



HAL
open science

Genèse de la causalité physique

Michel Paty

► **To cite this version:**

Michel Paty. Genèse de la causalité physique. Revue philosophique de Louvain, 2004, n°3, p. 417-446.
halshs-00167282

HAL Id: halshs-00167282

<https://shs.hal.science/halshs-00167282>

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.

Genèse de la causalité physique □

Michel PATY*

RESUME : Les notions ou catégories de causalité et de déterminisme ont accompagné la formation des sciences modernes, et en premier lieu celle de la physique. L'usage courant de nos jours tend souvent, à tort, à les confondre, dans les remises en cause qui en sont faites en physique même. Nous nous proposons, dans ce travail, de clarifier la première de ces notions, plus exactement la *causalité physique*, en suivant son élaboration avec les débuts de la dynamique, à travers ses premières mises en œuvre et conceptualisations qui accompagnent la mathématisation de la mécanique, avant d'être étendue à la physique d'une manière générale. Nous verrons comment, tout en s'appuyant sur l'un des aspects philosophiques traditionnels de l'idée de causalité (celui de « cause efficiente »), la causalité physique s'établit en rupture avec le sens métaphysique qui lui était précédemment attaché. Bien plutôt que dans les *Principia* de Newton, c'est dans la ré-élaboration par d'Alembert, dans son *Traité de dynamique*, des lois du mouvement formulés comme des *principes*, et exprimées par le calcul différentiel, que l'idée de causalité physique est expressément considérée indissociablement de son effet, qui est le *changement de mouvement*. Les pensées respectives de Newton et de d'Alembert sur les notions de *cause* et de *force* sont à cet égard en opposition en ce qui concerne la nature proprement *physique* de ce changement, considéré par d'Alembert comme immanent au mouvement, selon la *cause* circonscrite par son effet, alors qu'il reste mathématique et métaphysique dans la conception newtonienne de la *force externe*, comme substitut mathématique des causes, telle qu'elle se proposait avant Lagrange. C'est la conception physique, héritée de d'Alembert, qui devait par la suite prévaloir, à travers la mécanique analytique lagrangienne, qui permettait de réintégrer physiquement et rationnellement le concept de force dans sa transcription eulérienne différentielle. Les avatars ultérieurs de la notion de causalité, qui comprennent la causalité relativiste et les développements sur le déterminisme, font l'objet d'un travail complémentaire.

ABSTRACT : The notions or categories of causality and determinism have accompanied the formation of modern sciences, and primarily those of physics. The current nowadays use tends often, but wrongly, to get them identified in the reevaluations to which they are submitted in physics itself. In this work we intend to clarify the first of these notions, more precisely *physical causality*, by following its elaboration with the beginnings of dynamics, through its first utilizations and conceptualizations in the making of the mathematization of mechanics, before being extended to physics in a general way. We will see how, while having been supported by one of the

□ Ce travail et celui mentionné dans le texte sur le déterminisme (cité plus loin) qui lui fait suite ont été présentés ensemble comme exposés sous le titre « Causalité et déterminisme en physique classique, relativiste et quantique. Tribulations et différences » : à la *Journée « Causalité et relation fonctionnelle » de l'Ecole Doctorale Savoirs Scientifiques*, Université Paris 7-Denis Diderot, 13 mars 2002 ; et au *Séminaire « Réalisme scientifique et causalité »*, Centre de philosophie des sciences, Institut Supérieur de Philosophie, Université Catholique de Louvain (Be), 15 mars 2002. Je remercie de leur intérêt Claude Debru, Laurence Viennot, et tout particulièrement Michel Ghins pour ses commentaires sur le présent texte qui m'ont amené à en préciser davantage certains points.

* Directeur de recherche émérite au CNRS, Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot. Adresse postale : Centre Javelot, 2 Place Jussieu, F-75005 Paris.
E-mail/courriel : paty@paris7.jussieu.fr

traditional philosophical aspects of the idea of causality (that one of “efficient cause”), physical causality breaks with the metaphysical meaning that was previously attached to it. Rather more than in the Newton's *Principia*, as it is usually thought, it is in the re-elaboration made by d'Alembert, in his *Treatise of dynamics*, of the *laws* of motion considered as *principles*, and expressed by differential calculus, that the idea of physical causality is explicitly considered indissociably of its effect, that is the *change of motion*. The respective thoughts of Newton and d'Alembert on the notions of *cause* and *force* are, in this respect, in opposition with regard to the properly physical nature of this change. The change of motion was viewed by d'Alembert as immanent to motion, for its *cause* could be circumscribed by its effect, whereas it remained mathematical and metaphysical in the newtonian conception of the *external force* taken as a mathematical substitute of the cause, which was the common way to consider forces before Lagrange's analytical mechanics. It is the physical conception inherited from d'Alembert that was then after to prevail through lagrangean analytical mechanics that permitted to re-integrate physically and rationally the concept of force in its eulerian differential transcription. Further avatars of the notion of causality, that include relativist causality and the developments on determinism, are dealt with in a separate work.

MOTS-CLES : Accélération, Action, d'Alembert, Analyse, , Calcul différentiel et intégral, Causalité, Causalité physique, Cause efficiente, Descartes, Déterminisme, Dynamique, Epistémologie, Galilée, Histoire de la dynamique, Histoire des sciences, Kant, Lagrange, Légalité, Matématisation de la physique, Mécanique, Nécessité, Newton, Raison, Temps.

PALAVRAS-CHAVES : Aceleração, Ação, d'Alembert, Analyse, Calculo diferencial e integral, Causalidade, Causalidade física, Causa eficiente, Descartes, Determinismo, Dinâmica, Epistemologia, Galileo, História da dinâmica, História da ciência, Kant, Lagrange, Legalidade, Matematização da física, Mecânica, Necessidade, Newton, Razão, Tempo.

KEY-WORDS : Acceleration, Action, d'Alembert, Analysis, Differential and integral calculus, Causality, Physical causality, (Efficient) Cause, Descartes, Determinism, Dynamics, Epistemology, Galileo, History of dynamics, History of sciences, Kant, Lagrange, Legality, Mathematization of physics, Mechanics, Necessity, Newton, Reason, Time.

PLAN

1. Introduction. Entre philosophie et physique.
 2. Questions de définitions. Légalité et causalité.
 3. La causalité du point de vue philosophique : antériorité et temporalité.
 4. La causalité différentielle de la mécanique classique et le temps instantané et continu.
 5. Perspectives sur la causalité en physique.
- Références bibliographiques.

1. INTRODUCTION. ENTRE PHILOSOPHIE ET PHYSIQUE.

Les notions de *causalité* et de *déterminisme* ont été tellement liées à la formation et à l'affirmation de la science moderne, et avant tout de la physique, qu'elles ont été et sont encore fréquemment considérées comme indissociables de l'idée même de science. Pourtant ces notions générales, ces *méta-concepts* ou *catégories*, ont une histoire plus tumultueuse et leur lien à la science, et particulièrement à la physique, est bien plus complexe que l'implication biunivoque qui leur est souvent attribuée. Devenues « notions communes », la signification dont on les affecte est souvent indécise et oscille entre le flou des généralités et la précision d'attributions dont la rigueur n'est pas forcément assurée. Ces notions sont venues se rattacher à la physique, en s'étendant

éventuellement par la suite à d'autres domaines des sciences, dans des moments et des circonstances qu'il est utile de retracer. Leur signification précise est directement fonction des élaborations de la physique dans les stades correspondants, ce qui indique déjà qu'elles pourront comporter des limites de validité et connaître des transformations radicales.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une réflexion et d'une analyse épistémologique et historique sur la causalité et le déterminisme en physique, considérés dans la succession de trois étapes, la constitution de la mécanique et de la physique classique, celle de la physique relativiste, et enfin celle de la physique quantique. Notre projet serait d'éclairer de quelle manière la physique a fait appel à ces notions, les a définies et transformées dans le champ de ses concepts, et leurs aventures et tribulations qui s'ensuivirent. Ces tribulations sont d'abord celles de la constitution, à deux moments différents pour chacune, de ces notions, la *causalité physique* avec la mécanique classique et analytique, le *déterminisme* avec l'astronomie théorique et la théorie des probabilités.

Si l'idée de causalité est ancienne, ce n'est qu'avec la physique au sens moderne, et la physique mathématisée, que s'affirme l'idée d'une causalité physique, dans le sens très précis d'une *causalité temporelle différentielle*, d'abord effective dans la mécanique classique, non pas tant newtonienne que post-newtonienne. Il y fallait, en effet, la transcription exacte et argumentée d'une cause physique du mouvement, et de son changement, en équation entre les grandeurs qui le décrivent. La conceptualisation explicite du temps instantané et continu de la dynamique comme grandeur, et la formulation du problème par l'analyse (ou calcul différentiel et intégral), y étaient indispensables. Mais c'est seulement par la suite que le terme de *causalité physique* fut utilisé pour exprimer la signification de cette relation entre les changements instantanés de grandeurs qu'est l'équation d'un mouvement (équation dite de Newton, équations de Lagrange de la mécanique) ou celle d'une évolution ou changement d'état (comme le système des équations de Maxwell, qui expriment les variations mutuelles et en fonction du temps d'un champ électrique et d'un champ magnétique).

C'est à la question de la causalité physique considérée dans sa genèse que nous nous attacherons ici, laissant pour un autre travail les modifications qu'ont apporté à la causalité tant la relativité que la physique quantique, ainsi que les questions de déterminisme (avec la prise en compte des conditions initiales) et de complétude théorique (formulée à propos de la théorie de la relativité générale et de la physique quantique) qui lui sont liées¹.

2. QUESTIONS DE DEFINITIONS. LEGALITE ET CAUSALITE.

¹ Par « complétude théorique » nous entendons, avec Einstein, la fermeture relative d'un système théorique, dont la loi de causalité représente un premier état, et dont se rapprocherait une théorie du genre de la Relativité générale, mais dont les paramètres seraient fixés par la théorie elle-même. Voir Michel Paty, « La notion de déterminisme en physique et ses limites » (Paty [2003]), et « Sur la notion de complétude d'une théorie physique » (Paty [1988]).

