

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.

D'Alembert, la science newtonienne et l'héritage cartésien[§]

Michel PATY*

RESUME.

On étudie la manière dont d'Alembert, de formation cartésienne, a reçu et développé la science newtonienne. S'il garda de sa formation une conception très cartésienne de l'intelligibilité et de la rationalité des principes de la connaissance, sa découverte de la science newtonienne détermina la direction de son travail dans les voies désormais ouvertes pour la physique, avec les lois de la dynamique et de l'attraction gravitationnelle et le traitement physico-mathématique des problèmes de la mécanique. L'œuvre de d'Alembert n'est pas un simple développement de la physique newtonienne, mais constitue une véritable réorganisation conceptuelle de cette dernière, permise par la mise en œuvre systématique du calcul différentiel et intégral, dans la formulation donnée par Leibniz. Aux deux influences mentionnées, on peut donc aussi ajouter la tradition leibnizienne, représentée notamment par Jean Bernoulli (autre inspirateur reconnu par d'Alembert), qui établit l'analyse comme outil de pensée théorique. D'Alembert put ainsi donner une formulation originale de la dynamique selon les variables caractéristiques du mouvement, et transcrire les lois de Newton en *principes*, et les rattacher dès lors à une intelligibilité de type cartésien. Le double, et même triple, héritage intellectuel de ce pionnier de la physique mathématique que fut d'Alembert, marqua et son «style scientifique» (lui faisant mathématiser la dynamique par l'analyse différentielle sous le signe de ses principes), et son épistémologie, avec sa réflexion sur la nature des principes, sa pensée de la mathématisation des grandeurs corrélative d'une critique conceptuelle et d'une perspective féconde sur les «sciences physico-mathématiques», et sa conception de l'intelligibilité rationnelle.

ABSTRACT.- *D'Alembert, newtonian science and cartesian inheritance.*

We study the manner by which d'Alembert, who had a cartesian training, has received and developed newtonian science. He kept from his intellectual formation a quite cartesian conception of intelligibility and of the rationality of the principles of

[§] Ce texte rassemble les contenus des exposés faits par l'auteur à deux journées d'études sur d'Alembert : «D'Alembert, la science newtonienne et l'héritage cartésien», *Journée d'Alembert*, Département de philosophie, Université de Paris 10-Nanterre, 29 janvier 1999 ; «Newton et Descartes dans D'Alembert», *Journée d'Alembert*, Département de philosophie, Université de Bordeaux 3-Michel de Montaigne, 16 février 1999. Je remercie Francine Marcovits et Jean-Jacques Szczeciniarz qui ont dirigé ces journées et m'y ont associé.

* Equipe REHSEIS (UMR 7596), Centre National de la Recherche Scientifique et Université Paris 7-Denis Diderot, Centre Javelot, 2, Place Jussieu, F-75251 Paris-Cedex-05. Courrier électronique : paty@paris7.jussieu.fr

knowledge, while his discovery of newtonian science was to determine the direction of his work in the ways henceforth open for physics, with the laws of dynamics and of gravitational attraction and the physico-mathematical processing of the problems of mechanics. D'Alembert's work is not a mere development of newtonian physics, but constitutes a true conceptual reorganization of this last, allowed by the systematic use of differential and integral calculus in the formulation given by Leibniz. Together with the two above-mentioned influences, one should therefore also add the leibnizian tradition, represented notably by John Bernoulli (another recognized d'Alembert's inspirer), that established analysis as a tool for theoretical thought. D'Alembert was thus able to give an original formulation of dynamics, by way of the variables characterizing motion, and to transcribe Newton's three *laws* into three *principles*, and to refer them from then on to an intelligibility of a cartesian type. The double, and even triple, intellectual inheritance of this pioneer of mathematical physics that d'Alembert was coined his «scientific style» (leading him to mathematize dynamics with differential analysis under the guidance of its principles) and his epistemology as well, with his reflection on the nature of principles, his conception of the mathematization of magnitudes, correlative to a conceptual criticism and to a fertile perspective on the "physico-mathematical sciences", and his idea of rational intelligibility.

TABLE

1. Introduction. Questions d'héritage ou de paradigmes
 2. Filiation newtonienne en physique. Rationalité et esprit critique en philosophie.
 3. Héritage intellectuel et apprentissage
 4. La pensée mathématique des grandeurs et la nature des principes du mouvement
 5. Conclusion. L'intelligibilité rationnelle pour un pionnier de la physique mathématique
- Références bibliographiques

1

INTRODUCTION. QUESTIONS D'HERITAGES OU DE PARADIGMES

Jean Le Rond d'Alembert est généralement reconnu comme l'un des premiers grands représentants de la physique newtonienne sur le continent au XVIII^e siècle, avec Leonhard Euler et Alexis Clairaut, poursuivant en physique et en mathématiques l'œuvre de l'auteur des *Principia*. On les tient d'ailleurs tous les trois à juste titre comme ses authentiques héritiers et continuateurs, qui posèrent les jalons essentiels des développements de l'analyse mathématique et de l'analytisation de la mécanique, dont Joseph-Louis Lagrange et Pierre-Simon Laplace ainsi que d'autres devaient reprendre ensuite le flambeau. C'est à eux qu'il revint de tracer les grandes voies que les mathématiques pour une grande part, et la «physique mathématique» dans son ensemble, devaient suivre, avec les succès que l'on sait, jusqu'à la période contemporaine.

