, des lois, des concepts et relations de concepts, ces connaissances constituent un

¹ Voir notre *La Matière dérobée* (Paty [1988]).

corpus ou un système (ou peut-être plusieurs systèmes juxtaposés), qui est à quelque degré rationnel. C'est cela qu'indique l'expression «contenus rationnels».

Je ne veux pas opposer, en employant cette expression, le rationnel à l'empirique, et j'inclus pour l'instant dans les «contenus rationnels» l'empirique qui est porté à la connaissance, dans la mesure où il est exprimé d'une manière rationnelle : nous admettons à ce stade que des contenus rationnels puissent être hétérogènes, quitte à reprendre plus loin la question du rapport, dans la connaissance intelligible, entre le rationnel et l'empirique. On sait combien l'expérience (au sens d'expérimentation) est importante en physique, à tel point qu'on parle souvent de la physique comme d'une «science empirique», comme le font notamment les philosophes de la tradition analytique. Mais cette qualification ne me paraît pas juste, car elle omet de considérer ce qui fait l'une des caractéristiques majeures de la physique, son rapport privilégié aux mathématiques, et quoi de plus éminemment rationnel que les mathématiques ?

Il est vrai que la physique ne se confond pas avec les mathématiques, puisqu'elle porte sur le monde réel, sur le monde de l'empirie. Et certes, c'est de celui-ci qu'elle parle, c'est celui-ci (ses phénomènes, ses «objets») qu'elle décrit, mais elle le fait en termes rationnels. Du moins, elle s'y efforce, et elle n'est satisfaite de ses théories sur les phénomènes physiques que lorsque celles-ci sont conçues comme pleinement rationnelles, dans leurs éléments (principes et concepts) et dans leur structure (qui lie ces derniers entre eux) ; et elle n'y parvient qu'en faisant un usage systématique et très précis des mathématiques (cet usage n'est pas aveugle et obéit à des nécessités, qu'il est possible de caractériser dans chaque cas, pour chaque domaine). Il suffit d'évoquer, pour s'en persuader, le travail d'élaboration théorique qui a conduit à la théorie de la gravitation newtonienne puis laplacienne, à la mécanique analytique de Lagrange et Hamilton, à la théorie mathématique de la lumière depuis Fresnel, à la théorie électromagnétique (Maxwell, Hertz, Lorentz), à la thermodynamique (Thomson-Kelvin, Clausius, Boltzmann), à l'électrodynamique relativiste de Poincaré, aux théories de la relativité (restreinte, puis générale) d'Einstein, à la théorie quantique, de la mécanique quantique à la théorie quantique des champs actuelle...

Nous n'avons pas épuisé, ni même élucidé, par cette assertion, la nature du rapport de l'empirique et du rationnel. Mais, à ce stade initial de notre réflexion sur la nature des concepts, nous nous contenterons d'associer leur visée objective (vers les phénomènes de l'empirie) et leur expression rationnelle, puisque nous nous occuperons principalement ici de l'opposition apparente entre ce caractère, d'un côté, et cet autre caractère des mêmes concepts d'être construits dans le déroulement de l'histoire.

Dans cette opposition ou, pour mieux dire, dans cette tension, se tient une instance, souvent oubliée lorsqu'il est question de connaissance objective, parce qu'elle semble à première vue s'opposer à l'objectivité, mais sans laquelle pourtant le mot rationnel lui-même serait dénué de sens, à savoir le sujet de cette connaissance, siège des actes et des jugements de raison. C'est, en effet, à travers cette instance du sujet que s'établit - et éventuellement se résout - la tension entre visée objective et construction historique.

2.

LE SUJET DE LA CONNAISSANCE OBJECTIVE

Même si leur origine est empirique, puisée dans des données d'observation ou d'expérience, les contenus de la connaissance, c'est-à-dire les principes, les concepts, les relations de concepts et les lois, sont exprimés en termes rationnels (à plusieurs degrés de rationalité, correspondant à une plus ou moins grande transparence), et on peut les considérer comme rationnels dans la mesure où ils sont pris ensemble dans l'unité et la cohérence d'une pensée. Descartes a insisté à juste titre sur cette capacité, «égale en tous les hommes», de la subjectivité à organiser rationnellement sa connaissance et à porter sur elle des jugements, soit pour en douter, soit pour être assurée de certitude, voire être frappée (illuminée) par l'évidence, qui est celle de la raison². A sa suite, en tenant compte des apports critiques sur le rôle des sens et du donné empirique (de Locke à Hume), Kant a précisé cette fondation de la connaissance dans un sujet transcendantal dont les fonctions sont telles que ces connaissances soient rendues possibles³.

Cette notion de sujet de la connaissance s'est vue critiquée par la suite sur des fronts très divers, mais ces critiques n'ont pu en aucune manière éliminer la nécessité d'invoquer une subjectivité comme lieu des actes et des processus de connaissance, même si cette subjectivité est saisie comme reliée à d'autres instances, comme les structures cognitives ou l'insertion sociale, et déterminée (au moins partiellement) par elles.

Le fait que la connaissance s'établisse dans des subjectivités n'est pas a priori en opposition avec l'idée d'objectivité des connaissances scientifiques. L'universalité de la raison invoquée par Descartes, la subjectivité transcendantale dans sa formulation par Kant, et les conceptions proposées par de grands courants plus récents de la philosophie de la connaissance, ont également pour propos d'assurer, ou de fonder, l'objectivité des connaissances scientifiques.

Nous n'entrerons pas ici dans la question de savoir ce que l'on peut entendre par «objectivité», soit qu'on la rapporte à un accord universel des subjectivités⁴, soit qu'on la voie comme une adéquation entre la pensée représentative et le «monde réel» (désignant par cette dernière expression aussi bien la nature, qu'un monde de formes idéales comme les mathématiques).

Les scientifiques éprouvent, en fait, dans leur propre travail, ou plus généralement dans la pensée de leur science, le caractère provisoire, inachevé, de leurs connaissances, même partielles. Ils se voient parfois obligés, par la nature même de leur travail scientifique, de modifier ces éléments (lois, théories, concepts, principes ...) ou de les remplacer par d'autres, qui peuvent être très différents. Ils commencent, dans ce cas, par critiquer ceux dont ils disposent, en mettant en évidence leur précarité à l'aide du donné d'expérience, ou du raisonnement. Einstein, qui parlait en orfèvre, écrivait à ce sujet, dans un texte de 1935 sur "Physique et réalité", que, lorsque les assises de la physique sont remises en question, comme c'était le cas avec la mécanique quantique, "le physicien ne peut se

² Descartes [1637].

³ Locke [1690], Hume [1748], Kant [1787].

⁴ Descartes [1628], Règle 3.

contenter d'abandonner à la philosophie l'examen critique des fondements de sa science, car il est le mieux placé pour savoir et sentir où le bât blesse ; dans sa recherche d'une assise nouvelle, il doit s'efforcer, autant qu'il le peut, de prendre conscience de la pertinence, voire de la nécessité, des concepts dont il fait usage (...)"⁵.

Au-delà de la critique des limitations des connaissances précédentes, les scientifiques peuvent se trouver en position de faire œuvre de créateurs, en découvrant, en inventant, de nouveaux éléments de connaissance qu'ils substituent ou qu'ils ajoutent aux anciens. Le cas d'Einstein avec les deux étapes de la théorie de la relativité est sans doute l'un de ceux qui peuvent parler le plus à un assez grand nombre de gens⁶. Mais cette attitude de création est en fait beaucoup plus répandue qu'on ne l'imagine en physique (et dans les disciplines connexes comme la chimie, l'astronomie, l'astrophysique) comme dans les autres sciences, et non seulement dans les sciences d'hier mais dans celles d'aujourd'hui. Ne prenons qu'un seul cas, très parlant : Pierre Curie, très connu pour sa découverte avec Marie Curie de propriétés des substances radioactives, établissant, plusieurs années avant celle-ci, sa théorie des symétries en physique, passée presque inaperçue sur le moment, mais qui s'est avérée plus tard ouvrir un domaine immense à la pensée physique⁷.