Le mot « cause », sur lequel est formé « causalité », est un terme d'origine juridique, tout comme le mot « loi », qui a donné « légalité », tous les deux étant associés à l'idée de connaissance scientifique (mais le second remonte seulement au Moyen-âge chrétien, et à l'idée de loi divine et naturelle²). Le latin « cavere », qui a donné cause, signifiait « la cause de quelqu'un ». Ce sens est hérité du grec, « αἰτία » (*aitia*)³. On sait qu'Aristote distinguait les quatre causes : formelle, matérielle, efficiente, finale⁴, reprises par la pensée scolastique qui en ajouta d'autres (*cause première*, celle qui n'a elle-même pas de cause, etc.) : Francis Bacon emploie encore, au début du XVII^e siècle, la *cause formelle*, qui tombe ensuite en désuétude. *Cause finale* perdure jusqu'au XVIII^e siècle pour la physique, voire plus tard pour d'autres disciplines : on la trouve notamment dans la formulation du *principe de moindre action* de Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, mais subsumée par une relation mathématique fonctionnelle, et c'est cette dernière seule qui restera dans son expression par William Rowland Hamilton au XIX^e.

Il faut à cet égard mentionner les remarques significatives faites par Jean le Rond d'Alembert dans les articles « Action » et « Cause (finale) » de l'*Encyclopédie*, qui expriment l'autonomie d'une loi générale comme le principe de moindre action par rapport à des considérations métaphysiques telles que les causes finales. « M. de Maupertuis », écrit d'Alembert à l'article « Action », « a découvert cette loi générale, que dans les changemens qui se font dans l'état d'un corps, la quantité d'action nécessaire pour produire ce changement, est la moindre qu'il est possible. Il a appliqué heureusement ce principe à la recherche des lois de la réfraction, des lois du choc, des lois de l'équilibre, etc. ». Il ajoute un peu plus loin : « Quelque parti qu'on prenne sur la Métaphysique qui lui sert de base, ainsi que sur la notion que M. de Maupertuis a donnée de la quantité d'action, il n'en sera pas moins vrai que le produit de l'espace par la vitesse est un *minimum* dans les lois les plus générales de la nature. Cette vérité géométrique due à M. de Maupertuis, subsistera toujours ; et on pourra, si l'on veut, ne prendre le mot de *quantité d'action*, que pour une manière abrégée d'exprimer le produit de l'espace par la vitesse »⁵.

En somme, si l'on tient à parler de « cause finale », comme d'Alembert le souligne dans l'article ayant ce titre, ce ne sera jamais qu'*a posteriori*, une fois les lois de la mécanique établies, et non l'inverse. Ou, en ses propres termes : « Mais s'il est dangereux de se servir des *causes finales a priori* pour trouver les lois des phénomènes, il peut être utile, et il est au moins curieux de faire voir comment le principe des *causes finales* s'accorde avec les lois des phénomènes, pourvu qu'on ait commencé par déterminer ces lois d'après des principes de mécanique clairs et incontestables. C'est ce que M. de Maupertuis s'est proposé de faire à l'égard de la réfraction en particulier, dans un mémoire

² Voir, sur l'idée de *loi* en science, l'analyse comparative proposée par Joseph Needham entre la science du Moyen âge en Europe occidentale et en Chine : Joseph Needham, *La science chinoise et l'Occident (Le Grand Titrage)* (Needham [1969]).

³ André Lalande, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie* (Lalande [1926]1980).

⁴ Aristote, *La Métaphysique*, nouvelle édition, entièrement refondue, traduction et commentaire par J. Tricot, Paris, 2 vols., 1962 (I, 3, 983a).

⁵ Jean le Rond d'Alembert, Article « Action », *Encyclopédie* (D'Alembert [1751b]).

imprimé parmi ceux de l'Académie des Sciences, 1744 »⁶. *Exit*, donc la « cause finale », sinon comme une façon de parler, pour exprimer une loi synthétique de la nature comme un principe de minimum pour des grandeurs exactement définies.

Quant à la *cause efficiente*, c'est elle qui subsiste finalement dans la terminologie moderne⁷, en prenant le sens de *cause physique*, liée au changement de mouvement, et c'est ce sens que nous retrouverons avec ce que l'on a appelé la « loi de causalité newtonienne » dont l'exacte formulation est en fait, comme on le verra, postérieure à Newton.

Mais, avant les causes, qui sont particulières, on doit considérer la *causalité*, comme l'un des principes rationnels de la pensée, énonçant le rapport entre un phénomène et une cause, et d'abord que tout phénomène a une cause⁸. Cause revêt ici le sens général de *raison*, et la causalité correspond à la fois à la pensée d'une *nécessité* de la nature et à l'idée que la pensée rationnelle peut en rendre compte, notamment en science, à l'aide de *lois*. On est ainsi tenté de proposer que l'idée de causalité se tient entre l'idée de *légalité* et celle de *nécessité* à laquelle la première renvoie. Toutefois, l'idée de nécessité est surtout prise en considération, dans la pensée classique, par opposition à celle de contingence, comme dans la célèbre question, mise au concours par l'Académie de Berlin, au XVIII^e siècle, de savoir « si les lois de la nature sont de vérité nécessaire ou contingente ». Dans ce contexte, la nécessité s'identifie au rationnel, et la contingence à l'empirique (ou au hasard), et la question déborde celles de la légalité et de la causalité, qui ont à voir dans les deux cas. Une certaine idée de la nécessité transparait toutefois sous l'appel des deux, mais sans être explicitée, comme nous allons le voir, notamment dans l'une des deux acceptions de la causalité dans sa définition philosophique en rapport à la physique (celle de l'antériorité logique). Elle resurgira plus tard avec force à propos de la « force contraignante des phénomènes »⁹ de la nature, qui obligent la pensée physique à admettre la règle de principes et de lois en dépit des difficultés rencontrées par des notions comme celles de causalité et de déterminisme. Mais ce sera dans un contexte différent de celui de la période classique, à laquelle nous nous en tenons pour l'instant¹⁰.

Il nous faut dire ici quelques mots des notions de *loi* et de *légalité* qui, comme on vient de le voir, sont au moins implicites dans la considération de la cause et de la causalité. La physique, dans son acception classique de « philosophie naturelle » (terme encore utilisé par Bacon, Galilée et Descartes, ainsi que par Newton et ses successeurs britanniques jusqu'à nos jours)¹¹,

⁶ J. d'Alembert, Article « Cause (finale) », *Encyclopédie* (D'Alembert [1752]).

⁷ Malebranche, dans ses *Entretiens métaphysiques* (Malebranche [1688], 7, 159, 162), parle de cause *efficiente* ou *efficace* comme action exercée par quelque chose sur quelque chose, c'est-à-dire une action physique effective. D'Alembert, dont nous reparlerons plus loin, reçut une éducation de maîtres malebranchistes.

⁸ André Lalande, *Vocabulaire...*, *op. cit.* (Lalande [1926]1980, « Causalité »).

⁹ L'expression est employée notamment à propos de la physique quantique, aussi bien par Albert Einstein que par Niels Bohr.

¹⁰ M. Paty, « La notion de déterminisme en physique et ses limites », *op. cit.*

¹¹ Ce sens classique de la « philosophie naturelle », qui se rattache à la définition traditionnelle de la philosophie comme science, est équivalent de « physique » dans le sens général (« physis », la

s'identifiait à la connaissance des lois de la nature, exprimant des régularités et des relations de causalité. Mais ces lois et ces relations revêtirent un sens précis et « scientifique » surtout à partir du XVII^e siècle, en particulier avec l'établissement de la première loi dynamique du mouvement local, celle de la chute des corps par Galilée, et avec la formulation de lois du mouvement, tant générales que particulières.

Précisons, sur le premier aspect, qu'il est à nos yeux légitime de qualifier la loi galiléenne de « loi dynamique », bien qu'elle n'exprime qu'une relation entre l'espace parcouru et le temps correspondant, sans s'interroger sur les raisons d'une telle relation. Il est clair que parler à son propos de « loi cinématique » ne serait pas satisfaisant, étant donné que cette loi est grosse d'une dynamique. Ces questions de terminologie ne se posent, il est vrai, que rétrospectivement, puisque c'est à partir du XVIII^e siècle qu'il est devenu usuel de qualifier de « dynamique » ce qui a trait non seulement aux forces de manière explicite, mais aussi aux changements de mouvement d'une manière générale (nous verrons plus loin les considérations de d'Alembert sur ce point dans son *Traité de dynamique*)¹². Or la loi de la chute des corps traite assurément de changement du mouvement (augmentation uniforme de la vitesse) occasionné par la pesanteur ou gravité à une hauteur donnée. Il est important, pour mettre en lumière toute la signification de la causalité physique telle qu'elle sera formulée plus tard, de rapporter la loi de Galilée à la *dynamique*, étant donné le rôle central qu'y joue le *temps* comme variable et l'*accélération* (constante à hauteur donnée) comme état de la dynamique particulière de la gravité.

Quant au second aspect, sur les lois du mouvement, Descartes est crédité, à juste titre, d'avoir été l'un des premiers à en affirmer la nécessité¹³. Sa conception de la *mathesis universalis*, c'est-à-dire d'une connaissance intelligible qui soit aussi assurée et universelle que celle des mathématiques, concernait en particulier la physique (et aussi la métaphysique). L'intelligibilité de la physique impliquait à ses yeux la nécessité de lois, sans qu'il fût pour autant en mesure d'en donner une formulation mathématique précise, sinon dans certains cas, comme la loi des sinus dans la réfraction de la lumière (dans la *Dioptrique*), la loi de l'inertie pour le mouvement des corps et pour la lumière, ou encore la loi de conservation du mouvement. Bien que Descartes se soit trompé sur la forme exacte de cette dernière et sur les lois des chocs (corrigées par son disciple Christiaan Huygens), l'important, ici, est la direction prise par la pensée des sciences en général et de la physique (au sens restrictif) en particulier. La spécification de cette dernière parmi les sciences de la nature s'accompagne de sa mathématisation, entreprise dès le XVII^e siècle avec les lois du mouvement, et accomplie au XIX^e, avec celles des divers domaines de la physique et leur rassemblement en un même corpus théorique.

nature). La « philosophie de la nature » (« *Naturphilosophie* ») des philosophes allemands du XIX^e siècle recouvre un sens très différent.

¹² Voir le texte à hauteur de la note 31 et cette note elle-même.