Concernant d'Alembert, on retient donc avant tout son héritage newtonien, considérant, d'une part, que la «nouvelle analyse», comme on disait à l'époque, c'est-à-dire le calcul «infinitésimal», ou différentiel et intégral, supplantait l'analyse au sens cartésien, voire était en rupture avec elle ; et, d'autre

part, que la mécanique newtonienne s'était surtout établie en opposition à la conception cartésienne qui rapportait la matière à l'étendue et la mécanique à la géométrie, la théorie newtonienne de la gravitation fondée sur l'«attraction universelle» s'opposant sans appel à la théorie cartésienne des tourbillons de matière subtile pour des actions de contact.

Mais c'est aussi, par-delà ces directions décisives effectivement prises par les sciences, jusque dans ses conceptions philosophiques sur la connaissance et sur la nature, que l'on a voulu voir en d'Alembert l'héritier de Newton bien plutôt que celui de Descartes, en raison notamment de son refus des systèmes métaphysiques et de son adoption d'une méthodologie scientifique plus newtonienne que cartésienne. Ce «newtonianisme» de d'Alembert, opposé au cartésianisme de ses maîtres, paraissait d'autant plus avéré que lui-même s'en était volontiers réclamé. A cet égard, d'Alembert est généralement considéré comme plus newtonien que ses pairs en mathématique et en physique, Euler et Clairaut, et surtout que le premier, qui se reconnaissait volontiers cartésien, comme l'étaient d'ailleurs les élèves bâlois de Leibniz, les frères Jakob (Jacques) et Johann (Jean) Bernoulli, dont il fut le disciple (par ses lectures).

Nous pouvons cependant pressentir que, dans la réalité, l'opposition n'était pas aussi tranchée, et concevoir qu'en matière de filiation les influences sont généralement partagées. Si d'Alembert et ses contemporains du siècle des Lumières, savants, philosophes et encyclopédistes, portaient haut la bannière de la science newtonienne en rompant des lances contre un «cartésianisme» considéré comme un obstacle pour les nouvelles conceptions scientifiques, c'était assurément par un choix «idéologique», par ailleurs lié aux autres combats des Lumières, plutôt que par une analyse stricte des doctrines en présence. On notera que d'Alembert visait dans sa critique les «cartésiens» contemporains bien plus que la pensée de Descartes lui-même, dont il n'hésita d'ailleurs pas, comme nous allons le voir, à faire un éloge vibrant, même s'il formulait en même temps des réserves à son égard¹.

D'un autre côté, reconnaître le «newtonianisme» de d'Alembert dans sa pensée en mathématiques et en physique, voire en méthodologie scientifique, n'interdirait nullement d'y identifier également des influences cartésiennes, notamment en ce qui concerne la question de la connaissance considérée en général. Et cela d'autant moins que Newton avait lui-même subi l'influence de la pensée cartésienne, malgré la vive opposition qu'il lui manifesta et dont la violence même trahit l'importance effective de cette influence. L'opposition de Newton à Descartes est affirmée dès le titre des *Principia, Principes mathématiques de la philosophie naturelle* faisant évidemment contraste avec *Principes de la philosophie*², et elle se manifeste à divers endroits stratégiques de l'ouvrage, comme, par exemple, dans le fameux «hypothesis non fingo», «je ne feins pas d'hypothèse» (sous-entendu, du genre de celles que faisait Descartes, sans égard à la réalité), comme l'a bien montré Alexandre Koyré³.

¹ "Respectons toujours Descartes ; mais abandonnons sans peine des opinions qu'il eût combattues lui-même un siècle plus tard» (D.P., p. 135). (D P : voir, dans la bibliographie, d'Alembert [1751a]).

² Newton [1687], Descartes [1644].

³ Koyré [1968].

Surtout, peut-être, elle traverse tout le Livre II des *Principia*, qui porte sur le mouvement des fluides, et qui semble à première vue être une digression entre le livre I, consacré aux lois générales du mouvement des corps, et le livre III, sur le «Système du monde», qui est en continuité directe avec le premier⁴. Mais c'est que les démonstrations des *Principia* sur la loi des mouvements célestes sont axées sur la réfutation des tourbillons cartésiens et, dans ce sens, la motivation de l'insertion du livre II aura été de préparer et de porter l'estoc final et sans recours à la théorie des tourbillons. La réfutation définitive de cette dernière était fondamentale pour faire accepter une hypothèse aussi peu naturelle que celle d'une attraction à distance sans corps intermédiaires, puisqu'elle éliminait la seule alternative raisonnable plus facile à admettre. Et, de fait, la nécessité de l'attraction fut suffisamment forte pour triompher d'une objection aussi grave (formulée par les cartésiens) que celle de faire renaître les «qualités occultes». C'était cette polémique des *Principia* contre la physique cartésienne que d'Alembert reprenait à son compte, sans doute parce que le souvenir et l'effet des réticences contre la physique newtonienne était encore relativement vif lorsque lui-même s'y forma⁵.