Dans la critique dont on vient de parler, les chercheurs (les physiciens, dans le cas qui nous occupe) rejoignent les jugements portés de l'extérieur (par les philosophes, les historiens, etc.), qui s'interrogeaient sur la raison des connaissances scientifiques et sur la contingence des circonstances de leur établissement. Les uns et les autres se souviennent que les éléments des connaissances acquises et admises n'avaient pas été donnés comme évidents de toute éternité, mais qu'ils avaient été proposés à tel moment de l'histoire de la discipline, pour en remplacer de plus anciens ; que ces éléments, et leurs agencements, étaient, en somme, des constructions de l'esprit, conçues par la pensée individuelle de tel ou tel savant, qui avaient été acceptées par le milieu scientifique, et qui avaient su montrer leur utilité jusqu'à ce qu'elles rencontrent leurs limites. Ici, le point de vue de la science (avec la physique comme cas particulier), qui est celui de la «nécessité interne», portant au premier chef son attention sur les «contenus rationnels», rejoint celui de l'analyse et de la réflexion sur les sciences qui les voit comme des «constructions dans l'histoire».

En fait, nous venons déjà, par ces considérations préliminaires, d'obtenir un premier résultat sur l'apparente opposition entre la rationalité et l'objectivité des contenus des propositions d'une science comme la physique, et les circonstances de leur établissement, qui en fait des constructions dans l'histoire. Ce résultat, c'est que, dans les moments «critiques» (sinon de crises), les deux points de vue coïncident, en ce sens que les constructions (et reconstructions) conceptuelles ou théoriques, historiquement situées, concernent des contenus rationnels. Si les scientifiques sont amenés à réformer, à réorganiser, à transformer leur discipline, c'est pour des raisons qui concernent ces contenus, que nous avons qualifiés de rationnels. Nous pressentons bien que la considération de la

⁵ Einstein [1935], *in* Einstein [1989-1993], vol. 5 .

⁶ Voir Paty [1999c].

⁷ Pierre Curie, articles sur les symétries, de 1884 et 1885, *in* Curie [1908], p. 56-141. Voir Barbo [1999].

construction et de l'histoire ne détruit pas, ou ne dissout pas, la rationalité de l'objet considéré, mais qu'elle la situe.

Nous allons maintenant examiner plus en détail ces contenus conceptuels de connaissance, ce qu'on entend par là, comment ils sont construits dans l'histoire, et ce qu'il en résulte d'une manière générale pour notre manière de concevoir l'intelligibilité et la rationalité à quoi l'on rapporte en dernier ressort leur validité. Car si l'histoire des concepts, des théories, et d'une manière générale des connaissances scientifiques, est instructive par elle-même sur ce qu'on été ces élaborations, dans leur signification et dans leur succession, elle nous fournit également de précieuses informations sur ce que, à chacune de ses étapes, l'on a entendu par intelligible et par rationnel.

3.

CONTENUS CONCEPTUELS

Considérons, maintenant, le premier terme de l'opposition ou de la tension dont nous avons parlé précédemment : les «contenus conceptuels». Pour tenter de caractériser ce que sont des contenus conceptuels, il faut tout d'abord redire que les connaissances scientifiques s'expriment, de même que toute connaissance ou croyance humaine, comme des formes symboliques, dans la mesure où elles sont des éléments de pensée, substituant, pour la pensée, les formes du monde réel auquel nous avons accès par la sensibilité et l'entendement⁸. Des symboles, dans ce sens, ne se réduisent pas à des signes, même si on les représente utilement de cette manière, et la physique s'en prive d'autant moins qu'elle y est amenée par l'usage privilégié qu'elle fait des mathématiques.

Une propriété physique est généralement ramenée à des relations entre des grandeurs, qui expriment des concepts (physiques) et sont formulées en termes de grandeurs mathématiques, sous la forme de symboles (ainsi des distances et des coordonnées de position, des durées temporelles et des localisations dans le temps, des vitesses, des accélérations, des énergies, etc.). Les relations entre les concepts ou grandeurs physiques ne sont alors autres que celles des grandeurs mathématiques correspondantes, soumises (dans la mesure où elles sont physiques) à des contraintes comme celles qu'expriment les principes (tels les principes de la mécanique, résumés par le principe de moindre action, qui conduit aux équations du mouvement, ou les principes de relativité, restreinte ou générale...). La justification en réside dans la constitution même de la théorie physique (comme ensemble structuré de concepts représentés sous forme de grandeurs d'expression mathématique et régis par des principes physiques), et dans la définition de ce que sont des grandeurs physiques appropriées à la description des phénomènes considérés.

⁸ C'est le titre même de l'ouvrage classique d'Ernst Cassirer, *La philosophie des formes symboliques* (Cassirer [1923-1929]). Sur la physique contemporaine, voir notre *La matière dérobée*, qui prend son point de départ sur cette considération (Paty [1988]).

Le système des concepts physiques est tissé par la mathématisation des grandeurs par lesquelles ces concepts sont exprimés. C'est ce système qui confère, en fin de compte, le contenu physique de ces concepts et relations de concepts. Je renvoie ici, par exemple, à l'analyse de la signification physique des formules de transformation de Lorentz telles qu'Einstein les démontra dans son travail de 1905 sur la relativité restreinte, et de ses conséquences sur les nouveaux concepts d'espace et de temps. Ceux-ci tenaient leur contenu physique directement de ces transformations, déduites des principes physiques de départ appliqués aux grandeurs d'espace et de temps prises respectivement dans les systèmes de référence en mouvement relatif⁹.

Cependant, les propriétés physiques ne sont pas uniquement représentées par des grandeurs. Elles peuvent l'être aussi par des propositions, soit particulières (pour un résultat d'expérience donné), soit générales, comme, par exemple, les principes physiques, de relativité, de conservation, de symétrie, etc., qui correspondent à l'imposition de conditions très contraignantes sur les relations entre les grandeurs. Les relations entre les grandeurs spatiales ou spatio-temporelles peuvent être du type métrique ou encore topologique. Rien n'oblige a priori non plus à ce que la forme mathématique des grandeurs appropriées à la description des phénomènes physiques et des systèmes physiques associés à ces phénomènes (qu'ils en soient la source ou le lieu) soit celle de fonctions numériques, bien que ce soit la forme la plus courante, et qu'elle présente l'avantage de pouvoir être rapportée directement à des indications d'instruments de mesure¹⁰. L'important, dans les relations de grandeurs qui expriment des lois, c'est la relation, plus que les valeurs particulières dont ces grandeurs, ou les éléments qui les constituent, peuvent être affectées¹¹.

Faisons, à ce propos, plusieurs remarques. Tout d'abord, que la généralité s'exprime par l'abstraction et que, d'une certaine façon, la portée générale des principes physiques (dont l'énoncé va bien au-delà des faits particuliers qui sont à l'origine de leur formulation) marque ses effets sur le caractère abstrait (rendu par la symbolisation mathématique) des concepts qu'ils gouvernent. Les propriétés principielles (qui sont des énoncés de faits généralisés en raison et portés au rang de principes physiques) peuvent être traduites en relations de symboles. Par exemple, un principe de relativité ou de symétrie s'exprime comme une invariance pour des lois, ou par une transformation de grandeurs qui permet cette invariance (on parle alors de covariance).

Des équations sont ainsi obtenues, qui sont des relations symboliques correspondant à des effets (sur les phénomènes physiques), et porteuses d'autres effets, correspondant à des prédictions (de phénomènes, ou de propriétés de systèmes) ou à des prévisions (sur des trajectoires...). Avec la relativité restreinte

⁹ Paty [1993], chapitre 4.

¹⁰ Rien n'oblige *a priori* à lier les grandeurs physiques à la possibilité de les mesurer directement, à moins de souscrire à une conception faisant de l'observation la référence première de toute connaissance, comme le fait la conception «observationaliste», qui était celle de l'«interprétation de Copenhague» de la mécanique quantique, promue par Niels Bohr (Bohr [1957, 1963]).

¹¹ Je renvoie ici à une remarque de Descartes dans les *Règles sur la direction de l'esprit* sur le sens d'une expression algébrique (Règle 16), ainsi qu'à l'examen auquel il soumet la notion de grandeur passible «de l'ordre et de la mesure» (Règle 14), «mesure» étant à entendre au sens de «proportion» : voir Paty [2001e].

aux mouvements d'inertie, c'est-à-dire rectilignes et uniformes, on obtient les éléments invariants de la métrique spatio-temporelle (pour l'espace-temps à 4 dimensions), la relation masse-énergie, la dilatation des durées et la contraction des longueurs, l'invariance des équations de l'électromagnétisme, etc. Avec la relativité générale, le décalage des fréquences lumineuses vers le rouge, le ralentissement des horloges (dilatation des durées), la courbure de l'espace au voisinage des grandes masses, et d'autres effets multipliés en astrophysique et en cosmologie. Les principes d'invariance ou de symétrie des théories quantiques des champs actuelles conduisent, de même, à expliquer l'organisation de la matière atomique et subatomique et à préparer la production et l'identification de nouveaux phénomènes¹².