¹³ René Descartes, *Discours de la méthode* (Descartes [1637]), et *Principes de la philosophie* (Descartes [1644]). Voir Alexandre Koyré, *Etudes newtoniennes* (Koyré [1968]), chapitre 4, « Newton et Descartes ». D'Alembert le lui reconnaissait aussi, tout en le critiquant : « S'il s'est trompé sur [les lois du mouvement], il a du moins deviné le premier qu'il devait y en avoir », écrivait-il dans le *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* (d'Alembert [1751a]).

Outre la nécessité de lois, Descartes avait donné l'une des clés qui devaient permettre de les formuler quantitativement : comme le rappelle d'Alembert au XVIII^e siècle, l'« application de l'algèbre à la géométrie » (la géométrie algébrique), inventée par Descartes, entraînait l'application de l'algèbre (et plus tard de l'analyse différentielle), *dans toutes les « sciences physico-mathématiques »*. Descartes en avait d'ailleurs indiqué par avance les raisons profondes, quand il donnait, dans ses *Règles pour la direction de l'esprit*, l'exposé de sa conception des grandeurs continues, tant en géométrie et en mathématiques que pour toute entité pouvant être envisagée selon « l'ordre et la mesure »¹⁴.

En fin de compte, la loi, en physique, rend compte d'une régularité entre des grandeurs, exprimée par une équation. La loi de Galilée de la chute des corps comprend le *temps* comme variable. La « seconde loi de Newton » exprime la relation générale, dans la transmission ou le changement du mouvement d'un corps, entre le changement de la quantité de mouvement, la force appliquée, et la masse, première forme de ce qui serait appelé par la suite « loi de causalité », dans son expression en termes de quantités différentielles. Cette loi obéit à la relativité du mouvement galiléenne, et ce serait un trait général des lois physiques du mouvement jusqu'à la relativité restreinte : condition générale, « loi universelle de la nature », qui serait remplacée ultérieurement par des invariances relativistes plus fortes (celles des théories de la relativité restreinte et générale). Cette loi plus générale que les lois particulières tient précisément à ce que les lois du mouvement sont exprimées par des équations différentielles du second ordre entre les grandeurs continues¹⁵.

D'une manière générale, les lois physiques expriment les changements mutuels de telles grandeurs en relation. Ces changements sont exprimés le plus souvent en fonction du temps comme variable principale : le rôle privilégié du temps dans la loi dynamique, visible chez Galilée et chez Newton, n'est cependant pas exclusif, et l'on constate à partir du XVIII^e siècle la généralisation des équations à des fonctions d'autres variables et à des dérivées partielles, comme dans la physique des milieux continus et, au-delà de la mécanique, dans la physique des champs, telles les équations de Maxwell du champ électromagnétique.

Pour nous en tenir à la situation quant au statut des lois et de la causalité vers le moment où cette dernière allait prendre en physique un sens précis, on notera que l'énoncé de lois quantitatives était alors essentiellement descriptif quant aux relations des grandeurs caractérisant les phénomènes considérés, et portait sur des propriétés globales ou « intégrales », comme les lois de Képler du mouvement des planètes, ou la loi de Galilée de la chute des corps. Elles décrivaient les mouvements finis ou moyens, sans en donner les « raisons » et exprimer, par exemple, la naissance ou l'extinction, ou la modification d'un

¹⁴ « Mesure » étant à entendre au sens de proportions : R. Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit* (Descartes [1628]), notamment la règle 14. Voir M. Paty, « La notion de grandeur... » (Paty [2001]) et « Mathesis universalis et intelligibilité chez Descartes » (Paty [1997b]).

¹⁵ Cependant, la relativité du mouvement ne pouvait avoir un statut théorique fondamental à cause du rôle central joué dans la pensée de la physique classique par les concepts d'espace absolu de la mécanique et d'éther au repos absolu de l'optique et de l'électromagnétisme, jusqu'à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Voir M. Paty, « Les trois stades du principe de relativité » (Paty [1999a]).

mouvement, par des considérations *locales*, en un point de l'espace et à un instant donné. Pour la loi de Galilée de la chute des corps, comme d'ailleurs pour les lois de Képler du mouvement des planètes, le mouvement était donné, et il ne fallait qu'en trouver les lois, d'une manière *globale*¹⁶. La loi de Galilée exprimait la distance parcourue en fonction du temps sous l'action de la pesanteur, qui correspondait à un accroissement de la vitesse, ou accélération, uniforme g ($v = gt$, $x = 1/2 gt^2$). Mais qu'est-ce qui faisait qu'il y avait du mouvement, ou que du mouvement se modifiait en conformité avec ces lois ?

Pour répondre à ces questions, il fallait pouvoir faire appel à une idée précise de la *cause* de ce mouvement. La formulation du principe d'inertie (par Galilée, Descartes, Gassendi¹⁷) entraînait à considérer le changement de mouvement, l'accélération, que Galilée trouvait uniforme pour la pesanteur. Mais ce n'était qu'une constatation : qu'est-ce qui faisait que l'accélération est uniforme (et indépendante des corps) ? La découverte opératoire et mathématique de la loi de l'attraction gravitationnelle par Newton ne constituerait une réponse véritablement intelligible que moyennant une réflexion nouvelle sur la signification physique de la causalité : cette réflexion serait *philosophique*, sur la causalité comme catégorie de pensée, mais aussi *conceptuelle et critique*, en dégagant et en explicitant la notion de *cause physique*, et en la rendant effective dans la formulation théorique par son lien direct à la mise en équations.

3. LA CAUSALITE DU POINT DE VUE *PHILOSOPHIQUE* : ANTERIORITE ET TEMPORALITE.

Considérons donc en premier lieu la notion de cause telle qu'elle était envisagée du point de vue philosophique. Pour les penseurs de la rationalité classique, Descartes, Spinoza et Leibniz, la notion de cause comporte l'idée d'*antériorité logique*, qui permet d'affirmer une proposition. Elle correspond à l'idée même de *raison*, directement rattachée à l'*intelligibilité* : « *causa sive ratio* », « cause, c'est-à-dire raison », selon l'expression de Spinoza dans l'*Ethique*. Et Leibniz, dans la *Théodicée* : « Rien n'arrive sans qu'il y ait une *cause* ou du moins une *raison* déterminante, c'est-à-dire quelque chose qui puisse servir à rendre raison *a priori* pourquoi cela est existant plutôt que non existant et pourquoi cela est ainsi plutôt que de toute autre façon »¹⁸. Cette raison comporte un aspect réel, tenant à la nature, comme cela est explicite chez Leibniz : « *Nihil aliud enim causa est, quam realis ratio* », « car il n'y a rien d'autre en fait de cause, sinon la raison réelle ». Nous passerons directement de là à Hume et surtout à Kant, bien que la notion de causalité soit présente et discutée philosophiquement par d'autres auteurs tels, notamment, que Locke et d'Alembert. Mais, comme

¹⁶ Voir à ce sujet les remarques d'Albert Einstein dans son article sur « La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique » (Einstein [1927]), et notre étude « Einstein et la pensée de Newton » (Paty [1987a]).

¹⁷ Voir A. Koyré, *Etudes galiléennes* (Koyré [1939]).

¹⁸ Respectivement : Descartes, *Méditations* (Descartes [1641]), Réponses aux secondes objections, axiome 1 ; Spinoza, *Ethique* (Spinoza [1675]), I, Axiomes, 3 ; Leibniz, *Théodicée* (Leibniz [1710]), § 44 ; Leibniz, *Inédits* (Leibniz [1903]), éd. Couturat, p. 471.

nous le verrons pour le second, elle a partie liée à l'implication directe de la causalité dans la pensée physique, et à la constitution de l'idée de *causalité physique* dans un sens très précis exprimé par une relation mathématique. Nous y reviendrons donc aussitôt après.

Dans sa critique de la causalité rationnelle, David Hume exprime l'idée que ce que nous attribuons à des causes nous est donné en fait par l'habitude¹⁹. Si le scepticisme humien porte sur les formes de la raison, il ne met nulle part en doute la nécessité de la nature et la réalité du monde extérieur : il est dirigé vers les représentations que l'on en donne sans s'interroger sur leur origine. La critique humienne de l'induction, en libérant la relation entre les phénomènes de la nature et les concepts, aurait à terme une riche postérité, d'Ernst Mach qu'elle aida à penser la relativité des concepts et leurs transformations, à Henri Poincaré, Pierre Duhem, Albert Einstein, qu'elle inspira dans l'idée de *convention* ou de *libre choix logique* des concepts, et encore à Karl Popper qui se fonda sur elle pour récuser les critères positifs de scientificité et retenir seulement celui, négatif, de la « falsifiabilité »²⁰. Les uns et les autres garderaient à l'égard de la causalité, et surtout du déterminisme ultérieur, une liberté d'esprit à laquelle la critique humienne ne fut sans doute pas étrangère. Mais le message de Hume avait atteint, avant eux, Emmanuel Kant qui, libéré grâce à lui du « sommeil dogmatique », rechercha comment tenir compte de cette leçon en dépassant le scepticisme et l'empirisme, et retrouver une rationalité qui garantisse la science. Pour tous ces auteurs, y compris Kant, on doit ajouter à la critique humienne de la causalité en général la formulation, positive et rationnelle, de Newton à d'Alembert (ce dernier, contemporain et ami de Hume), d'une causalité physique de sens plus limité mais en même temps plus précis, dont nous parlerons plus loin.

Pour Kant, le principe de causalité fait partie de ce qu'il appelle les « analogies de l'expérience », qui sont traitées dans l'« Analytique transcendantale » de la *Critique de la raison pure*²¹. On en trouve deux formulations différentes, respectivement dans les deux éditions de l'ouvrage. La première, dans l'édition de 1781, est proche de la conception de la raison ou antériorité logique de Descartes et de Leibniz, mais exprimée dans les termes de la philosophie transcendantale. On lit, en effet : « Principe de la production : tout ce qui arrive (ou commence à être) suppose avant lui quelque chose dont il résulte suivant une règle ». La seconde, dans l'édition de 1787, est plus newtonienne, du moins en ceci qu'elle fait intervenir la temporalité et fait songer à la loi fondamentale de la dynamique de Newton (deuxième loi de Newton) : « Principe de la succession dans le temps suivant la loi de causalité : tous les changements se

¹⁹ David Hume, *Philosophical essays concerning human understanding* (Hume [1748]).