Mais les exigences de son combat intellectuel n'étaient plus nécessairement celles des siècles suivants, où l'on pouvait concevoir des jugements plus nuancés et des oppositions moins schématiques. A moins de se faire une conception radicale des coupures chronologiques, des «ruptures de paradigmes», et de juger que, puisque Newton s'était imposé en s'opposant à Descartes, être newtonien devait impliquer une rupture sans retour avec ce dernier ; et que, si la moindre once d'esprit cartésien se trouvait décelée chez un auteur, cela signifierait à coup sûr qu'il n'était pas vraiment newtonien. Ce serait l'un ou l'autre : l'on serait ou newtonien, ou cartésien. C'est ainsi que, dans son livre, qui constitue par ailleurs une référence précieuse sur le profil scientifique de d'Alembert et sur les liens de son *Traité de dynamique* aux travaux qui l'ont précédé, Thomas Hankins a cru voir dans la pensée des principes du mouvement du *géomètre* un retour pur et simple à Descartes, allant jusqu'à récuser tout rapport entre les trois lois de Newton et les trois principes du mouvement de d'Alembert⁶, alors qu'il s'agit d'une transcription, d'une réorganisation impliquant des changements de signification, mais nullement d'une ignorance ou d'une négation. Une telle opposition tranchée⁷ ne permet pas de concevoir que d'Alembert proposait une *reformulation* de la physique newtonienne, en prenant comme fondamentales des *variables du mouvement* (distances, durées, vitesses, accélérations, ainsi que des «forces accélératrices» qui ne sont, en vérité, que les accélérations elles-mêmes, etc.), plutôt que des *forces*, et comment il put ainsi exprimer le contenu des trois *lois* newtoniennes du mouvement comme des

⁴ I. B. Cohen, s'étonnant de cette insertion, a parlé à son propos de digression, la considération des fluides introduisant, faisait-il remarquer, une rupture d'homogénéité dans la structure et le contenu des *Principia* (Cohen [1975], p. 68, 74).

⁵ «Il ne faut qu'ouvrir nos livres, pour voir avec surprise qu'il n'y a pas encore trente ans qu'on a commencé en France à renoncer au cartésianisme» (DP, p. 134).

⁶ Hankins [1971].

⁷ Cette opposition ressemble fort, de fait, à l'idée d'une «rupture de paradigme», bien que cette idée ne soit pas mentionnée dans le livre de Hankins, paru en 1971, après la publication de la *Structure des révolutions scientifiques* (Kuhn [1962]), mais avant que les thèses kuhniennes ne connaissent le succès «exclusif» que l'on sait.

principes sur le mouvement des corps, dont le «principe de la dynamique» découlait. Ce fut, en réalité (nous y reviendrons), la *conceptualisation différentielle* de ces grandeurs, dont Newton ne disposait pas, qui le lui permit.

Une opposition schématique et binaire, newtonien contre cartésien, interdirait, d'une manière générale, de rendre compte de la réalité de la constitution d'une tradition scientifique, qui s'effectue toujours par adaptation et transformation à partir d'emprunts divers. Tel est, précisément, l'enjeu de la question de l'«héritage», dans la constitution d'une pensée, ou dans la formation d'un nouveau courant intellectuel ou scientifique. Il s'agit, en l'occurrence, de comprendre les caractéristiques intellectuelles du «passage» du newtonianisme d'Angleterre au continent européen, qui assura sa survie et sa fécondité, précisément peut-être parce que les idées mathématiques et physiques fondamentales de Newton y trouvèrent un terrain intellectuel plus favorable que celui d'origine pour leur développement, dans lequel elles purent s'enrichir d'autres apports. Or, indéniablement, ce terrain était profondément imprégné d'«esprit cartésien», et les «continueurs continentaux» de Newton en constituent précisément les meilleurs exemples. Et, en première ligne parmi eux, d'Alembert.

On remarque ainsi toute la portée épistémologique de la question de l'héritage et, en ce sens, la perspective qu'elle offre est beaucoup plus riche du point de vue de la compréhension historique qu'une formulation en termes de *paradigmes*. Nous examinerons maintenant comment d'Alembert lui-même se situait par rapport à cet «héritage», comment il en jugeait non pas seulement par rapport à lui-même, mais pour son époque, et le sens qu'il y trouvait, comme matière de profession de foi. Puis nous reprendrons quelques éléments de sa formation et de ses premières recherches, qui éclairent comment il reçut et intégra ces influences. Enfin, nous tenterons d'en saisir la marque dans la caractérisation de son style de pensée, en analysant son choix des principes et sa conception de la mathématisation de la dynamique. On peut résumer le sens profond de sa réorganisation de la dynamique des corps telle qu'il la proposa dans le *Traité de dynamique* en une phrase : *une intelligibilité cartésienne pour un programme newtonien*. Un autre élément d'héritage y concourut, comme nous venons déjà de le laisser entendre : le calcul différentiel leibnizien, qui permit à d'Alembert de penser les concepts caractéristiques de la mécanique comme des grandeurs différentielles, de les composer entre elles de manière homogène et de rapporter ainsi les lois du mouvement «au mouvement seul».