On voit assez par là que ce symbolique qu'est une représentation physique (une théorie représentative, avec ses principes et ses concepts) ne reste pas confiné dans son univers symbolique à l'intérieur de la pensée du sujet, «dans son cerveau» : il peut atteindre, par ses effets, le monde extérieur. Dans ce sens, la connaissance scientifique, bien qu'elle soit formulée dans la singularité d'une subjectivité, correspond à une objectivité : elle transcende le subjectif et même l'intersubjectif pour atteindre le monde extérieur, le monde «réel», le «monde physique».

Si les concepts, transformés dans la nouvelle théorie qui les structure, reçoivent leur signification physique des relations de la théorie (et, en définitive, des principes qui règlent ces dernières), et si ces relations s'expriment par des équations, il n'en résulte pas pour autant que la théorie se réduise aux équations qui l'expriment, contrairement à l'affirmation de Heinrich Hertz selon laquelle «la théorie de Maxwell, ce sont les équations de Maxwell»¹³. Les équations ne sont que l'expression de lois, alors que la théorie est davantage que les lois qu'elle renferme. Les termes de ces équations doivent, pour signifier, être définis et conçus. Les équations de Maxwell expriment les variations mutuelles de variables dont le sens physique n'est fixé qu'en rapportant ces variables à des entités physiques définies comme les champs électrique et magnétique, affectées préalablement d'un certain sens physique, donné dans les phénomènes¹⁴.

Autrement dit, si le contenu de sens des concepts est donné dans la relation, il ne se réduit pas à celle-ci. Bien que les concepts physiques se présentent, comme grandeurs, sous la forme d'une expression mathématique, et portent en puissance le contenu de leurs relations mutuelles, leurs contenus de sens n'a pas la simple transparence mathématique des équations.

Ils sont, de fait, éloignés de cette transparence par plusieurs aspects. D'une part, ils portent la potentialité des effets mentionnés (sur le monde extérieur), qui tient à leur caractère de concepts physiques. D'autre part, ils sont liés à des propositions qui ne sont pas exprimées par des grandeurs, tout en correspondant à des conditions sur des grandeurs, comme les principes physiques mentionnés. Ce sont essentiellement ces principes, comme nous l'avons souligné, qui structurent la théorie physique et qui déterminent en dernier ressort le contenu physique des

¹² Paty [1993a, 1988].

¹³ Hertz [1977].

¹⁴ A un stade avancé de la formulation théorique, ce sens physique peut être ramassé dans l'énoncé de principes, dans le sens qu'on a vu plus haut.

concepts. Ce sont, à l'origine, des faits du monde empirique, constatés et généralisés : ils recèlent encore par là une part d'obscurité, même si leur formulation se rapproche d'une expression mathématique (comme la condition de covariance de la relativité générale, ou les principes de symétrie des groupes d'invariance en théorie quantique des champs). Enfin, on ne peut négliger le fait que ces concepts, ces principes, ces représentations symboliques, sont et demeurent en relation avec une activité humaine : ils constituent «de la pensée» et requièrent, dans la pensée, pour être assimilés par elle, certaines conditions que nous appellerons conditions d'intelligibilité.

Des éléments de représentation symbolique tels que ceux de la physique (et des sciences en général) possèdent ainsi une double dimension. L'une, dirigée vers le monde extérieur, correspond au contenu physique, l'autre, interne, correspond à l'intégration dans la pensée humaine. C'est à ces deux dimensions que l'on doit demander de rendre compte du lien entre la pensée subjective (plus exactement la pensée du sujet connaissant) et le monde physique. Et l'on conçoit aussi que le symbolique de la science ne soit pas réductible à de simples signes, puisqu'il porte un contenu orienté de deux cotés : du côté du monde et du côté du mental.

Ces contenus de représentation par la physique (comme par d'autres sciences) étant irréductibles à une transparence totale, en raison de cette double dimension, nous sont intelligibles dans une saisie synthétique de la pensée qui n'est autre que ce que l'on appelle habituellement «l'intuition». Einstein exprimait une idée somme toute assez semblable en déclarant à un correspondant : «Je crois que sur le fond il en va des symboles de la physique théorique comme de ces symboles que sont les mots de la langue quotidienne : tout ce qui est conceptuel provient de l'intuition»¹⁵. Entendons que nous connaissons et comprenons un phénomène comme une sorte de synthèse, qui se présente à nous, d'un ensemble de propriétés relationnelles qui paraissent immédiatement appréhensibles, comme une sorte de «perception seconde», non par les sens mais par l'entendement : une sorte de «perception» intellectuelle qui donnerait le phénomène en nous le rendant en même temps intelligible.

Il faudrait ici discuter de façon plus précise de ce que l'on entend par «intuition». Le sens donné à ce mot diffère d'un auteur à l'autre, mais un fait demeure patent : pratiquement tous les auteurs, scientifiques et philosophes, qui ont réfléchi sur la science et sur la connaissance, d'Aristote à Descartes, Kant, Poincaré, Bergson, Einstein et d'autres (à l'exception de ceux qui ont voulu se restreindre à son approche logistique, de Leibniz à Russell et aux philosophes analytiques) ont éprouvé le besoin, à un moment ou à un autre, de faire appel à l'idée d'intuition ou d'utiliser ce mot pour exprimer quelque chose dont ils avaient fait l'expérience, même s'ils ne savaient pas l'analyser. C'est ce même élément d'expérience (individuelle) que nous retrouvons ici à propos de l'intelligibilité, et qui, pour ainsi dire, «humanise» la question de l'objectivité dans les sciences. Une représentation objective qui ne serait pas une représentation intelligible serait dénuée de sens.

¹⁵ Einstein, lettre à H. Wolff, février 1949 (Archives Einstein) ; cité dans Einstein [1989-1993], vol. 5, *Science, éthique, philosophie*, p. 127n. Sur l'intuition chez Einstein, voir Paty [1993], chapitre 9.

En d'autres termes, la question de l'objectivité de la science suppose aussi celle de l'intelligibilité, généralement oubliée, notamment lorsque la préoccupation est restreinte aux questions de justification et de fondement logique de la science.

La question du symbolique demanderait aussi discussion : elle est en général l'objet de deux approches mutuellement exclusives, à savoir, d'un côté celle qui insiste sur l'aspect formel du symbolique ramené à des signes (de Leibniz à Frege, Russell, Carnap), et de l'autre celle qui s'intéresse au contenu de la pensée symbolique du sujet rationnel ou transcendantal, de Descartes à Kant, Husserl, Cassirer... Il serait souhaitable de tenir compte des deux. On peut aussi ajouter à cela l'importance de la prise en compte de l'idée, soutenue par Poincaré et par Einstein, d'une relation de liberté (liberté «dans le sens logique», ou flexibilité) de la pensée du sujet connaissant par rapport au donné sur lequel elle travaille (qu'il s'agisse de formes symboliques du genre de celles des mathématiques, ou relatives au monde empirique donné dans la perception et dans l'expérience, et connu par les opérations de l'entendement).

Quand nous parlons de la connaissance scientifique comme étant de caractère symbolique, nous entendons que ce symbolique ne reste pas fermé sur lui-même, puisqu'il est capable d'effets dans le monde extérieur (la "nature"). Et s'il est capable de tels effets, ce n'est pas parce qu'il correspondrait à une espèce de sur-nature (comme dans les représentations chamaniques, elles aussi production symbolique humaine), mais parce qu'il s'ajuste délibérément à la nature, tant par sa conception de ce que sont les phénomènes et du recours à l'expérimentation, que par le type de rationalité qu'il admet. Il est certain que le point d'ancrage commun à toutes les représentations symboliques est leur lien à la pensée et à l'activité humaines en général¹⁶. Un élément de représentation symbolique correspond à un contenu. Les symboles sont dans la pensée, les effets dans le monde : la relation symboles-effets, semble concerner deux genres d'entités totalement différentes. Mais ce sont, précisément, les contenus qui font le lien, puisqu'ils portent sur le monde, à travers une idée de celui-ci. L'action qu'engendre la pensée s'effectue dans le monde.