²⁰ Ernst Mach, *La mécanique* (Mach [1883]) ; Henri Poincaré, *La science et l'hypothèse* (Poincaré [1902]) ; Pierre Duhem, *La théorie physique* (Duhem [1906]) ; Karl Popper, *La logique de la découverte scientifique* (Popper [1935]). Voir M. Paty, « Mach et Duhem : l'épistémologie de savants-philosophes » (Paty [1986]) ; *Einstein philosophe* (Paty [1993]), p. 243-246, 335, 368-373, 418-419. Le critère poppérien de *réfutabilité* ou *falsifiabilité* est *négatif* dans le même sens où l'on parle de *théologie négative* : une théorie ne peut être affirmée comme vraie, elle ne peut être que réfutée (ou non).

²¹ Immanuel Kant, *Critique de la raison pure* (Kant [1781]1786), livre 2, chap. 2. Voir Jules Vuillemin, *Physique et métaphysique kantienne* (Vuillemin [1955]).

produisent suivant la loi de la liaison de la cause et l'effet ». Toutefois ce ne fut pas Newton, mais ses successeurs en mécanique rationnelle, Euler et d'Alembert, plus tard Lagrange, qui exprimèrent de manière explicite la dépendance de la dynamique par rapport à la grandeur temps (nous y reviendrons plus loin) : la formulation de Kant en retient l'implication philosophique transcendante.

Si l'on se reporte à la « table des catégories » de Kant, on y trouve les trois catégories de la relation, qui sont : l'« inhérence » ou la « substance » (à savoir, ce qui se conserve), la « causalité » et la « dépendance », la « communauté » ou « action réciproque ». Leur relation à l'expérience est donnée par l'analyse des « analogies de l'expérience », *analogie* étant à entendre dans le sens classique et étymologique de *rapport*. Elles sont reprises dans les « principes de la mécanique » énoncés par Kant dans les *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature* ²², à partir des lois de la mécanique de Newton. Elles s'en distinguent toutefois en étant portées au niveau du transcendantal, érigées en principes de l'entendement : leur rôle étant précisément, à ce niveau, de rendre possibles les énoncés des lois et des principes de la mécanique.

La *première analogie de l'expérience* exprime la conservation de la substance, et correspond, dans les *Premiers principes métaphysiques*, au principe de conservation de la masse. Elle rejoint, en amont de Kant, l'idée de permanence de l'être dans le temps, qu'on trouve chez divers auteurs, par exemple Descartes aussi bien que Locke ; et, en aval, celle de conservation, comme l'exprimera notamment Hermann von Helmholtz (en se référant d'ailleurs à Kant) dans son ouvrage sur la conservation de l'énergie, de 1847²³. Les deux autres analogies sont parallèles aux lois du mouvement de Newton. La *deuxième analogie* est précisément le *principe de causalité*, qui subsume la loi dite plus tard « de la causalité newtonienne » dont nous reparlerons plus loin, ou plus exactement les deux premières lois de Newton prises ensemble, la « loi de la force d'inertie » qui conserve le mouvement, et celle du changement de mouvement proprement dit (la première est un cas particulier de la seconde, pour un changement de mouvement nul).

Kant exprime donc la causalité comme étant, d'une part, l'union des choses qui se suivent ou qui sont reliées, cette union étant une condition posée par l'entendement (c'est la causalité suivant l'*ordre du temps*) ; et, d'autre part, la succession temporelle, qui vient après la relation, dont elle dépend (c'est la causalité suivant le *cours du temps*) ²⁴. Si, selon l'expression de Kant, « ce qui suit ou arrive doit suivre d'après une règle générale ce qui était contenu dans l'état précédent », il y a aussi une simultanéité dans la relation entre la cause et l'effet : « Dans le moment où l'effet commence à se produire, il est toujours simultané avec la causalité de la cause » ²⁵. Gardons ces remarques à l'esprit, car nous verrons plus loin, avec l'explicitation de la causalité physique par d'Alembert (effectuée dans son *Traité de dynamique* de 1743, qui ne peut pas avoir été ignoré

²² Kant, *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature* (Kant [1796]).

²³ Hermann von Helmholtz, *Über die Erhaltung der Kraft* (Helmholtz [1847]).

²⁴ Pour une analyse de la distinction kantienne entre l'*ordre* (*Ordnung*) et le *cours* (*Ablauf*) du temps, voir : Claude Debru, « Causalité, temporalité, fonction. Kant, Helmholtz, Mach » (Debru [2003]).

²⁵ Kant, *Critique de la raison pure* (Kant [1781]1787, PUF, 1980, p. 936.

de Kant), une formulation très voisine sur la simultanéité dans la relation de la cause et de l'effet au moment de sa réalisation. La distinction de Kant entre l'ordre et le cours du temps semble faite sur mesure pour rendre compte de ce que l'idée de cause comme relation de raison fut déterminante pour l'expression de la causalité dans la succession temporelle ; en même temps, la première garde le pas sur la deuxième en tant que condition de possibilité (elle relève de l'entendement, tandis l'autre, qui en constitue le critère empirique, se rattacherait plutôt à la sensibilité).

La causalité physique temporelle, comme nous allons le voir, n'a pu être posée avec clarté et efficacité que grâce à la pensée du calcul différentiel : seul ce dernier, avec une signification positive des éléments différentiels leibniziens (telle que d'Alembert la formula, en la fondant sur la notion de limite), permettait de concilier la simultanéité qu'implique l'idée d'ordre avec la succession dans le temps : nous soulignerons le rôle central joué à cet égard par la grandeur différentielle de temps, *dt*. La formulation même de Kant semble indiquer ce rôle de la pensée des grandeurs infinitésimales (différentielles leibniziennes algébriques exprimant des fluxions newtoniennes, pensées selon le mouvement) dans la définition de la causalité temporelle, de la même façon qu'il le fait ailleurs dans sa conception des grandeurs intensives²⁶. Entre l'ordre du temps et son cours, écrit-il, « le rapport demeure même s'il ne s'est pas écoulé de temps. Le temps entre la causalité de la cause et son effet immédiat peut aller *s'évanouissant*, et la cause et l'effet être, par conséquent, simultanés, mais le rapport de l'une à l'autre demeure cependant toujours déterminable dans le temps »²⁷.

Il est intéressant, par ailleurs, de trouver chez Descartes une formulation qui reflète, bien avant la distinction kantienne et avant même l'invention du calcul infinitésimal de Newton et Leibniz, cette double exigence. Descartes indique, dans une lettre à Mersenne, à propos du mouvement de la lumière, tout en énonçant l'équivalence de tous les instants (c'est-à-dire l'homogénéité du temps), qu'il n'y a pas de « priorité du temps », l'entendant en ce sens que toutes les parties de la lumière à tous les instants successifs de son parcours sont dépendantes des précédentes, et cette dépendance est la même d'un instant à un autre (ce qui, dans notre compréhension actuelle, paraît une sorte de préfiguration de l'expression différentielle de la continuité du mouvement)²⁸. Autrement dit, la simultanéité de l'instantané est, en quelque sorte, une succession virtuelle, compressée, qui exprime une relation d'ordre. On trouve aussi chez Descartes l'idée, liée à cette conception du temps, que tout ce qui est requis pour produire le mouvement « se trouve dans les corps en chaque instant qui puisse être

²⁶ Kant, *Critique de la raison pure* (Kant [1781]1787 ; voir M. Paty, « La notion de grandeur... » (Paty [2001]).

²⁷ Kant, *Critique de la raison pure* (Kant [1781]1787), PUF, 1963, p. 936 (souligné par moi, M.P.).

²⁸ « *Le mot d'instant n'exclut que la priorité du temps*, et n'empêche pas que chacune des parties inférieures du rayon [provenant du Soleil] ne soit dépendante de toutes les supérieures, en même façon que la fin d'un mouvement successif dépend de toutes ses parties précédentes » (Descartes, Lettre à Mersenne, 27 mai 1638, in (Descartes [AT]), vol. 2, p. 143) (souligné par moi, M. P.).

déterminé pendant qu'ils se meuvent »²⁹. Il faut donc l'instant et le mouvement : les corps ont, à chaque instant, une tendance au mouvement, qui est le « *conatus* » ou inclination instantanée, que le corps suivrait s'il n'en était empêché³⁰. On ne peut se retenir de penser que la conception cartésienne du temps physique correspond à une intuition profonde, mais qui n'avait pas à sa disposition l'outil conceptuel et mathématique permettant de la réaliser, en dépassant la contradiction apparente de concevoir le mouvement comme étant en même temps soumis à une propagation réglée et instantané. Cette intuition, c'était, pour ainsi dire, celle de l'instant (sans durée) différé...

Une leçon à tirer de cette double lecture, philosophique-transcendantale (kantienne) et physico-mathématique (cartésienne) du rapport ordre-succession tel qu'il se manifeste dans la causalité, pourrait être l'idée d'une similitude structurelle entre la pensée rationnelle en général et la pensée mathématique. En outre, l'idée de relation est ici fondamentale : c'est elle qui justifie la définition et l'usage des *grandeurs* d'expression mathématique, placées sous la juridiction de principes physiques qui les légitiment. Or, *relation* annonce *fonction*, et l'on peut déjà entrevoir que l'idée de la causalité puisse être subsumée sous la mise en relation fonctionnelle de grandeurs comme ayant valeur explicative.

4. LA CAUSALITE DIFFERENTIELLE DE LA MECANIQUE CLASSIQUE ET LE TEMPS INSTANTANE ET CONTINU.

Après la réflexion philosophique sur la causalité, venons-en à la constitution de la *causalité physique*, qui se fit en relation directe avec l'élaboration d'une théorie physique mathématisée (la mécanique comme science du mouvement des corps), où l'analyse au sens du calcul différentiel et intégral joua un rôle fondamental.

On doit d'abord souligner l'importance, dans cette constitution, du concept de *temps*, autour duquel fut élaborée la nouvelle science de la *dynamique*, dont le sens fut, dès le début, à la fois celui de science du *changement de mouvement* des corps, et celui de science des puissances (ou forces) qui sont la *cause de ce changement*³¹. C'est, en fait, le concept de *temps instantané* qui serait décisif (sous les noms d'*instant*, ou de *moment*). L'expression de la loi du mouvement en fonction du temps est une découverte qui revient à Galilée, à

²⁹ Descartes, *Principia* (Descartes [1644]), vol. 2, p. 39.