2

FILIACTION NEWTONNIENNE EN PHYSIQUE,
RATIONALITE ET ESPRIT CRITIQUE EN PHILOSOPHIE*La profession de foi newtonnienne de d'Alembert.*

Les déclarations publiques et privées ne manquent pas, par lesquelles d'Alembert s'est affirmé newtonien. En faire un florilège serait vite fastidieux. Aussi nous contenterons-nous d'évoquer le *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* qui a, sur ce sujet comme sur d'autres, la valeur d'une profession de foi, puisqu'aussi bien cette longue préface au grand ouvrage collectif et militant fut rédigée par son auteur dans l'intention d'en faire un véritable «manifeste de la philosophie des Lumières»⁸, ce qu'il fut en effet. D'autres textes parmi les plus importants de d'Alembert, comme l'*Essai sur les éléments de philosophie*, de 1758, ou des articles de l'*Encyclopédie* comme «Newtonianisme», ne font par la suite que confirmer et souligner ces déclarations, qui figurent dans la seconde partie, historique, du *Discours*.

Pour d'Alembert, l'œuvre de Newton a constitué le couronnement de la nouvelle pensée scientifique qui s'est développée après la «Renaissance des Lettres», pensée qui affirmait le libre exercice de la raison et de l'investigation de la nature. Son évocation vient, dans l'«exposition historique de l'ordre dans lequel nos connaissances se sont succédées», après celle de Descartes, dont nous reparlerons : l'œuvre de Newton a élevé un édifice dont seules les conditions générales avaient été jusqu'alors tracées (notamment par Bacon et, surtout, par Descartes). En présentant les grandes lignes de la pensée et de l'œuvre de Newton, d'Alembert les place d'emblée sous le signe des exigences qui ont été, à ses yeux, décisives dans l'avancée considérable qu'ont connue depuis les sciences : ce sont avant tout des exigences de méthode qui portent sur l'objet même de la physique, et conçues en fonction de celui-ci.

Newton, écrit-il, bannit «de la physique les conjectures et les hypothèses vagues», pour la soumettre uniquement «aux expériences et à la géométrie», inventant, sans doute en rapport à ce dessein, note d'Alembert, «le calcul de l'infini et la méthode des suites, d'usage étendu en géométrie et plus encore dans l'étude de la nature». Cet objet de la physique est précis et sa nécessité exclut la formulation d'hypothèses hasardeuses (première exigence) ; la physique repose sur deux piliers : celui de l'expérience qui nous enseigne les caractéristiques des phénomènes (deuxième exigence, qui porte sur l'objet, tel qu'il est donné), et celui de la théorie mathématique, c'est-à-dire la géométrie entendue dans le sens large de l'époque (troisième exigence, sur le type de description de l'objet). Sur ce dernier point, un pas décisif a été acquis avec Newton, qui marque nécessairement toute la physique désormais : le traitement théorique, mathématique, s'effectue par l'analyse (au sens du calcul différentiel).

⁸ Selon l'expression de R. N. Schwab, dans Schwab [1963].

Soit dit en passant, d'Alembert semble donner ici une justification naturaliste de l'application des mathématiques nouvelles : c'est en raison des «effets compliqués de ce que l'on observe dans la nature, où tout semble s'exécuter par des espèces de progressions infinies». Par-delà l'idée de continuité qui est au soubassement du calcul différentiel, et qui renverrait, plus encore qu'aux fluxions de Newton, à Leibniz, il faut sans doute voir dans cette remarque une allusion à des problèmes rencontrés dans sa pratique physico-mathématique, déjà bien assise à cette époque⁹, en mécanique des solides et des fluides et en astronomie, et tout particulièrement avec sa solution originale du problème des trois corps¹⁰ et les calculs de perturbations (par des séries) qui conduisaient à des solutions approchées.

C'est, précisément, en astronomie que la fécondité de l'œuvre de Newton s'était manifestée de manière éclatante, comme application de sa mécanique. Newton, rappelle d'Alembert, a créé la dynamique, et en particulier celle des mouvements des planètes : «Il enseigna tout ensemble et à distinguer les causes de leurs mouvements [des planètes], et à les calculer avec une exactitude qu'on n'aurait pu exiger que du travail de plusieurs siècles»¹¹. Il a donné, souligne encore d'Alembert, une «Théorie du Monde (car je ne veux pas dire son système)», où des énoncés sur les phénomènes, comme la loi de la pesanteur, sont *démontrés* : cela était totalement nouveau, par comparaison avec les inventions de l'imagination telles que les tourbillons de Descartes, qui prévalaient auparavant. Newton donna, poursuit-il, cette loi sans en proposer, ni en connaître, la «cause première», ce qu'on lui a reproché. Mais «après tout, quel mal aurait-il fait à la philosophie, en nous donnant lieu de penser que la matière peut avoir des propriétés que nous ne lui soupçonnions pas, et en nous désabusant de la confiance ridicule où nous sommes de les connaître toutes ?»¹² La remarque est beaucoup plus importante qu'il peut y paraître à première vue. Elle renvoie directement, en effet, à une conception «ouverte» du rationalisme propre à d'Alembert, sur laquelle nous reviendrons, et que l'on ne doit pas confondre avec un «positivisme» avant la lettre, auquel on a parfois voulu réduire sa pensée. Retenons, pour l'instant, cette formulation riche de sens, qui s'éclairera avec l'analyse épistémologique du concept d'*attraction* que d'Alembert proposa à l'article de l'*Encyclopédie* sous ce titre, paru dès le premier volume de l'ouvrage¹³.