Dans le cas d'une science comme la physique, les contenus des éléments de la pensée symbolique sont explicitement rationnels et sont tournés vers les phénomènes, vers le monde de l'empirie. En ce qui concerne la connaissance physique, ce qui fait sa spécificité parmi les sciences, c'est le rapport étroit aux mathématiques (ou à la mathématisation), ainsi qu'à l'expérience et à l'observation quantitative. Déjà effective au début de la science moderne, cette double particularité assura la longue suprématie de la physique sur les autres branches de la connaissance, en la faisant considérer, après les mathématiques (mais elles ne portent pas sur le monde réel), comme un modèle de la rationalité scientifique.

¹⁶ Faute de pouvoir en dire plus ici sur cette question, je renvoie aux perspectives ouvertes, par exemple, par *La connaissance des formes symboliques* de Cassirer (*op. cit.*).

4.

CONSTRUCTION HISTORIQUE

Considérons maintenant l'expression «construction historique», second terme de la tension que nous soumettons à l'analyse. Et commençons par quelques considérations sur le sens du mot «historique», quand on envisage les éléments d'une science que sont ses concepts comme des constructions historiques. La physique telle que nous la connaissons n'a pas toujours existé ainsi. On se représentait, par exemple, la nature et les objets de la nature, au temps de Galilée, ou au XVIII^e siècle, différemment de la manière dont on les voit au tournant du XXI^e. Ces représentations étaient, à leur époque, considérées comme adéquates, voire comme vraies. Si on les professait aujourd'hui, elles seraient considérées comme insuffisantes, approximatives, dépassées, voire en partie fausses.

C'est ici que la considération du temps de l'histoire, pour la compréhension actuelle de ce qu'est la science, fait sentir sa nécessité : les deux écueils seraient l'anachronisme (juger les connaissances du passé à l'aune de celles du présent) d'un côté, le «relativisme» (considérer que toutes les connaissances se valent) de l'autre. Il faut donc situer ces connaissances scientifiques à leur place dans leur temps, et dans leur succession temporelle qui les rattache les unes aux autres : les connaissances présentes ont été rendues possibles par les connaissances passées (quoique de manière généralement imprévisible). On peut suivre ces évolutions par l'histoire des sciences, reconnaître le moment où une conception nouvelle apparaît, celui où elle est reçue, celui encore où elle transforme, par sa prise en compte explicite, le système de représentation antérieur... Les sciences, les théories scientifiques, comme l'organisation des disciplines et des connaissances, ne sont pas statiques et évoluent, en solidarité avec un système plus global de représentation et de culture (qui comprend la technique, l'économie, le lien social), caractéristique d'un époque, sans qu'un tel système soit nécessairement rigide : de fait, il en existe de multiples variantes, formant, pour un contexte donné, une famille, possédant une caractéristique d'ensemble¹⁷.

L'évolution des sciences indique leur caractère historique. Mais cela n'est pas assez dire. L'histoire n'est pas la chronologie, elle est, comme le disait Marc Bloch, la “science des hommes dans le temps”, et elle est tissée de représentations mentales, d'idées, de vie sociale, de réalisations esthétiques, techniques... Les élaborations scientifiques appartiennent à l'histoire matérielle et culturelle des hommes en société. Ce qui nous amène au sens du mot «construction», dans l'expression «construction historique».

Les concepts scientifiques, en particulier les concepts physiques, mais aussi les principes et les théories mêmes, sont des constructions historiques. Le sont également les conceptions plus générales comme la définition même de la physique, qui signifiait autrefois la nature, et qui désigne maintenant une science de la nature parmi d'autres, portant sur un objet précis, distingué des autres ; ou comme le lien de la physique aux mathématiques, devenu très étroit depuis le XVII^e

¹⁷ On pourrait discuter ici de la notion de paradigme proposée par Thomas Kuhn (Kuhn [1960]) et trop souvent reprise sur le mode du dogme, ou des idées reçues sans critique. Elle me semble trop rigide, tout en étant mal définie, notamment concernant la question de l'invention en science, et en fin de compte inutile pour des analyses précises.

et surtout le XVIII^e siècle, aujourd'hui lien indispensable de constitution par la nécessité même de la pensée, par les modes d'expression des grandeurs (géométrique, analytique, différentiel, aux dérivées partielles, fonctions d'espaces mathématiques abstraits...); et la conception d'une théorie comme système de principes et de concepts dont la structure peut être rendue mathématiquement (voir le calcul variationnel, le principe de moindre action, les groupes de transformations ou de symétrie, le rôle des invariances, etc.); également, les modalités de l'expérimentation, les techniques d'observation, le rôle des instruments dans l'analyse et, de plus en plus, dans la production des phénomènes; les rapports de la théorie avec l'expérience, ceux de l'abstraction conceptuelle avec les résultats de mesure, les exigences d'adéquation, d'exactitude... On peut ajouter, bien entendu, les élargissements de la physique, tant ceux de ses théories que des objets de ces dernières, mis en regard des tentations réductionnistes: au mécanisme, à l'énergétique, au «tout électromagnétique», aux représentations classiques de l'observationalisme, pour la physique; au physico-chimique pour la biologie...

Il serait possible de considérer des cas marquants en histoire des sciences qui mettent en évidence l'imbrication de tous ces éléments à chacune des étapes. Par exemple, la formulation par Galilée de la loi de la chute des corps représente un moment marquant de la constitution de la physique au sens moderne, avec l'expression d'une loi dynamique fondamentale. Ce moment se laisse caractériser par un certain nombre de considérations dont l'ensemble détermine, en même temps qu'une connaissance nouvelle (de nouveaux contenus de connaissance), une nouvelle manière de penser (que l'on peut rapporter à une configuration de rationalité). La représentation de concepts physiques (par exemple, la vitesse) par des grandeurs ou quantités s'accompagne de l'abandon des qualités de la pensée scolastique; la possibilité corrélatrice de composer les vitesses entre elles, même pour des mouvements différents, violents (par chocs) ou continus (tel celui de chute par la pesanteur), va de pair avec l'idée que le mouvement n'est plus conçu comme inhérent aux corps, l'impulsion galiléenne («*impeto*») étant vue comme un effet communiqué, et non plus le moteur transmis, comme l'était l'*impetus* des maîtres scolastiques du XIV^e siècle (Jean Buridan, Robert Grosseteste, Nicole Oresme, etc.)¹⁸. Les corps sont conçus indépendamment de leur état de mouvement ou de repos, et ne sont pas affectés par celui-ci (comme l'a si bien souligné Alexandre Koyré¹⁹), et le mouvement et le repos, mis désormais sur le même pied ontologique, sont, de ce point de vue, équivalents. En résulte le principe d'inertie, et la relativité du mouvement: que l'on ajoute ou retranche de la vitesse au mouvement d'un corps, cela n'affecte pas ses propriétés, c'est-à-dire, en fait, les lois physiques qui lui sont appliquées (équivalence de la chute parabolique ou verticale de corps, vue de repères en mouvement relatif). Ajoutons à cela le choix de la grandeur (ou du concept) «sensible» pour l'étude des lois du mouvement, à savoir le temps, promu désormais variable fondamentale pour la loi physique²⁰.

Ou prenons encore les imbrications des conceptions sur la dynamique, la géométrie et le calcul différentiel (ou des fluxions) dans les travaux de Newton,

¹⁸ Crombie [1952], Clagett [1959].

¹⁹ Koyré [1935-1939].

²⁰ Galilée [1638]. Voir Paty [1994b, 1996b].

de Leibniz et des frères Jacques et Jean I Bernoulli²¹, et leurs disciples, puis dans les recherches d'Euler, de Clairaut et de d'Alembert²², avec l'étude analytique des propriétés du mouvement des corps solides quelconques, des fluides et milieux continus, et des objets astronomiques soumis à l'action de plusieurs corps. Toutes ces innovations décisives aboutirent à la constitution de la mécanique comme science analytique (avec Lagrange, Laplace et d'autres...²³). Que ces élaborations représentent bien davantage qu'un simple développement théorique dans la ligne d'un «paradigme newtonien» ayant détrôné un «paradigme cartésien» qui aurait prévalu antérieurement, cela apparaît clairement si l'on examine la nature des travaux de ces chercheurs (qui s'appelaient alors «Géomètres»), notamment ceux de la période intermédiaire, d'Euler, Clairaut et d'Alembert, qui définirent le nouveau cours de la physique²⁴.