³⁰ Descartes, *Méditations*, Seconde réponses, dans les « Axiomes ou notions communes », in (Descartes [1741]), vol. 7, p. 165 (trad. fr., vol. 9, p. 127).

³¹ *Dynamique* s'oppose, chez Galilée, à *statique*. Le terme s'imposa dans le double sens que nous indiquons sans doute à partir de Leibniz (*Specimen dynamicum*), de ses disciples bâlois les frères Jean et Jacques Bernoulli ainsi que Pierre Varignon, puis Leonhard Euler et Jean d'Alembert (ce dernier était l'élève spirituel de Jean Bernoulli, mais aussi de Varignon, qui laissa une tradition au Collège des Quatre Nations où d'Alembert fut éduqué). D'Alembert précise, dans son *Traité de dynamique*, qu'il emploie le mot dans le sens de « science du mouvement des corps qui agissent les uns sur les autres d'une manière quelconque » (D'Alembert [1743]). Le principe de la dynamique de d'Alembert fournit le moyen de répondre à ce programme : voir p. ex., M. Paty, « D'Alembert, la science newtonienne et l'héritage cartésien » (Paty [2001]).

propos de la chute des corps : on lui doit l'introduction du temps comme paramètre variable de la dynamique. Il fut obligé, sans l'avoir posé au départ, d'admettre que la loi des espaces parcourus doit être exprimée en fonction du temps (ils sont comme les carrés des temps)³². Mais Galilée lui-même ne considérait pas le temps comme instant, sinon de manière toute verbale, et se préoccupait de vitesses moyennes dans des intervalles finis de temps. L'idée d'*instantanéité* est au centre de la pensée du mouvement chez Descartes (et d'abord du mouvement de la lumière), d'ailleurs liée à son idée de l'intelligibilité (elle est illumination immédiate de la raison), bien qu'il ne se soit pas préoccupé d'exprimer les lois du mouvement en fonction du temps : d'ailleurs, sa conception de la causalité échappe au temps³³. Nous avons évoqué plus haut sa remarque sur l'ordre et la succession du temps dans le mouvement de la lumière, riche d'intuition sur la causalité et sur la pensée de l'infinitésimal.

C'est seulement à partir de Newton que les lois de la mécanique font intervenir, de fait, le temps instantané comme variable du mouvement, sans toutefois le conceptualiser encore complètement³⁴. Quant à la notion de cause, ou de causalité, elle est présente dans les *Principia* surtout à travers le concept de *force*, qui reçoit immédiatement une signification mathématique (d'où il tient son pouvoir d'unification), en effaçant la dimension « philosophique » (où métaphysique et physique sont alors mêlées). Cette dernière est abordée rapidement dans les « Règles du raisonnement en philosophie » (entendons « philosophie naturelle ») qui ouvrent le Livre 3 des *Principia*. La règle 1 stipule : « On ne doit pas admettre plus de *causes* des choses naturelles que celles qui à la fois sont vraies et suffisent pour expliquer leur apparence ». Elle est suivie de ce commentaire : « C'est pourquoi les philosophes disent que la Nature ne fait rien en vain (...) ; car la Nature se plaît à la simplicité et n'aime pas la pompe des *causes* superflues ». Et la règle 2 : « C'est pourquoi aux mêmes *effets* naturels on doit, autant que possible, assigner les mêmes *causes*. » La règle suivante explicite les *qualités* des corps qui doivent être considérées pour expliquer leurs *propriétés* (ce sont les *causes sous-jacentes*, en quelque sorte, de ces propriétés) : l'extension (l'étendue), la dureté, l'impénétrabilité, la mobilité, l'inertie, la gravitation. La conclusion est lapidaire : « *Et hoc est fundamentum philosophiae totius* », « et c'est là tout le fondement de la philosophie [de la nature] »³⁵.

Quant aux autres livres des *Principia*, c'est le concept de *force* qui y remplit d'emblée la fonction de la *cause* avec, certes, l'avantage de recouvrir un sens plus précis et quantitatif, donné explicitement (définition 3, complétée par les définitions 4 à 8 du livre I), après les concepts de quantité de matière et de quantité de mouvement. C'est seulement à la fin du *Scholium* de ces définitions que l'on trouve le mot *cause*, à propos de la possibilité de distinguer les

³² Galilée, *Discours sur deux sciences nouvelles* (Galilée [1638]).

³³ Voir Jean Wahl, *Du rôle de l'idée de l'instant dans la philosophie de Descartes* (Wahl [1920]) ; M. Paty, « Mathesis universalis et intelligibilité chez Descartes » (Paty [1996a]).

³⁴ Cf. M. Paty, « Sur l'histoire du problème du temps : le temps physique et les phénomènes » (Paty [1994b]).

³⁵ Isaac Newton, *Naturalis Philosophiae Principia Mathematica* (Newton [1687], 3^e éd., 1724, éd. I.B.Cohen et A. Koyré, 1972, vol. 2, p. 554). Dans ma traduction en français j'ai ajouté le crochet (philosophie [de la nature]) pour une meilleure compréhension.

mouvements absolus par rapport aux mouvements relatifs : « Nous sommes guidés [en ceci] en partie par les mouvements apparents, qui sont les différences des mouvements vrais, en partie par les *forces*, qui sont *les causes et les effets* des mouvements vrais »³⁶. Entendons, par cette symétrie dans l'expression des causes et des effets, que les forces sont cause de mouvements et que les mouvements sont cause d'autres changements de mouvements, autrement dit, de l'apparition d'autres forces. Assurément, pour Newton, les forces sont réelles, mais il ne veut pas se prononcer, comme il l'écrit lui-même, sur leur caractère physique, c'est-à-dire sur les modalités de leur application, métaphysiques ou hypothétiques (en rapport au fameux « *hypotheses non fingo* » opposé à Descartes).

La philosophie néo-platonicienne de Newton se satisfaisait de considérer les « principes mathématiques » et les grandeurs absolues, « vraies et mathématiques », pour atteindre la physique par-delà les apparences. Newton se justifiait de ne pas s'arrêter à la considération de modalités physiques, ou du rapport entre les caractères physiques et la représentation mathématique des mouvements et des actions considérés, en proclamant d'emblée comme « mathématiques » toutes les propositions qui examinent les diverses sortes de mouvements. Par exemple, sur l'action de forces centripètes : « Je vais donc à présent continuer de traiter les mouvements des corps en attraction mutuelle ; considérant les forces centripètes comme des attractions ; bien que peut-être, d'un point de vue *physique* strict, elles puissent être appelées plus exactement impulsions. Mais ces Propositions doivent être considérées comme purement *mathématiques* ; et laissant donc de côté toute considération physique, j'emploie cette manière familière de parler, pour me faire plus facilement comprendre du lecteur mathématicien. » (Cette remarque sur le « point de vue physique strict » peut paraître curieuse : car ce serait retourner aux impulsions cartésiennes. Le raisonnement rappelle ceux de l'astronomie pré-copernicienne, sur les mouvements physiques et mathématiques qui ne coïncidaient pas : il faut sans doute le rapporter à une physique prise dans le sens ancien, qualitatif et pré-galiléen, avant la conception de sa mathématisation, quand régnait l'opposition, discutée par Newton dans la Préface des *Principia*, entre la géométrie et la mécanique).

La seule allusion que Newton fasse à la modalité de la transmission du mouvement se trouve dans l'énoncé de la deuxième « loi ou axiome du mouvement » : « Si une force engendre un mouvement, une force double engendrera un mouvement deux fois plus grand, une force triple un mouvement triple, que cette force soit *appliquée entièrement en une seule fois*, ou *de manière graduelle et successive* »³⁷. La proportionnalité de la force à la quantité de mouvement transmise suffit, quelle que soit la modalité de cette transmission, instantanée et discontinue, ou progressive et continuée. Sous ces deux possibilités se tiennent respectivement les mouvements (« violents ») provoqués par des chocs

³⁶ I. Newton, *Principia*, *op. cit.*, Livre 1 (Newton [1687], 3e éd., 1724, éd. I. B. Cohen et A. Koyré, 1972, vol. 2, p. 54 ; pour l'anglais, cf. éd. Cajori, vol 1, p. 12.

³⁷ I. Newton, *Principia... op. cit.*, (Newton [1687], 3e éd., 1724, éd. I.B. Cohen et A. Koyré, 1972, vol. 1, p. 54), Axioms or laws of motion, law 3 : « Si vis aliqua motum quem vis generet ; dupla duplium, tripla triplum generabit, sive *simul et semel*, sive *gradatim & successive impressa fuerit* » (souligné par moi, M.P.).

ou impulsions, et les mouvements continus, tels ceux des forces centripètes ou de l'attraction à distance, tous unifiés sous la seconde loi, réserve faite de l'imprécision sur la forme de la quantité de mouvement transmise, finie dans le premier cas (Δp), fluxion dans le second (\dot{p} , qui correspondrait, en écriture différentielle, à $\frac{dmv}{dt}$), et de la difficulté corrélative concernant la dimension de l'intervalle infinitésimal de temps. Quoiqu'il en soit, la seconde loi, sur la transmission ou l'acquisition (ou la perte) de mouvement, est conçue en rapport à la notion de temps instantané, qui est introduite implicitement mais effectivement par Newton dans sa méthode des « premières et dernières raisons des grandeurs », ou géométrie dynamique infinitésimale (avec le temps comme variable) par laquelle il traitait le mouvement des corps, notamment célestes.

Parmi les premiers « successeurs continentaux » de Newton au XVIII^e siècle, qui adaptèrent la mécanique newtonienne à l'analyse leibnizienne, c'est d'Alembert qui devait formuler le plus clairement les attendus d'une causalité physique qui fonde en même temps la mathématisation de la mécanique et sa formulation analytique. Si sa conception de l'intelligibilité, comme ses vues sur la nature des grandeurs en mathématiques et en physique, sont d'inspiration cartésienne, il adopte pleinement l'hypothèse newtonienne de l'attraction gravitationnelle sans cause apparente du genre des actions par impulsion, mais ne se satisfait pas du caractère seulement mathématique des relations entre les grandeurs du mouvement. Il leur veut une signification et une justification du point de vue de la physique, c'est-à-dire de l'existence et de la réalisation de mouvements dans la nature.