Ceci, sans compter que Newton avait lui-même joint d'une manière unique l'expérience à la théorie, et d'Alembert, avec les autres philosophes et savants du siècle des Lumières, célébrait la manière dont il avait analysé la lumière blanche en la décomposant dans les diverses couleurs («Créateur d'une optique toute nouvelle, il fit connaître la lumière aux hommes en la décomposant»¹⁴).

⁹ Agé de 34 ans lors de la rédaction du *Discours préliminaire*, en 1751, d'Alembert était déjà célèbre pour ses travaux de mathématique, de mécanique et d'astronomie. Il avait, en particulier, résolu le problème (astronomique) de la précession des équinoxes.

¹⁰ Dans le mouvement de la Lune par rapport à la Terre, par exemple, il faut tenir compte de l'action perturbatrice du Soleil. Pour d'autres orbites (notamment celles des comètes), il faut prendre en compte les influences des très grosses planètes, Jupiter et Saturne, etc.

¹¹ DP, p. 130.

¹² DP, p. 131 ; voir aussi EP, et l'article «Attraction» de l'*Encyclopédie* : d'Alembert [1751c].

¹³ Article «Attraction». Voir plus loin.

¹⁴ DP, p. 130.

L'hommage mitigé de d'Alembert à Francis Bacon

Un autre «héraut» célébré de la méthode expérimentale et de l'observation - ainsi que du progrès scientifique - était Francis Bacon, dûment mentionné lui aussi dans le *Discours préliminaire*, à sa place chronologique dans le tableau historique. Toutefois, si l'on y regarde bien, sous la chaleur apparente des termes, le jugement que porte d'Alembert sur la contribution du chancelier au renouvellement des sciences est plutôt mitigé, bien plus réservé en tout cas que les dithyrambes qu'en faisait de son côté son collègue et ami Denis Diderot, notamment dans les *Pensées sur l'interprétation de la nature*¹⁵. Il laisse en effet entendre qu'il ne reste pas grand chose de positif pour les sciences elles-mêmes dans l'œuvre de Bacon.

A la sortie du Moyen-âge (période très dévaluée, injustement d'ailleurs, par les Encyclopédistes et les penseurs des Lumières de façon générale), «né dans le sein de la nuit la plus profonde», souligne d'Alembert¹⁶, Bacon proposa une classification du savoir et «fit le catalogue immense de ce qui restait à découvrir», avec ses ouvrages *De la dignité et de l'accroissement des connaissances humaines*, et le *Nouvel Organon*¹⁷. Il fit connaître «la nécessité de la physique expérimentale, à laquelle on ne pensait point encore», et d'Alembert compare ses écrits à ceux d'Hippocrate sur la médecine (ce qui sous sa plume n'est peut-être qu'un médiocre compliment, étant donné ce qu'il pensait de cette science, en particulier celle de son temps). Cela étant, il trouve que sa philosophie est «trop sage pour étonner personne», ce qui n'est pas non plus la marque d'un grand enthousiasme ; Bacon est resté, en effet, proche de la scolastique, s'avérant trop timide pour des vues nouvelles.

Finalement, ce que d'Alembert déclare lui devoir de plus clair (lui et l'entreprise de l'*Encyclopédie*), c'est un arbre encyclopédique des connaissances («Nous déclarons ici que nous devons principalement au chancelier Bacon l'arbre encyclopédique...»), lequel demande des remaniements, qui sont, au vrai, assez considérables. Lui-même a modifié, indique-t-il, les principes de la classification des sciences, en plaçant la raison avant l'imagination¹⁸. Et d'Alembert reproduit à la fin du *Discours* les deux classifications qui avaient été données antérieurement dans le *Prospectus* par Diderot, dont celle de Bacon, afin que chacun puisse distinguer «ce qui nous appartient d'avec ce que nous avons emprunté de lui»¹⁹. (Ce qui reste, c'est donc surtout l'*idée* d'un arbre des connaissances). On sait que le *Prospectus de l'Encyclopédie*, auquel d'Alembert se réfère, qui avait placé le projet de l'ouvrage sous la bannière du chancelier Bacon, avait été écrit de la main de Diderot quelque temps auparavant, comme brochure de propagande pour l'œuvre collective annoncée²⁰.

¹⁵ Diderot [1753].

¹⁶ DP, p. 125.

¹⁷ Bacon [1620, 1623].

¹⁸ DP, p. 127.

¹⁹ *Ibid.*, respectivement, p. 163-181.

²⁰ D'Alembert reproduit le *Prospectus* à la fin de son *Discours préliminaire* (TD, p. 144-162), marquant la solidarité des deux directeurs de l'*Encyclopédie*. Il est d'ailleurs vraisemblable que

Telle est sans doute la clé de la place réservée par d'Alembert à Francis Bacon dans l'exposé historique du *Discours préliminaire* : si les encyclopédistes le reconnaissaient pour l'un de leurs inspirateurs, c'était une référence de nature avant tout «idéologique», la référence intellectuelle proprement dite étant beaucoup plus le fait de Diderot que de d'Alembert²¹.