Chacun d'eux faisait, à sa manière, œuvre de création dans un domaine nouveau et dans une direction originale, en transformant par l'usage de l'analyse différentielle leibnizienne la formulation newtonienne de la mécanique des corps, reprenant de l'approche newtonienne les concepts d'impénétrabilité et d'attraction à distance ainsi que l'idée centrale de la variation temporelle, étrangères, certes, à la physique cartésienne, mais selon une conception de la légitimité de définir mathématiquement les grandeurs très différente de celle (néo-platonicienne) de Newton, et qui reprenait de fait les exigences de l'intelligibilité exprimées par Descartes dans les *Règles pour la direction de l'esprit* ainsi que dans le *Discours de la méthode*²⁵. Ces exigences pouvaient être remplies, justifiant par là la mathématisation de la physique, grâce à la double fonction des mathématiques dans l'exercice de la raison selon Descartes (sous le signe de la *mathesis universalis*) : servir de modèle et de garantie de certitude dans les relations entre les propositions ; gouverner l'expression des grandeurs appropriées à la représentation du monde physique (grandeurs continues et sujettes à l'«ordre et la mesure», c'est-à-dire soumises à des relations quantitatives).

L'implication épistémologique d'une telle conception «métaphysiquement» et «ontologiquement» neutre du rapport des mathématiques à la nature était que les théories physiques peuvent être mathématisées, parce qu'elles mettent en œuvre des grandeurs exprimées mathématiquement. Leur mathématisation fut effective lorsque ces théories furent en possession des grandeurs et des principes physiques appropriés aux objets et aux phénomènes considérés²⁶. Ce fut cette conception qui prévalut et se maintint à travers

²¹ Newton [1687, 1967-1981] ; Leibniz [1849-1863, 1989], Fichant [1998] ; Bernoulli [1989-1991], Blay [1992].

²² Euler [1911-], et les études de Clifford A. Truesdell dans l'apparat critique des textes sur la mécanique de cette édition ; Clairaut [1743], Greenberg [1996], Passeron [1994] ; d'Alembert [1743, 1744, 1749, 1749-1752, 1751-1754], Hankins [1971], Paty [1977, 2001c et d, à paraître], Emery & Monzani [1989], Grimberg [1998], Michel et Paty [2001].

²³ Lagrange [1788], Galleto [1991] ; Laplace [1799-1825], Merleau-Ponty [1986], Martin-Viot [1994].

²⁴ Voir, en particulier, Paty [2001c, d].

²⁵ Descartes [1628], notamment la règle 14 ; Descartes [1637]. Voir Paty [1997a, 2001e].

²⁶ Paty [1994a].

l'utilisation de nouvelles formes mathématiques²⁷ et les transformations de la physique mathématique et de la physique théorique²⁸, d'ailleurs argumentée chez plusieurs mathématiciens, physiciens et philosophes, de d'Alembert à Kant, Ampère, Riemann, Boltzmann, Poincaré, Duhem, Hermann Weyl, Albert Einstein²⁹...

C'est ainsi que la mathématisation des grandeurs physiques prit pour l'essentiel, dès le XVIII^e siècle, la forme du calcul différentiel et intégral, appropriée au traitement de grandeurs continues ; et que les équations aux dérivées partielles, développées en conjonction avec les exigences de la mécanique des fluides, devinrent la «langue» de la physique des milieux continus et des champs. Ceux-ci furent d'abord pensés avec le support «substantiel» d'un milieu matériel, tels le phlogistique, le calorique, l'éther...³⁰, puis simplement comme des concepts-grandeurs physiques se suffisant à eux-mêmes, comme la combustion en présence d'oxygène (avec Lavoisier), la chute de température entre deux sources de chaleur (de Sadi Carnot à Kelvin-Thomson et Clausius), ou le champ à propagation de proche en proche (avec la théorie de la relativité d'Einstein).

Ces grandeurs se trouvaient avoir, en physique classique et en théorie de la relativité, la forme de variables ou de fonctions à valeurs numériques, susceptibles d'être directement comparées à des résultats de mesure. En physique quantique, les grandeurs de cette nature sont les grandeurs physiques classiques associées ou «projetées» (des grandeurs quantiques sur les classiques, avec des probabilités correspondantes), tandis que les grandeurs «proprement quantiques» sont affectées de formes plus complexes (telles que les fonctions d'état, définies sur des espaces mathématiques de Hilbert, prenant la forme de superpositions linéaires, et des opérateurs, matriciels, différentiels, ou autres, agissant sur ces fonctions). Il existe encore d'autres types de grandeurs permettant de caractériser des contenus physiques, tels les attracteurs étranges en théorie des systèmes dynamiques, ou des grandeurs topologiques et non métriques qui semblent appropriées à certaines théories (par exemple, en cosmologie quantique). Il semble que ce qui caractérise le portée physique de l'utilisation de telles grandeurs soit avant tout leur aspect relationnel, directement lié aux phénomènes. Ces grandeurs peuvent être rapportées indirectement à des grandeurs classiques s'il s'agit d'observation ou de mesure au sens classique. Mais la spécificité des phénomènes physiques est à trouver au niveau des relations de grandeurs propres à de tels systèmes qui peuvent ainsi être pensées «physiquement», si l'on admet que ce qui est «physique» se définit plus justement par le fait d'être théoriquement significatif (et corroboré par les phénomènes, les expériences, etc.), plutôt que par le fait d'être directement transcribable en termes de mesure.

²⁷ Des équations aux dérivées partielles aux nombres complexes, aux vecteurs, aux tenseurs, aux matrices, aux spineurs, aux fonctions «de carré sommable» définies sur des espaces de Hilbert et des opérateurs linéaires agissant sur ces fonctions, aux distributions, aux probabilités, aux algèbres non commutatives, aux notions topologiques, etc...

²⁸ Paty [1994a, 1999a].

²⁹ Riemann [1854], Boltzmann [1974], Poincaré [1902, 1905, 1908, 1913], Duhem [1906], Weyl [1918], Einstein [1989-1993], vol. 5.

³⁰ Sur la critique de la notion de substance et de la pensée «substantialiste», voir : Cassirer [1910], Bachelard [1934, 1938].

La recherche d'une correspondance directe de la *représentation* avec les *phénomènes* qu'elle se propose de décrire, qui caractériserait ce qui est physique, serait donc à rechercher entre les *relations de grandeurs* (fussent-elles au départ formelles, et l'idée de relation trouvant son prolongement dans celle de *structure*), d'une part, et les *caractères spécifiques* de ces phénomènes (qui intéressent avant tout la pensée physique, car ce sont eux qui déterminent le nouveau domaine), d'autre part. Un tel programme pour la définition de ce qui est physique serait assurément apte à simplifier les problèmes (souvent insolubles) d'«interprétation»³¹, moyennant, il est vrai, des modifications sur les acceptions usuelles de certaines catégories de pensée, telle que la notion générale de grandeur. De tels changements de conceptions générales et extensions de sens pour certaines catégories comme les grandeurs (pour la notion de *grandeur physique* au-delà du numérique et du mesurable) correspondent à des modifications dans les formes et les modes mêmes de l'activité rationnelle, à des *transformations de la rationalité*.

5.

LE CREUSET TRANSCENDANTAL ou la pensée *rationnelle* du monde *empirique*

Comment, en effet, caractériser la nouvelle conception de ce qui est physique telle que celle que nous venons de suggérer, sinon par une modification de ce qui est conçu comme le *réfèrent* même de la compréhension ? Le cas des grandeurs de la physique quantique peut paraître spécifique, et d'ailleurs discutable puisqu'aucun accord général n'existe (encore ?) sur l'extension proposée de la notion de *grandeur physique* à des *concepts abstraits* et tenus pendant longtemps pour “*purement mathématiques*” tels que les fonctions d'état définies sur des espaces de Hilbert et les opérateurs correspondants agissant sur ces fonctions³². Au surplus, dans ce cas, il ne s'agirait que d'une ré-interprétation d'une connaissance déjà acquise, qui ne change rien aux contenus proprement dits, et propose seulement une autre manière d'en voir les significations et d'en concevoir l'intelligibilité.