Son analyse critique de la notion de causalité, faite dès les premières pages de son *Traité de dynamique*³⁸, a pour objet d'arracher la notion de cause aux « obscurités de la métaphysique » et de lui accorder un rôle positif, qui permette de concevoir, considérant le mouvement (et sa permanence naturelle, affirmée par le principe d'inertie³⁹), comment celui-ci prend naissance, se transforme ou se détruit. Etant posé qu'« un corps ne peut se donner le mouvement à lui-même », « il ne peut donc être tiré du repos que par l'action de quelque cause étrangère » ; et « il est clair que *le mouvement, qui a besoin d'une cause pour commencer au moins à exister*, ne saurait non plus être accéléré ou retardé que par une cause étrangère »⁴⁰. Il n'est donc pas question, pour d'Alembert, de nier qu'il y ait une cause au mouvement ; ou, plus exactement, *au changement d'état* de mouvement ou de repos : car, admettant le mouvement « naturel », d'inertie, qui se perpétue une fois acquis, il est clair que le « mouvement qui commence à exister » est le mouvement modifié par rapport à celui d'inertie. Mais le rôle de la

³⁸ Jean le Rond D'Alembert, *Traité de dynamique* (d'Alembert [1743]), Préface et première partie ; voir aussi l'article « Cause », *Encyclopédie* (d'Alembert [1752]), et l'*Essai sur les éléments de philosophie* (d'Alembert [1758]), chapitre 16.

³⁹ Par exemple, J. D'Alembert, article « Cause », *Encyclopédie* (d'Alembert [1752]) : « CAUSE en Méchanique et en Physique, se dit de tout ce qui produit du changement dans l'état d'un corps, c'est-à-dire, qui le met en mouvement ou qui l'arrête, ou qui altère le mouvement. C'est une loi générale de la nature, que tout corps persiste dans son état de repos ou de mouvement, jusqu'à ce qu'il survienne quelque cause qui change cet état. » (Cette définition, et l'article en général, suit les attendus sur ce point du *Traité de dynamique* de 1743).

⁴⁰ D'Alembert, *Traité de dynamique* (D'Alembert [1743]), Préface, p. viii-x.

notion de cause est très précisément limité : tout le propos de d'Alembert va être de décrire et comprendre les mouvements, engendrés par des causes, sans se préoccuper davantage de la nature de ces causes, en s'en tenant à examiner leurs effets. Or ceux-ci peuvent être circonscrits de manière très précise, comme on va le voir.

Quelques mots encore à propos des remarques de d'Alembert sur la notion de cause, avant d'en venir à sa traduction en termes des grandeurs descriptives du mouvement. En admettant l'*attraction à distance*, d'Alembert concevait des causes de mouvement échappant à la perception (et à la connaissance immédiate), à côté des causes reçues par tous, qui sont celles dues à l'impulsion, les seules qu'admettait Descartes et dont la raison est à trouver dans l'*impénétrabilité*. Mais cette dernière est un concept newtonien, d'ailleurs anticartésien, puisqu'il est requis par Newton pour distinguer les corps de leur seule extension spatiale. Certes, Descartes admettait que les corps, dont il rapportait la « nature » ou propriété fondamentale à la seule extension⁴¹, ne se pénètrent pas, mais il rapportait cette propriété à celles du mouvement, notamment au rapport d'exacte adéquation de la matière à son espace propre ou « lieu intérieur » : « Chaque partie de la matière est *tellement* proportionnée à la grandeur du lieu qu'elle occupe (...) [qu'il n'est pas possible] *qu'aucun autre corps y trouve place pendant qu'elle y est*, et nous devons conclure qu'il faut nécessairement qu'il y ait toujours *tout un cercle de matière ou anneau de corps qui se meuvent ensemble en même temps* »⁴². Si, pour Descartes, les corps ne se pénètrent pas, on ne saurait parler pour autant d'impénétrabilité comme une propriété qui serait distincte de l'extension : au contraire, dans les *Principia* de Newton, l'*impénétrabilité* reçoit le statut d'un concept pour qualifier les corps : Newton la définit, parmi les « Règles du raisonnement en philosophie » qui ouvrent le livre III, comme l'une des « qualités universelles de tous les corps », considérées non pas seulement mathématiquement (comme le sont les lois du mouvement aux livres I et II), mais physiquement, comme connues à partir de l'expérience des sens⁴³.

Quoiqu'il en soit, c'est très explicitement le concept newtonien d'impénétrabilité que d'Alembert admet, le mettant au rang des propriétés des corps qui les distinguent de leur seule extension dans l'espace. On lit, à l'article « Cause » : « On peut donc regarder l'impénétrabilité des corps comme une des *causes* principales des effets que nous observons dans la nature ; mais il est d'autres effets dont nous ne voyons pas aussi clairement que l'impénétrabilité soit la *cause* ; parce que nous ne pouvons démontrer par quelle impulsion mécanique ces effets sont produits ; et que toutes les explications qu'on en a données par l'impulsion, sont contraires aux lois de la mécanique, ou démenties par les

⁴¹ Descartes, *Principes de la philosophie, op. cit.*, Seconde partie, § 4 (AT, p. 65), sur « la nature de la matière, ou du corps pris en général » : « *sa nature consiste en cela seul qu'il est une substance qui a de l'extension* ». (Souligné dans le texte : variante de la traduction française de 1647 par rapport au texte latin original de l'édition de 1644 ; ces variantes sont généralement attribuées à Descartes lui-même).

⁴² *Ibid.*, § 33 (même remarque qu'à la note précédente).

⁴³ Newton, *Principia, op. cit.*, Livre III, règle 3. Ces qualités sont : l'extension, la dureté, l'impénétrabilité, la mobilité et l'inertie, auxquelles s'ajoute l'attraction mutuelle universelle des corps (bien qu'elle ne soit pas immuable et varie avec la distance).

phénomènes. Tels sont la pesanteur des corps, la force qui retient les planètes dans leurs orbites, etc. Il est donc nécessaire de reconnoître une classe d'effets, et par conséquent de *causes* dans lesquelles l'impulsion ou n'agit point, ou ne se manifeste pas. »⁴⁴

Ces causes que nous ne connaissons pas, nous ne les éprouvons que par leurs *effets*, qui nous sont donnés dans l'expérience : « Nous voyons l'effet, nous concluons qu'il a une *cause* : mais voilà jusqu'où il nous est permis d'aller. » Au surplus, quand nous croyons connaître la cause, elle nous échappe, comme cette impénétrabilité, cause de l'impulsion, elle-même cause de mouvement. L'idée de cause n'a, en fin de compte, pour fonction que de nous permettre de rechercher et d'établir les lois du mouvement des corps. « Il seroit à souhaiter », poursuit d'Alembert, « que les Mécaniciens reconnussent enfin bien distinctement que nous ne connoissons rien dans le mouvement que le mouvement même, c'est-à-dire l'espace parcouru et le tems employé à le parcourir, et que les *causes métaphysiques* nous sont inconnues ; que ce que nous appelons *causes*, même de la première espèce [l'impulsion], n'est tel qu'improprement ; ce sont des effets desquels il résulte d'autres effets... ».

C'est sur ce constat qu'il établit son propre programme concernant la dynamique : formuler les lois du mouvement des corps quelconques soumis à des actions quelconques, en ne faisant appel qu'aux grandeurs qui servent à décrire le mouvement : espace, temps, vitesse, accélération (ou « force accélératrice »), masse, quantité de mouvement (masse multipliée par la vitesse), force motrice (masse multipliée par l'accélération), etc. D'Alembert se refuse à faire appel à la notion de force, conçue comme extérieure aux corps, car ce serait, précisément, recourir au versant métaphysique de l'idée de cause, ou à des idées dénuées de signification précise comme celle (venue de Newton, reprise par Euler) de « proportionnalité de la cause et de l'effet ».

Les causes sont « des effets qui résultent d'autres effets ». On en restera donc au niveau des effets, des effets sur le mouvement. L'équation du mouvement, chez d'Alembert, n'est pas donnée par la seconde loi de Newton, mais par le second et le troisième « principes du mouvement » selon sa formulation, transposés de ceux de Newton, mais aussi repris des résultats antérieurs de la mécanique : la *composition du mouvement* (de Galilée puis Descartes) et l'*équilibre* (de Stevin), ce dernier impliquant la notion de vitesse virtuelle, dont d'Alembert fait dès lors grand usage. Leur synthèse donne le « principe de d'Alembert », démontré en *théorème* de la dynamique (sur lequel Lagrange fondera plus tard sa *Mécanique analytique*).

C'est dans cette reformulation des principes de la dynamique qu'intervient la causalité, pour construire les grandeurs du mouvement, en même temps que leurs relations entre elles : d'Alembert détermine les grandeurs qui caractérisent un changement de mouvement, ou un mouvement naissant, par différence avec le mouvement déjà acquis. Il dispose pour cela d'un outil de pensée précieux, qui est la différentielle d'une grandeur, dx pour la variable d'espace, dt pour le temps, dv pour la vitesse, dA pour la grandeur A . Les quantités différentielles sont, du point de vue des unités, homogènes aux grandeurs finies

⁴⁴ D'Alembert, article « Cause », *Encyclopédie* (d'Alembert [1752], souligné par d'Alembert).

correspondantes, et peuvent donc se composer avec elles. Dans le *Traité de dynamique*, d'Alembert représente le mouvement par un diagramme spatio-temporel avec le temps en abscisse et l'espace en ordonnée, et peut ainsi écrire l'accélération, à partir de dv et dt , ou de dde et de dt^2 , etc, construisant la « force accélératrice », comme changement instantané de la quantité de mouvement, par définition et construction, simple effet de la cause du changement, cette cause elle-même ne figurant dès lors pas autrement dans les équations de la dynamique. Dans cette formule, qui s'écrit $dde = \pm \Phi dt^2$, et qui ressemble par la forme à celle de Newton traduite en langage différentiel (Euler la posera en 1750 en gardant la force au sens de Newton, et également dans un sens vectoriel), mais avec une signification toute différente, se tient *la cause saisie dans son effet*.