Car pour ce dernier, le vrai philosophe du savoir nouveau, c'était, en réalité, Descartes ; quant à celui à qui l'on devait véritablement l'introduction de la physique expérimentale, c'était Boyle²², et à Locke revenait la création de la métaphysique, dans le sens d'une «physique de l'âme»²³. Galilée, mentionné dans le *Discours* pour ses découvertes astronomiques et pour «sa théorie de l'accélération» en mécanique, est simplement mis au rang de ceux dont les travaux ont beaucoup contribué «à l'avancement des sciences, et ont pour ainsi dire levé un coin du voile qui nous cachait la vérité»²⁴. D'Alembert ne détache pas autrement son importance dans la naissance de la physique, pour laquelle il est clair que ce sont les contributions de Newton qui ont été, à ses yeux, déterminantes. Quant à Huygens, il a préparé la route de Newton (c'est assurément, à la fois peu et beaucoup...) ²⁵.

Descartes, vrai philosophe du savoir nouveau et ses limites

Dans le *Discours préliminaire*, l'évocation de Descartes dans la partie historique vient entre celles de Bacon et de Newton, avec pour chacun des trois un développement de longueur équivalente ; elle est reprise quelques pages plus loin, pour rappeler les tribulations de l'influence de Descartes, mal reçu et même combattu de son temps, dogmatisé ensuite, et la lutte contre un cartésianisme post-cartésien qui avait sévi au début du XVIII^e siècle, menée par les partisans de la physique newtonnienne et de la «philosophie anglaise», au premier rang desquels figurait Maupertuis²⁶.

d'Alembert ait au moins discuté avec Diderot de la rédaction du *Prospectus*, et j'incline pour ma part à penser que certaines remarques y sont de lui (voir, notamment, sur les mathématiques, p. 170-171, et, sur Bacon, p. 174). D'Alembert s'est encore plus explicitement démarqué des conceptions de Bacon dans les «Avertissements» aux ré-éditions du *Discours*, de 1753 et de 1767, en réponse à l'accusation portée par R.P. Berthier d'avoir pris chez Bacon l'essentiel des idées qui y sont exposées. D'Alembert y spécifie «le peu qu'[il] a tiré du chancelier d'Angleterre», «ce peu qu'[il] lui doit»...

²¹ Cette différence de jugement faisait partie de la controverse entre d'Alembert et Diderot sur le rôle des mathématiques dans la connaissance, et sur la place des données de pure observation. Sur ce point, voir Gusdorf [1972], Paty [1977].

²² DP, p. 133 : «Boyle, le père de la physique expérimentale».

²³ DP, p. 131-132 : «On peut dire qu'il créa la métaphysique comme Newton avait créé la physique», référence faite au *Traité de l'entendement humain* (Locke [1690]).

²⁴ DP, p. 133.

²⁵ DP, p. 130. Sans doute faut-il voir son importance à cet égard, selon la perspective de d'Alembert, dans sa formulation des lois du choc, corrigeant celles de Descartes (avec la bonne définition pour la quantité de mouvement, considérée non seulement en grandeur mais aussi en direction, cette dernière ayant été négligée par Descartes), dans son expression, indépendante de Newton, de la force centrifuge, et dans celle de la «force vive», reprise et systématisée par Leibniz.

²⁶ DP, p. 127-130 ; 134-136.

L'importance de Descartes dans ce tableau des progrès de la pensée scientifique et philosophique tient, pour d'Alembert, essentiellement au rôle clé qu'il a tenu dans le nouveau départ de la philosophie, grâce à des qualités d'exception. «Cet homme rare», écrit-il, «avait tout ce qu'il fallait pour changer la face de la philosophie : une imagination forte, un esprit très conséquent, des connaissances puisées plus dans lui-même que dans les livres, beaucoup de courage pour combattre les préjugés les plus généralement reçus, et aucune espèce de dépendance qui le forçât à les ménager»²⁷. En décrivant son apport, d'Alembert fait une distinction entre son œuvre *mathématique* et son œuvre *philosophique* («On peut considérer Descartes comme géomètre ou comme philosophe»), et le sens qu'il donne à ce dernier terme comprend d'une part la *physique*, c'est-à-dire la connaissance de la nature (la «philosophie naturelle» suivant l'acception classique), d'autre part la *métaphysique*²⁸.

La distinction entre l'œuvre du géomètre et celle du philosophe permet à d'Alembert d'opérer une différenciation dans ses jugements sur elles, par la diversité de nature qu'ont à ses yeux ces deux disciplines. La géométrie est une science où les connaissances ne peuvent que s'accumuler, puisqu'elle est de pure raison : «la géométrie, qui par la nature de son objet doit toujours gagner sans perdre...». Descartes lui fit faire des progrès sensibles²⁹, lui ouvrant de nouvelles voies, celle de la «méthode des indéterminées» en algèbre³⁰, et surtout «l'application qu'il a su faire de l'algèbre à la géométrie», c'est-à-dire la géométrie analytique. D'Alembert décrit l'importance de cette dernière en ces termes : «idée des plus vastes et des plus heureuses que l'esprit humain ait jamais eues, et qui sera toujours la clef des plus profondes recherches, non seulement dans la géométrie sublime [c'est-à-dire l'analyse, le calcul différentiel et intégral], mais dans toutes les sciences physico-mathématiques»³¹.