Mais l'intelligibilité n'est pas accessoire, et fait intervenir des aspects de la pensée qui vont au-delà des mathématiques et de l'expérience, et portent sur des implications métascientifiques et philosophiques. Distribuer autrement le jeu de ces diverses instances dans l'exercice de la pensée rationnelle est tout sauf anodin, et il semble que l'on gagne toujours à concevoir leurs rapports le plus simplement possible, c'est-à-dire selon la plus grande autonomie pour la science considérée par rapport aux questions métascientifiques et philosophiques. La rationalité propre à la physique ne s'en éclaire alors que mieux et, à vrai dire, un tel éclairage nous la fait voir transformée.

Au surplus, par-delà ses spécificités, la physique quantique ne représente en cela qu'un cas particulier parmi d'autres des théories physiques et de

³¹ Sur l'interprétation “orthodoxe” de la mécanique quantique, voir la philosophie particulière développée par Niels Bohr (Bohr [1957, 1963]).

³² Voir Paty [1999e, 2000, 2001e].

leur histoire : nombreux sont les exemples de réinterprétation de connaissances, expériences et formalismes, déjà acquises, et qui, vues ainsi sous un nouveau jour, montrent de nouveaux référents pour la pensée qui parlent désormais directement pour la compréhension, restructurant, pour ainsi dire, ce qu'on appelle, pour telle science, l'“intuition” comme connaissance synthétique immédiate. A cet égard, la *théorie physique* constitue une instance de compréhension, qu'une simple juxtaposition de relations mathématiques et de données empiriques ne saurait égaler.

Par sa structure même, reliant des grandeurs physiques réglées par des principes également physiques, sous les espèces d'équations, elle porte le contenu physique de ses propositions, sans qu'il soit nécessaire de lui superposer une interprétation, exprimée en langage courant, qui donnerait le sens. Tout sens véritable à son propos ne peut être autre que ces relations mêmes, que l'on peut, certes, s'essayer à paraphraser ou à commenter dans le langage de tous les jours, mais qui restent par elles-mêmes insubstituables. Dans l'expression de ces relations, la forme même donne le sens. Pour prendre des exemples désormais bien classiques, comment imaginer rendre compte des lois de la mécanique ou de l'électromagnétisme sans utiliser des grandeurs exprimées sous forme différentielle, pourvues ainsi, dès leur définition, d'un sens physique, dès lors qu'elles sont continues ? La compréhension de ces domaines de la connaissance passe par la pensée de grandeurs exprimées de cette manière.

Il ne s'agit d'ailleurs pas tant, dans de tels cas, de réinterprétation, que du processus même par lequel ces connaissances ont été établies. Et, en physique, la *forme mathématique* est indissociable de la pensée des *contenus physiques*. Il est clair, de Descartes à Riemann, Poincaré, Einstein et à la physique d'aujourd'hui, que la forme mathématique est inhérente à la pensée des grandeurs, ce qui donne sans doute à la physique un avantage sur les autres sciences de la nature, quant à la conscience de l'état de sa rationalité, puisque celle-ci prend les formes simples des relations mathématiques entre ses grandeurs. Cette transparence relative présente cependant un inconvénient : celui de faire parfois perdre de vue le lien direct à la réalité décrite (ce que l'on observe dans le cas de l'interprétation courante de la mécanique quantique). Disons ici seulement que la mathématisation de la physique, son lien privilégié aux mathématiques (qui est un lien de constitution au niveau de l'expression symbolique des concepts comme grandeurs), se trouvent justifiés dans la mesure où les mathématiques sont propres à exprimer de la manière la plus étroite et la plus exacte le caractère relationnel des grandeurs.

Mais la physique, comme les autres sciences, porte sur le monde de l'“empirie”, donnée dans l'expérience, qu'elle transforme dans la pensée symbolique en propositions rationnelles intelligibles. De quelle manière s'effectue cette transformation, de l'empirique en du rationnel ? La pensée scientifique constitue à cet égard une sorte de creuset où ce matériau empirique est travaillé, sur le mode du symbolique, et l'on serait tenté de dire que c'est un *creuset transcendantal*, puisque le résultat de ce travail est du rationnel intelligible, par-delà les données de la perception ou de l'expérience. Cette transformation suppose la formulation de principes d'intelligibilité, qui se rapportent expressément à l'instance du rationnel, et sous l'égide desquels sont élaborés des concepts qui viennent à s'imposer tout en portant souvent une part d'obscurité, du moins quant à une représentation imagée (ou concevable dans les termes exacts des représentations précédemment acquises). Par exemple : l'attraction à distance newtonienne, à propagation instantanée et sans

intermédiaire, ou, plus tard, le champ, indépendamment d'un support matériel ou substantiel. Ces concepts, qui ont une *fonction d'intégration rationnelle* des données factuelles, sont pensés en relation à des principes physiques (conservation de l'énergie, second principe de la thermodynamique, principe de relativité..., ou principes "formels", de moindre action, d'invariance, etc.), formulés à partir de propriétés constatées, élargies au niveau d'une validité universelle, et qui deviennent par là le soubassement des autres connaissances du domaine considéré.

De telles notions ou propositions inventent, pour ainsi dire, un nouvel espace pour la pensée physique qui peut s'y déployer plus largement, développant de nouvelles relations entre ses éléments, qui ne peuvent être rendues par les termes connus, mais qui *mordent* au contraire sur un domaine auparavant ignoré, inconnu, voire impensable. Elles apportent par là une intelligibilité plus vaste et plus compréhensive, capable d'étendre la portée des relations au-delà de leur ancien domaine, hypostasiant le descriptif en prédictif³³. Ces propositions nouvelles *fonctionnent* dès lors comme des *principes rationnels*, bien que leurs raisons ne soient pas analysables dans les termes de la connaissance précédente. Ce qui les fait admettre comme nécessaires et comme rationnelles, c'est un *élargissement* du domaine et des formes de la *rationalité*, capable d'englober les connaissances nouvelles en même temps que les anciennes, en les faisant voir d'un même point de vue et plus en profondeur, et conférant par là une meilleure intelligibilité.

En particulier, dire d'une grandeur qu'elle est physique, c'est lui rapporter directement les différents éléments de notre connaissance d'un domaine, qui n'ont désormais pas besoin d'autres intermédiaires pour leur justification. "Comprendre autrement", plus "directement", c'est avoir "pris conscience pratiquement" d'une modification dans la structure même de la pensée, et plus précisément dans ce que nous appelons "rationalité". Un tel élargissement du rationnel pour parvenir à une compréhension plus immédiate de phénomènes ou de processus jusqu'alors conçus de manière indirecte et lointaine, n'aurait rien d'exceptionnel, puisque c'est de cette manière seulement que peut s'ouvrir à l'intelligence le champ de l'inconnu.

Les chemins de la pénétration de ce qui est encore ignoré sont complexes, et font appel à des procédures variées, qui amènent à des degrés divers de connaissance avant que ceux-ci ne soient pleinement saisis dans la compréhension. Nous *connaissons* souvent avant de véritablement *comprendre* : cette connaissance est d'abord surtout empirique ou hypothétique, alors que la compréhension se veut rationnelle et exige la cohérence. La transformation s'opère à la faveur d'un travail de la pensée sur des éléments symboliques substituant les éléments de départ en des termes rationnels (les mettant, par là, en rapport). La physique fournit à cet égard des indications précises et exemplaires, et en même temps particulières, car les structures de la rationalité y apparaissent très liées à la forme mathématique des relations.