D'Alembert raisonne en considérant la modalité par laquelle la cause agissante a pu donner son effet, à l'instant donné (modalité à laquelle Newton n'avait pas voulu s'arrêter) : soit instantanément (dans la singularité d'un instant), soit continûment (durant un certain temps, Δt ramené à dt). Dans le premier cas, le point courant du diagramme reçoit en un instant son accroissement de vitesse (la différentielle seconde d'espace), qui se compose avec la vitesse déjà acquise en ce point (suivant la tangente à la courbe du diagramme), et la suite des actions successives mettra de même en jeu chacun des points de la courbe continue. Dans le second cas, c'est seulement au bout du temps Δt (dt) que le corps a reçu l'accroissement de vitesse, tout en s'étant déplacé de Δx (dx). Le processus revient à remplacer la courbe par un polygone, que l'on fait ensuite passer à la limite ($dt \rightarrow 0$). Dans les deux cas, le mouvement est décrit par la formule de la « force accélératrice », et les deux sont donc physiquement et mathématiquement équivalents⁴⁵.

Autrement dit, il n'y a pas lieu de s'inquiéter du mode d'action de la cause, puisque la mise en équation revient finalement au même. Il aura suffi de considérer l'effet de la cause, qui donne l'équation différentielle du mouvement⁴⁶. Mais le résultat net est cependant d'avoir considéré des actions physiques, selon le déroulement du temps, et d'avoir construit (mathématiquement, en fait géométriquement) les grandeurs *physiques* appropriées, soumises aux principes du mouvement. On notera la modernité de la procédure, qui construit les grandeurs physiques avec leurs relations (selon leur forme mathématique) réglées par des principes physiques.

Dans sa pensée physique de la causalité, d'Alembert commence par effectuer une séparation entre l'idée de *cause métaphysique*, nébuleuse et inconnue, et celle de *cause physique* (héritée de la « cause efficiente »), qui est elle-même effet d'une cause, et qui se manifeste par un effet, et ne déborde pas cet effet. Cette identification ou égalité de la cause physique avec son effet (dans l'instant même de son application) n'est aucunement une identité ontologique

⁴⁵ Il existe une différence entre les deux calculs de l'accélération, suivant la sous-tangente ou suivant la corde, à savoir un facteur 2, mais cela n'influe pas sur les résultats pour un mouvement donné si l'on reste cohérent et ne mélange pas les deux modes de calcul. Cette difficulté ne serait évitée qu'avec la *Mécanique analytique* de Lagrange (Lagrange [1788]), indépendante de représentations géométriques (notamment en ce qui concerne dt).

⁴⁶ On peut consulter, pour plus de détails, l'étude suivante : M. Paty, « L'élément différentiel de temps et la causalité physique dans la dynamique de d'Alembert » (Paty [à paraître, a]).

puisque, précisément, elle se propose pour éviter l'ontologie ; elle est simplement, fonctionnellement, pourrait-on dire, exprimée dans la *relation mathématique* entre les grandeurs du mouvement physique, représentées mathématiquement. Plus précisément, dans la *forme différentielle* qui exprime ce qui se produit en un *instant*, concept qui saisit, de fait, le singulier instantané sur le flux du continu.

5. PERSPECTIVES SUR LA CAUSALITE EN PHYSIQUE.

Nous avons vu comment, tout en s'appuyant sur l'un des aspects philosophiques traditionnels de l'idée de causalité (celui de « cause efficiente »), la causalité physique s'établit en rupture avec le sens métaphysique qui lui était précédemment attaché. Bien plutôt que dans les *Principia* de Newton, c'est donc dans la ré-élaboration par d'Alembert, dans son *Traité de dynamique*, des lois du mouvement formulées comme des principes, et exprimées par le calcul différentiel, que l'idée de *causalité physique* a été pour la première fois expressément considérée, conçue comme indissociable de son effet, qui est le *changement de mouvement*. Il est apparu que les pensées respectives de Newton et de d'Alembert sur les notions de *cause* et de *force* étaient en opposition à cet égard, en ce qui concerne la nature proprement *physique* de ce changement. La conception newtonienne de la *force externe* ou *imprimée* (*vis impressa*), comme substitut mathématique des causes, écartait la considération physique de ces dernières. D'Alembert, quant à lui, considérait le changement produit comme immanent au mouvement selon *la cause* circonscrite par son effet, et il évitait pour cette raison de recourir à la notion de force externe (mal définie et « métaphysique ») : la force immanente au mouvement dans le changement de ce dernier était la seule *force accélératrice*, définie par d'Alembert à partir du mouvement lui-même, identifiée en fait à l'accélération (la « force motrice » étant la même multipliée par la masse).

C'est sur cette base conceptuelle qu'il établit immédiatement ensuite son théorème de la dynamique ou *principe de d'Alembert*. Dans la mise en forme d'un problème de dynamique, d'Alembert considérait les mouvements du système (de fait, en termes des *quantités de mouvement*), celui effectivement pris (qui est à trouver, soit p_E), celui reçu ou acquis (p_A , généralement par impulsion ou attraction, qui s'ajoute au mouvement d'inertie, antérieurement acquis) et celui perdu par les liaisons (p_L), en les composant en grandeur et direction, c'est-à-dire dans le sens vectoriel ($p_E = p_A - p_L$)⁴⁷. Le mouvement perdu dans les liaisons était obtenu par l'étude du système à l'équilibre (faisant appel aux mouvements virtuels). Quant au mouvement acquis, il était calculé à partir de la « force accélératrice » définie par d'Alembert comme l'accélération reçue par les éléments du système. En bref, un problème de dynamique pour un système matériel s'écrivait, dans la perspective de d'Alembert, comme un bilan de la composition des quantités de mouvements (prises vectoriellement), réelles et virtuelles, des parties du système. Cette formulation résultait, en dernière instance, de la mise en œuvre de la causalité physique telle qu'il la concevait, rapportée

⁴⁷ Ces notations ne sont pas de d'Alembert : nous ne les prenons que pour simplifier l'exposé.

comme nous l'avons vu aux accélérations instantanées, écrites sous leur forme différentielle.

Dans la *Mécanique analytique*, Lagrange prit comme point de départ le théorème de la dynamique de d'Alembert. Il adoptait par là-même le point de vue conceptuel fondamental de ce dernier, celui de la considération interne du mouvement, et donc la « causalité immanente » : celle-ci était directement transcrite dans les équations générales de la mécanique telles qu'il les établit (en utilisant le calcul variationnel). Ce faisant, il prenait en compte également d'autres acquis, comme l'équation de Newton-Euler, et réintérait le concept de force, conçu cependant dès lors comme physique, et comme neutre du point de vue métaphysique.

On peut donc considérer que la conception de d'Alembert de la causalité physique et de la signification physique corrélative des équations du mouvement est celle dont la physique théorique et mathématique a hérité dans la suite durablement. La causalité (physique) est donnée dans la forme même des équations, sans plus de nécessité d'interprétation fixant des conditions d'utilisation, comme cela avait été le souci préalable de d'Alembert, dès lors que cette condition était désormais une partie intégrante de la mise en équations. Nous avons vu ainsi la *causalité physique* (différentielle) se proposer pour accompagner et justifier le point de vue des concepts appropriés aux phénomènes de mouvement et de changement : la physique tout entière s'est constituée par la suite sur la base de cette notion, en choisissant en référence à elle les principes et les concepts propres à sa mathématisation. Cette notion devait, en retour, s'adapter aux nouvelles exigences théoriques, avec la théorie de la relativité restreinte, qui posa des contraintes spatio-temporelles (dues à ce que les actions causales sont à vitesse finie). Elle trouverait, cependant, en apparence, sa limite avec la physique quantique, du moins dans son expression par les variables différentielles traditionnelles. Mais ceci est une autre histoire⁴⁸.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1743]. *Traité de dynamique*, David, Paris, 1743. 2ème éd., modif. et augm., David, Paris, 1758.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1751a]. *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, 1751 ; repris dans les *Mélanges* de d'Alembert, 1753 ; 1767. Ré-éd., présentée et annotée par Picavet, Armand Colin, Paris, 1894. Ed. sans notes, Gonthier, Genève, 1965. Nlle éd., introduite et annoté par Michel Malherbe, Vrin, Paris, 2000.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1751b]. « Action », *Encyclopédie*, vol. 1, 1751.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1752]. « Cause », *Encyclopédie*, vol. 2, 1752.

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1755]. « Elémens des Sciences », *Encyclopédie*, vol.5, 1755, p. 491-497.

⁴⁸ Voir M. Paty, « La notion de déterminisme en physique et ses limites » (Paty [2003]).

ALEMBERT, Jean le Rond D' [1758a]. *Essai sur les éléments de philosophie ou sur les principes des connaissances humaines*, Paris, 1758. In *Oeuvres philosophiques, historiques et littéraires de d'Alembert*, vol. 2, Bastien, Paris, 1805 (suivi des *Eclaircissements*). Ré-éd., préface de Richard N. Schwab, Olms Verlag, Hildesheim, 1965 ; autre ré-éd, sans préface, Fayard, Paris, 1986.

ALEMBERT, Jean le Rond D', et DIDEROT, Denis (éd.) [1751-1780]. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780. (Mentionné comme : *Encyclopédie*).

ARISTOTE [Métaph]. *La Métaphysique*, nouvelle édition, entièrement refondue, traduction et commentaire par J. Tricot, Paris, 2 vols., 1962.

DEBRU, Claude [2003]. Causalité, temporalité, fonction. Kant, Helmholtz, Mach, in Viennot, Laurence et Debru, Claude (éds.), *Enquête sur le concept de causalité*, Collection « Sciences, histoire et société », Presses Universitaires de France, Paris, 2003.

DESCARTES, René [vers 1628]. *Regulæ ad directionem ingenii*, in Descartes, *Opuscula Posthuma*, Amsterdam, 1701 ; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 10, p. 349-486 ; trad. en français par J. Sirven, *Règles pour la direction de l'esprit*, Vrin, Paris, 1970.

DESCARTES, René [1637]. *Discours de la méthode, suivis d'Essais de cette méthode : La Dioptrique, Les Météores, La Géométrie*, Leyde, 1637 ; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 6.