Relevons en particulier la dernière incidente, car elle désigne les raisons profondes de la mathématisation de la physique. D'Alembert témoigne ici de ce qu'il est bien conscient que ces raisons ont été formulées (avec leur mise en œuvre) par Descartes, avec sa conception des grandeurs continues³². Ce qui nous fournit sans attendre un élément fondamental de la filiation cartésienne de d'Alembert, car sa conception de la mathématisation des grandeurs physiques,

²⁷ DP, p. 128.

²⁸ Le *Prospectus de l'Encyclopédie*, rédigé par Diderot, faisait, quant à lui, une exacte équivalence entre la Philosophie et la Science («ces deux mots sont synonymes», est-il écrit dans l'«Explication détaillée du système des connaissances humaines»). «Science» était à entendre au sens de connaissance rationnelle en général, quelque soit son objet, et la philosophie était définie comme «la portion de la connaissance humaine qu'il faut rapporter à la raison». Cf. Diderot [1750], dans la version légèrement remaniée par d'Alembert, in DP, p. 166.

²⁹ «La géométrie, étant maniée par un aussi grand génie, ne pouvait manquer de faire des progrès très sensibles...» (DP, p. 128).

³⁰ Considérant l'inconnue, la traiter comme si elle était connue, et former ainsi l'équation du problème en fonction d'elle (cf. Descartes [1737]).

³¹ DP, p. 128 (souligné par moi, M.P.).

³² Conception développée dans les *Règles pour la direction de l'esprit*, notamment la règle 14 (Descartes [1628]), dans le *Discours de la méthode* (Descartes [1637]), ainsi que dans les *Principes de la philosophie* (Descartes [1644]).

comme celle de l'intelligibilité dont nous parlerons un peu plus loin, sont assurément cartésiennes et beaucoup plus éloignées de celles de Newton³³.

Vient ensuite l'appréciation sur sa «philosophie», qui comporte donc deux volets, la physique (avec la méthode) et la métaphysique. Dans ce domaine, s'«il a peut-être été aussi grand, (...) il n'a pas été si heureux», car «tout y était à commencer», et les premiers pas sont les plus difficiles : du moins, nous a-t-il «ouvert la route». D'Alembert veut tenir un juste équilibre entre l'excès dans l'appréciation de ses partisans aveugles (ses «sectateurs») et le dénigrement de ses adversaires : «il n'a pas été aussi loin [sur cette route] que ses sectateurs le croient», mais «il s'en faut de beaucoup que les sciences lui doivent aussi peu que le prétendent ses adversaires»³⁴. Sa *méthode*, sa *dioptrique* sont des réalisations qui assurent sa grandeur. La première «seule aurait suffi pour le rendre immortel», et la seconde «est la plus grande et la plus belle application qu'on eût faite encore de la géométrie à la physique».

Quant à ses contributions aux autres domaines de la physique, elles sont désormais caduques, mais elles manifestent aussi bien que les autres son «génie inventeur». Même sa théorie des tourbillons (que d'Alembert attaque vivement par ailleurs, dans la mesure où elle était désormais totalement dépassée par la théorie newtonnienne de la gravitation), elle était, pour son époque, «une des plus belles et des plus ingénieuses hypothèses que la philosophie ait jamais imaginées». Elle représente même une étape qui fut nécessaire pour parvenir à la théorie de la gravitation newtonnienne : «il a fallu, pour ainsi dire, passer par les tourbillons pour arriver au vrai système du monde». En bref, «Descartes, forcé de créer une physique toute nouvelle, n'a pu la créer meilleure». Quant aux lois du mouvement, «s'il s'est trompé sur [elles], il a du moins deviné le premier qu'il devait y en avoir»³⁵.

Il reste que, concernant la physique comme la métaphysique, D'Alembert critique Descartes pour avoir cru tout pouvoir expliquer par son système³⁶, pour avoir énoncé des lois trop générales, insuffisamment fondées sur l'attention à la connaissance des phénomènes naturels, pour s'être livré à des constructions arbitraires de l'imagination (Voltaire parlait des romans de Descartes)...

Cependant, en métaphysique aussi son apport ne fut pas seulement négatif. La métaphysique de Descartes «fut aussi ingénieuse et nouvelle que sa physique», et il eut un rôle de pionnier dans la nouvelle acception de ce domaine de la connaissance qu'il contribua de manière décisive à déterminer. Descartes a indiqué la voie de la libération des esprits, secoué mieux que quiconque «le joug de la scolastique, de l'opinion, de l'autorité», «préparant une révolution éclatante»³⁷ dans le domaine de la pensée, et jeté les fondements de la vraie philosophie, celle qui fleurit avec les Lumières : et il est grandement significatif

³³ Newton était tributaire de conceptions néo-platoniciennes, dont relèvent ses notions de grandeurs «absolues et mathématiques», et mathématiques parce qu'absolues. Sur la notion de grandeur en mathématiques et en physique, et sur le rôle décisif de la pensée cartésienne dans sa compréhension ultérieure, voir Paty [à paraître, a].