³³ Un exemple, parmi d'autres : l'analyse épistémologique faite par d'Alembert, au milieu du XVIII^e siècle, des notions newtoniennes d'attraction et d'impénétrabilité pour en rechercher une justification en raison (voir Paty [2001b], p. 82-83).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1743]. *Traité de dynamique*, David, Paris, 1743. 2ème éd., modif. et augm., David, Paris, 1758.
- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1744]. *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*, David, Paris, 1754.
- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1749]. *Recherches sur la précession des équinoxes et sur la nutation de l'axe de la Terre dans le système newtonien*, David, Paris, 1749.
- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1749-1752]. *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*, David, Paris, 1752. (Trad. par d'Alembert sur l'original en latin soumis au concours de l'Académie de Berlin en nov. 1749).
- D'ALEMBERT, Jean le Rond [1754-1756]. *Recherches sur différents points importants du système du monde*, 3 vols., Paris, 1754-1756.
- BACHELARD, Gaston [1934]. *Le nouvel esprit scientifique* (1934), Presses Universitaires de France, Paris, 1966.
- BACHELARD, Gaston [1938]. *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, 1938 ; 1986.
- BARBO, Loïc [1999]. *Pierre Curie, 1859-1906. Le rêve scientifique*, Belin, Paris, 1999.
- BERNOULLI, Johann [1989-1991]. *Der Briefwechsel von Johann Bernoulli, 2: Der Briefwechsel mit Pierre Varignon, Erste Teil (1692-1702); Zweiter Teil (1702-)*, Bearbeit und Kommentiert von Pierre Costabel und Jeanne Peiffer, Birkhauser, Basel, 1988 (vol. 1), 1991 (vol. 2).
- BLAY, Michel [1992]. *La naissance de la mécanique analytique. La science du mouvement au tournant des XVII^e et XVIII^e siècles*, Presses Universitaires de France, Paris, 1992.
- BOHR, Niels [1957]. *Atomphysik og menneskelig erkendelse*, Kobenhavn, 1957. Trad. all., *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*, Wieveg, Braunschweig, 1958. Trad. angl., *Atomic physics and human knowledge*, Wiley and sons, New York, 1958. Trad. fr., *Physique atomique et connaissance humaine*, Gauthier-Villars, Paris, 1961.
- BOHR, Niels [1963]. *Essays 1958-1962 on atomic physics and human knowledge*, ed. by Aage Bohr, Interscience, London, 1963.
- BOLTZMANN, Ludwig [1974]. *Theoretical physics and philosophical problems, selected writings*, translated from German by Paul Foulkes, Reidel, Dordrecht, 1974.
- CASSIRER, Ernst [1910]. *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Bruno Cassirer, Berlin, 1910. Trad. angl., *Substance and function*, in Cassirer, E., *Substance and function and Einstein's theory of relativity*. Engl. transl. By par William Curtis Swabey and Mary Collins Swabey, Open Court, Chicago, 1923 ; Dover, New York, 1953 1923 (éd.1953), p.1-346.
- CASSIRER, Ernst [1923-1929]. *Philosophie des symbolischen Formen*, 3 vols., 1923, 1925, 1929. Trad. fr. par Ole Hansen-Love et Jean, Lacoste, *La philosophie des formes symboliques*, Minuit, Paris, 3 vols., 1972.
- CLAGETT, Marshall [1959]. *The science of Mechanics in the Middle Ages*, The University of Wisconsin Press, Madison, 1959.
- CLAIRAUT, Alexis [1743]. *Traité de la forme de la Terre*, Paris, 1743.
- CROMBIE, A.C. [1952]. *Augustine to Galileo. The history of science. A.D. 400-1650*, Falcon Press, London, 1952 ; ré-éd. augm., Heinemann, London, 1957 ;

- trad. fr. par Jacques d'Hermies, *Histoire des sciences de Saint Augustin à Galilée (400-1650)*, Presses Universitaires de France, Paris, 2 vols., 1958.
- CURIE, Pierre [1908]. *Oeuvres*, publiée par les soins de la Société Française de Physique, Gauthier-Villars, Paris, 1908.
- DUHEM, Pierre 1906. *La théorie physique. Son objet, sa structure* (1906), 2ème éd. revue et augm., 1914; ré-éd., Vrin, Paris, 1981.
- DESCARTES, René [1628]. *Regulæ ad directionem ingenii* (vers 1728), in Descartes, *Oeuvres*, éd. par Paul Adam et Jules Tannery, Vrin, Paris, ré-éd., 1982, vol. 10, p. 349-488 ; trad. en fr., *Règles pour la direction de l'esprit*, Paris, Vrin, 1970.
- DESCARTES, René [1637]. *Discours de la méthode*, in Descartes, *Oeuvres*, éd. par Paul Adam et Jules Tannery, Vrin, Paris, vol. 6, ré-éd., 1982, p. 1-78
- EINSTEIN, Albert [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, éd. et trad. par F. Balibar *et al.*, Seuil, Paris, 6 vols., CNRS/Seuil, 1989-1993 (en part., vol. 2 et 3, *Relativités 1 et 2*, 1993).
- EINSTEIN, Albert ; LORENTZ, Hendryk A. ; Minkowski, H. ; Weyl, Hermann [1922]. *Das Relativitätsprinzip*, avec des notes par Arnold Sommerfeld, Teubner, Leipzig, 1922 ; trad. angl. par W. Perrett and G.B.Jeffrey, *The Principle of relativity*, Methuen, London, 1923.
- EMERY, Monique et MONZANI, Pierre (ed.) [1989]. *Jean d'Alembert, savant et philosophe: portrait à plusieurs voix*, Archives contemporaines, Paris, 1989.
- EULER, Leonhard [1911-]. *Opera omnia*, Basel, 3 séries de nombreux volumes, depuis 1911.
- FICHANT, Michel [1998]. *Science et métaphysique dans Descartes et dans Leibniz*, Presses Universitaires de France, Paris, 1998.
- GALILEI, Galileo [1638]. *Discorsi e dimostrazione matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638; ré-éd., avec introd. et notes, par A. Carugo et L. Geymonat, Boringhieri, 1958.
- GALLETO, D. [1991]. Lagrange e le origini della *Mécanique Analytique*, *Giornale di fisica* 32, 1991, 83-126.
- GREENBERG, John L. [1995]. *The Problem of the Earth from Newton to Clairaut*, New York, 1995.
- GRIMBERG, Gérard [1998]. *D'Alembert et les équations aux dérivées partielles en hydrodynamique*, Thèse de doctorat en épistémologie et histoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, 1998.
- HANKINS, Thomas L. [1970]. *Jean d'Alembert, science and the enlightenment*, Oxford University Press, Oxford, 1970.
- HERTZ, Heinrich Rudolf [1977]. *Errinerungen. Briefe. Tagebücher.- Memoirs. Letters.Diaries*, Arranged by Johanna Hertz. Second enlarged ed. prepared by Mathilde hertz and Charles Süsskind, San Francisco, 1977.
- HUME, David [1748]. *Philosophical essays concerning human understanding*, 1748 ; repris sous le titre *Inquiry concerning human understanding*, 1758.
- KANT, Immanuel [1787]. *Kritik der reinen Vernunft*, J.F. Hartknoch, Riga, 1781; 2 è éd., 1787. Trad. fr. par Alexandre J.L. Delamarre et François Marty, *Critique de la raison pure*, in Kant, Emmanuel, *Oeuvres philosophiques*, vol. 1, Gallimard, Paris, 1980, p. 705-1470.
- KOYRE, Alexandre [1935-1939]. *Etudes galiléennes*, Paris, 3 vols., 1935-1939 ; 2 è éd., 1 vol., 1966. (1935-1939), Hermann, Paris, 1966.