DESCARTES, René [1641]. *Meditationes de Prima philosophia*, 1ère éd., Michel Soly, 1641 ; 2ème éd. augm., Louis Elzevier, Amsterdam, 1642 ; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 7, p. 1-612. Trad. en français (1647), *Méditations*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 9, p. 1-254.

DESCARTES, René [1644]. [1644]. *Principia philosophiæ*, 1ère éd. princeps, Louis Elzevier, Amsterdam, 1644 ; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 8, p. 1-353. Trad. en français (1647), *Principes de la philosophie*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 9, p. 1-362.

DESCARTES, René [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1ère éd., 1896-1913) ; nouvelle édition révisée, 1964-1974; ré-éd., 1996. (Edition indiquée AT).

EINSTEIN, Albert [1927]. Newtons Mechanik und ihr Einfluss auf die Gestaltung der theoretischen Physik, *Naturwissenschaften* 15, 1927, 273-276 ; trad. fr., La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique, in A. Einstein, *Œuvres choisies*, Seuil, Paris, vol. 5, 1989, p.235-241.

EULER, Leonhard [1736]. *Mechanica sive motus scientia analytice exposita*, Acad. des Sciences, Saint-Petersbourg, 1736, 2 tomes ; éd. par Paul Stäckel, Teubner, Leipzig et Berlin, 1912. (*Opera omnia*, series 2 : *Opera mechanica et astronomica*, vols. 1 et 2).

EULER, Leonhard [1750]. Découverte d'un nouveau principe de mécanique, *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin*, 6 (1750), 1752, p. 185-217. Repris dans L. E., *Opera Omnia*, series 2 : *Opera mechanica et astronomica*, vol. 5, éd. par Joachim Otto Fleckenstein, Lausanne, 1957, p. 81-109.

EULER, Leonhard [1926]. *Leonhardi Euleri commentationes physicae : ad physicam generalem et ad theoriam soni pertinentes*, éd. par Eduard Bernoulli, Rudolf Bernoulli, Ferdinand Rubio *et al.*, Teubner, Leipzig et Berlin, 1926. (*Opera omnia*, series 3 : *Opera physica miscellanea epistolae*, vol. 1).

FOULQUIE, Paul [1962]. *Dictionnaire de la langue philosophique*, avec la collaboration de Raymond Saint-Jean, Presses Universitaires de France, Paris, 1962.

GALILEE (GALILEI), Galileo [1638]. *Discorsi e dimostrazioni matematiche in torno di due nuove scienze*, Leyde, 1638 ; ré-éd., avec introd. et notes, par A. Carugo et L. Geymonat, Boringhieri, 1958. Trad. fr. par Maurice Clavelin, *Dialogues sur deux sciences nouvelles*, trad. A. Colin, Paris, 1970.

HAMILTON, William Rowland [1877]. *Lectures on metaphysics*, ed. by the rev. H. L. Mansel, Henry Longueville and John Veitch, W. Blackwood and sons, Edinburgh and London, 6th ed., 2 vols., 1877.

HELMHOLTZ, Hermann von [1847]. *Ueber die Erhaltung der Kraft*, Berlin, 1847. Ré-éd. in H. von Helmholtz, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, 3 vol., Leipzig, 1882-1895. Trad. angl. par Malcolm F. Lowe, « On the conservation of force » in H. von Helmholtz, *Epistemological writings*, ed. by R.S. Cohen and Y. Elkana, Reidel, Dordrecht and Boston, 1978.

HUME, David [1748]. *Philosophical Essays Concerning Human Understanding*, 1748; repris sous le titre *An Inquiry Concerning Human Understanding*, 1758 ; ed. by Charles W. Hendel, Bobbs-Merrill, New-York, 1955.

KANT, Emmanuel [1781] 1787. *Critik der reinen Vernunft*, J.F. Hartknoch, Riga, 1781; 2^e 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.

KANT, Emmanuel [1796]. *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1796). Trad. fr. par François de Gandt, *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, in Kant, Emmanuel, *Oeuvres philosophiques*, vol. 2, Gallimard, Paris, 1985, p. 347-493.

KOYRE, Alexandre [1939]. *Etudes galiléennes* (1935-1939), Hermann, Paris, 1966.

KOYRE, Alexandre [1968]. *Etudes newtoniennes*, Gallimard, Paris, 1968.

LAGRANGE, Louis Joseph (1788). *Mécanique analytique*, Paris, 1788; 4^e éd. (posth.), de 1753, in J.L.Lagrange, *Oeuvres*, Gauthier-Villars, Paris, 14 vols, 1867-1892 : vols. 11 et 12.

LALANDE, André [1926]1980. *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*, Presses Universitaires de France, Paris, 1926 (2^e éd., la première ayant paru en fascicules de 1902 à 1923) ; 13^e éd., 1980.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhem [1686]. *Discours de métaphysique* (écrit en 1686), éd. H. Lestienne, Vrin, Paris, 2^e éd., 1952 ; 1967.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhem [1705]. *Nouveaux essais sur l'entendement humain* (rédigé en 1704-1705, éd. posth., 1765) ; éd. par J. Brunschvicg, Garnier-Flammarion, Paris, 1966.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhem [1710]. *Essais de Théodicée* (1710), éd. par Jacques Jalabert, Aubier-Montaigne, Paris, 1962.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhem [1714]. *Principes de la philosophie ou Monadologie* (rédigés en 1714, public. posth.), éd. André Robinet, *Principes de la nature et de la grâce et Monadologie*, Presses Universitaires de France, Paris, 1954.

LEIBNIZ, Gottfried Wilhem [1903]. *Opuscules et fragments inédits*, éd. L. Couturat, Alcan, Paris, 1903.

MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr. (sur la 4^e éd. allemande) par E. Bertrand, *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Hermann, Paris, 1904; ré-éd., 1923.

MALEBRANCHE, Nicolas [1688]. *Entretiens sur la métaphysique et sur la religion* (1688), éd. par A. Cuvelier, Vrin, Paris, 1961 ; également, in N.M., *Œuvres complètes*, éd. par André Robinet, Editions du CNRS/Vrin, Paris (20 vols., 1962-1968), vol. 13, 1965.

NEEDHAM, Joseph [1969]. *The Great Titration*, 1969 ; trad. fr. par Eugène Jacob, *La science chinoise et l'Occident (Le Grand Titrage)*, Seuil, Paris, 1973.

NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, London, 1687 ; 3^eme éd., G. & J. Innys, London, 1726 ; édit. with variants by Alexandre Koyré & I. Bernard Cohen, with assist. of Anne Whitman, Harvard University Press, Cambridge, 1972, 2 vols ; *Mathematical principles of natural philosophy*, engl. transl (from 3rd ed.) by Andrew Motte (1729), rev. and ed. by Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, 1934, re-impr., 1962, 2 vols.

PATY, Michel [1986]. Mach et Duhem : l'épistémologie de savants-philosophes, *Manuscrito* (Campinas), 9, 1986 (n° 1, abril), 11-49 ; également in Bloch, Olivier (dir.), *Epistémologie et matérialisme*, Klincksieck, Paris, 1986, p. 177-217.

PATY, Michel [1987]. Einstein et la pensée de Newton, *La Pensée*, n° 259, 1987, 17-37.

PATY, Michel [1988]. Sur la notion de complétude d'une théorie physique, in Fleury, Norbert; Joffily; Sergio; Martins Simões, J.A. and Troper, A. (eds), *Leite Lopes Festschrift. A pioneer physicist in the third world* (dedicated to J. Leite Lopes on the occasion of his seventieth birthday), World scientific publishers, Singapore, 1988, p. 143-164.

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

PATY, Michel [1994a]. 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 [1994b]. 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; 2^e éd., 1995 ; Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.

PATY, Michel [1997b]. «Mathesis universalis» et intelligibilité chez Descartes, Trad. en esp. par Martha C. Bustamante, «Mathesis universalis» e inteligibilidad

en Descartes, Trad. in Albis, V. R. ; Charum, J. ; Sanchez, C. H. ; Serrano, G. (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. Original en français, in Chemla, K., Probst, S., Erdély A. et Moretto, A. (éds.), *Ceci n'est pas un festschrift pour Imre Toth*, à paraître.

PATY, Michel [1999a]. Les trois stades du principe de relativité, *Revue des questions scientifiques*, 170 (n°2), 1999, 103-150.

PATY, Michel [2001a]. D'Alembert, la science newtonienne et l'héritage cartésien, *Corpus* (revue de philosophie, Paris), n°38 : *D'Alembert* (éd. par Markovitz, Francine et Szczeciniarz, Jean-Jacques), 2001, 19-64.

PATY, Michel [2003]. La notion de déterminisme en physique et ses limites, in Viennot, Laurence et Debru, Claude (éds.), *Enquête sur le concept de causalité*, Collection « Sciences, histoire et société », Presses Universitaires de France, Paris, 2003.

PATY, Michel [à paraître, a]. L'élément différentiel de temps et la causalité physique dans la dynamique de Alembert, in Allard, André & Morelon, Régis, *et al.* (eds.), *Livre de Mélanges en hommage à Roshdi Rashed*, à paraître.

POINCARÉ, Henri [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902 ; 1968.

POPPER, Karl [1935]. *Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*, Springer Verlag, Wien, 1934. Ré-éd. avec additions, 1959; 1968. Trad. angl., *The logic of scientific discovery*, 1959; 1968. Trad. fr. par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, *La logique de la découverte scientifique*, Payot, Paris, 1973.

SPINOZA, Baruch [1675]. *L'Ethique*, trad. Charles Appuhn, in B.S., *Œuvres*, Garnier-Flammarion, vol. 3, Paris, 1955. (Original en latin, rédigé entre 1661 et 1675, *Ethica ordine geometrico demonstrata*, in Spinoza, *Opera*, ed. Carl Gebhardt, Carl Winter, Heidelberg, 4 vols., 1925).

VUILLEMIN, Jules [1955]. *Physique et métaphysique kantienne*, Presses Universitaires de France, Paris, 1955.

WAHL, Jean [1920]. *Du rôle de l'idée de l'instant dans la philosophie de Descartes*, Thèse complémentaire de Doctorat ès-Lettres, Paris, 1920. Ré-éd. avec une introduction de Frédéric Worms, Descartes et Cie, Paris, 1994.