- KUHN, Thomas [1962]. *The structure of scientific revolutions* (1962). Second ed. enl., University of Chicago Press, Chicago, 1970. Trad. fr., *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, Paris, 1972.
- LAGRANGE, Joseph Louis [1788]. *Mécanique analytique*, in Lagrange, *Oeuvres*, vol.11 et 12, 1888 et 1889.
- LAPLACE, Pierre Simon [1799-1825]. *Traité de mécanique céleste*, 5 vols., Paris, 1799-1825. Rééd. en 4 vols., Paris, 1829-1939.
- LEIBNIZ, Wilhelm Gottfried [1849-1863]. *Mathematische Schriften, Oeuvres*, édité par C. J. Gerhardt, 1849-1863, Halle, 7 vols, 1849-1863. Ré-éd., G. Olms, Hildesheim, 1962.
- LEIBNIZ, Wilhelm Gottfried [1989]. *Naissance du calcul différentiel, 26 articles des Acta Eruditorum*. Introduction, traduction et notes par Marc Parmentier, Vrin, Paris, 1989.
- LOCKE, John [1690]. *An Essay concerning human understanding*, London, 1690.
- MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik*. Trad. fr. par E. Bertrand, *La mécanique*, Paris, Hermann, 1904.
- MARTIN-VIOT, Florence [1994]. *L'élaboration des principes variationnels en dynamique, de Lagrange à Hamilton et Jacobi* (DEA, Paris 7, Thèse de doctorat en épistémologie et hisstoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, 1994.
- MAXWELL, James Clerk [1873]. *A treatise on electricity and magnetism* (1873); 3rd ed. (1891), 2 vols. Ré-éd., Dover, New York, 1954.
- MAXWELL, James Clerk [1890]. *The scientific papers of J.-C. M.*, Cambridge, 1890.
- MINKOWSKI, Hermann [1908]. Raum und Zeit, *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 104-111. Trad. angl., Space and time, in Einstein *et al.* [1923], p. 73- 91.
- MERLEAU-PONTY, Jacques [1983]. *La science de l'univers à l'âge du positivisme. Etude sur les origines de la cosmologie contemporaine*, Vrin, Paris, 1983.
- MICHEL, Alain et PATY, Michel (éds.) [2001]. *Analyse et dynamique. Etudes sur l'œuvre de d'Alembert*, Presses de l'Université Laval, Québec, 2001.
- NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiae Naturalis principia mathematica*, London, 1687 ; 2ème éd., 1713 ; 3ème éd., 1726, éditée avec des variantes par Alexandre Koyré et I.B. Cohen, Cambridge, 1972. Trad. angl. par A. Motte, *The mathematical principles of natural philosophy*, 1729 ; 3è éd., 1726 ; trad. rév. par F. Cajori, Berkeley, Univ. California Press, 1934. Trad. française par Mme du Chastelet, *Les Principes mathématiques de la philosophie naturelle de M. Newton*, 2 vols., Paris, 1756 et 1759.
- NEWTON, Isaac [1967-1981]. *The mathematical papers of sir I.N.*, éd. par Derek T. Whiteside, Cambridge University Press, Cambridge, 8 vols., 1967-1981.
- PASSERON, Irène [1994]. *Clairaut et la figure de la Terre au dix-huitième siècle. Cristallisation d'un nouveau style autour d'une pratique physico-mathématique*, Thèse de doctorat en Epistémologie et Histoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, 1994.
- PATY, Michel [1977]. *Théorie et pratique de la connaissance chez Jean d'Alembert*, Thèse de doctorat en philosophie, Université des Sciences Humaines, Strasbourg 2, 1977.
- PATY, Michel [1988]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988

PATY, Michel [1990]. *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, L'Harmattan, Paris, 1990.

PATY, Michel [1992a]. La dimension philosophique du travail scientifique (découverte et interprétation), *Philosophique* (Université de Besançon) 1992, n°1, 45-67.

PATY, Michel [1992b]. La question du statut de l'expérience en physique, *Cahiers d'Histoire et de philosophie des sciences*, n° 40, 1992, 183-197. [Actes du Colloque *Les Procédures de preuve, de validation et d'évaluation dans les sciences et les techniques: une approche historique*, Lille, 11-13 avril 1991.]

PATY, Michel [1993]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

PATY, Michel [1994a]. Mesure, expérience et objet théorique en physique, in Beaune, Jean-Claude (dir.), *La mesure, instruments et philosophies*, Champ Vallon, Seyssel (01), 1994, p. 159-174.

PATY, Michel [1994b]. Le caractère historique de l'adéquation des mathématiques à la physique, in Garma, Santiago; Flament, Dominique; Navarro, Victor (eds.), *Contra los titanes de la rutina.- Contre les titans de la routine*, Comunidad de Madrid/C.S.I.C., Madrid, 1994, p. 401-428.

PATY, Michel [1994c]. Sur l'histoire du problème du temps : le temps physique et les phénomènes, in Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994, p. 21-58; 2è éd., 1995; Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.

PATY, Michel [1996a]. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470.

PATY, Michel [1996b]. Galilée et la mathématisation du mouvement, *Passages*, n°76, avril-mai 1996, 49-53.

PATY, Michel [1997]. «Mathesis universalis» e inteligibilidad en Descartes, Trad. en español por Martha Cecilia Bustamente, in Albis, Victor R. ; Charum, Jorge ; Sanchez, Clara Helena ; Serrano, Gonzalo (eds.), *Memorias del Seminario en conmemoración de los 400 años del nacimiento de René Descartes*, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Memorias, n°9, Bogotá, 1997, p. 135-170. Trad. em português por Maria Aparecida Corrêa-Paty, «Mathesis universalis» e inteligibilidade em Descartes, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (Campinas), Série 3, vol. 8, 1998 (n°1, jan.-jun.), 9-57. Egalement, in *Seminário sobre O Cartesianismo*, Centro de Estudos de História e Filosofia da Ciência, Centros de Investigação da Universidade de Évora, Evora, Portugal, 2000, p. 145-200. Original en Français : «Mathesis universalis» et intelligibilité chez Descartes, in Chemla, Karine ; Probst, Siegmund ; Erdély, Agnès et Moretto, Antonio (eds.), *Ceci n'est pas un festschrift pour Imre Toth* (29.12.1996), à paraître.

PATY, Michel [1998a]. 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.

PATY, Michel [1998b]. Le vide matériel, ou : La matière crée l'espace, in Diner, Simon & Gunzig, Edgard (éds.), *Univers du tout et du rien*, Editions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles, 1998, p. 22-44.

PATY, Michel [1998c]. Les trois dimensions de l'espace et les quatre dimensions de l'espace-temps in Flament, Dominique (éd.), *Dimension, dimensions I*, Série

- Documents de travail, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 1998, p. 87-112.
- PATY, Michel [1999a]. La place des principes dans la physique mathématique au sens de Poincaré, *Fundamenta philosophiæ* (Nancy/éd. Kimé, Paris) 3 (2), 1998-1999, 61-74.
- PATY, Michel [1999b]. Les trois stades du principe de relativité, in *Les Relativités*, numéro spécial de la *Revue des questions scientifiques* (Namur, Be), 2000, 103-150.
- PATY, Michel [1999c]. La création scientifique selon Poincaré et Einstein, in Serfati, Michel (éd.), *La recherche de la vérité*, Coll. L'écriture des Mathématiques, ACL-Editions du Kangourou, Paris, 1999, p. 241-280.
- PATY, Michel [1999e]. Are quantum systems physical objects with physical properties ?, *European Journal of Physics* 20, 1999 (november), 373-388.
- PATY, Michel [2000]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de Philosophie* (Bruxelles), n°212, 2 (juin) 2000, 199-242. R
- PATY, Michel [2001b]. Intelligibilité et historicité (Science, rationalité, histoire), in Saldaña, Juan José (ed.), *Science and Cultural Diversity. Filling a Gap in the History of Science*, Cadernos de Quipu 5, México, 2001, p. 59-95.
- PATY, Michel [2001c]. Les recherches actuelles sur d'Alembert. A propos de l'édition de ses *Oeuvres complètes*, in Michel, Alain et Paty, Michel (éds.). *Analyse et dynamique. Etudes sur l'œuvre de d'Alembert*, Presses de l'Université Laval, Québec, 2001.
- PATY, Michel [2001d]. D'Alembert, la science newtonienne et l'héritage cartésien, *Corpus* (revue de philosophie, Corpus des œuvres de philosophie en langue française, Paris), n°38 : *D'Alembert* (éd. par Markovitz, Francine et Szczeciniarz, Jean-Jacques), 2001, 19-64.
- PATY, Michel [2001e]. La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique, in Espinoza, Miguel (éd.), *Deuxième Journée de Philosophie des Sciences Jean Largeault*, L'Harmattan, Paris, 2001.
- POINCARÉ, Henri [1902]. *La science et l'hypothèse* (1902), Flammarion, Paris, 1902 ; 1968.
- POINCARÉ, Henri [1905a]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905 ; 1970.
- POINCARÉ, Henri [1908]. *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908.
- POINCARÉ, Henri [1913]. *Dernières pensées*, Flammarion, Paris, 1913 ; rééd. 1963.
- RIEMANN, Bernhard [1854]. 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, B., *Gesammelte mathematische Werke. Nachträge*, éd. par M. Noether et W. Wirtinger, Leipzig, 1902 1902, p. 272-287. Trad. fr. par J. Houel, Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie, in Riemann, B. *Oeuvres mathématiques*, trad. fr. par L. Laugel, Paris, 1898 ; 1968.
- WEYL, Hermann [1918]. *Raum, Zeit, Materie*, Berlin, 1918 ; 4ème éd., augm., 1921. Trad. fr. sur la 4ème éd. allde., par Gustave Juvet et Robert Leroy, *Temps, espace, matière. Leçons sur la théorie de la relativité générale*, Blanchard, Paris, 1922 ; Paris, 1979.