³⁴ DP, p.128.

³⁵ DP, p.128-129.

³⁶ Voir aussi EP, p. 470 («Cette fureur d'expliquer tout»). (E P : voir, dans la bibliographie, d'Alembert [1758]).

³⁷ «... Cette révolte dont nous recueillons aujourd'hui les fruits» (DP, p. 129).

que la philosophie des Lumières se soit reconnue tributaire de Descartes, puisqu'aussi bien ce terme même, par lequel elle se désignait, était emprunté aux «lumières de la raison» de l'auteur du *Discours de la méthode*³⁸.

Ce que d'Alembert reconnaît chez Descartes de plus important pour la philosophie, c'est assurément son «doute méthodique», qui recèle en puissance la capacité de faire avancer la connaissance, en abattant toutes les fausses certitudes : «S'il a fini par croire tout expliquer, il a du moins commencé par douter de tout»³⁹. Et l'on peut comprendre combien chez ce sceptique qu'était pour une part d'Alembert, et qui s'était toujours affirmé - non sans affinité avec la personnalité de Descartes - indépendant et soucieux de le demeurer, cette dimension était importante, et comme une règle de vie intellectuelle. D'ailleurs, d'Alembert a cette phrase, qui montre combien lui-même - et les autres «philosophes» - sont tributaires de Descartes même lorsqu'ils le critiquent : «Les armes dont nous nous servons pour le combattre ne lui en appartiennent pas moins parce que nous les tournons contre lui»⁴⁰. On ne saurait mieux faire l'éloge d'un maître en liberté de l'esprit.

L'héritage cartésien de d'Alembert ne se limite pas à ce qu'il en reconnaissait lui-même, ou du moins à ce qu'il en disait explicitement. Nous avons laissé entendre qu'il y a du Descartes en d'Alembert, dans sa conception de la mathématisation et de l'intelligibilité rationnelle pour les principes et pour les objets des sciences, et l'on peut ajouter aussi dans sa conception de la certitude en relation à la simplicité de l'«objet» considéré par la pensée. Quand il écrit, plus haut dans le *Discours préliminaire*, que la certitude est fondée «sur des principes nécessairement vrais et évidents par eux-mêmes»⁴¹, d'Alembert énonce une proposition cartésienne.

En fait, la conception cartésienne de l'intelligibilité et de la certitude, sur laquelle d'Alembert ne dit rien dans son évocation historique (sinon de manière implicite, quand il souligne l'impulsion considérable que Descartes donna malgré tout à la philosophie), se trouve effectivement présente dans la première partie du *Discours*, qui porte sur «la généalogie et la filiation de nos connaissances», c'est-à-dire sur «l'origine et la génération de nos idées»⁴². Bien qu'il y adopte d'emblée un point de vue non-cartésien, sinon anti-cartésien, en prenant comme point de départ que «le principe de toutes nos connaissances» réside dans nos sensations, suivant Locke (et sa réfutation des idées innées cartésiennes) et Condillac⁴³, il retrouve une formulation bien proche de Descartes lorsqu'il envisage la question de la certitude de ces connaissances.

Il lui apparaît que toutes nos connaissances ainsi acquises, par abstraction et simplification à partir des données sensibles, restent encore très incertaines, et qu'elles s'étendent en fait, entre deux *limites de certitude*, «où se trouvent, pour ainsi dire, concentrées presque toutes les connaissances certaines

³⁸ Voir à ce sujet, notamment, Cassirer [1932].

³⁹ DP, p. 129.

⁴⁰ DP, p. 129.

⁴¹ DP, p. 96.

⁴² DP, p. 84.

⁴³ «Toutes nos connaissances directes se réduisent à celles que nous recevons par les sens ; d'où il s'ensuit que c'est à nos sensations que nous devons toutes nos idées» (DP, p. 84). Pour une analyse de la «théorie de la connaissance» de d'Alembert, voir Paty [1977].

accordées à nos lumières naturelles». A une extrémité, l'on trouve «l'idée de nous-mêmes», «ce principe pensant qui constitue notre nature», qui constituait la première étape de son examen des connaissances à partir des sensations⁴⁴, et qui rappelle fort le «je pense donc je suis» cartésien⁴⁵. (Soit dit en passant, la nature réflexive de cette première étape suffirait à nous faire fortement douter que d'Alembert soit «empiriste» en matière de connaissance, comme on a pu l'écrire⁴⁶). A l'autre extrémité, se tient la connaissance mathématique dont l'objet est abstrait à partir de la considération de la nature : «cette partie des mathématiques qui a pour objet les propriétés générales des corps, de l'étendue et de la grandeur»⁴⁷. Et c'est encore une idée cartésienne, celle de la certitude des mathématiques, dont l'objet est de pure raison⁴⁸. C'est à ramener la mécanique à une certitude de ce type que sont allés les efforts de d'Alembert, dès son *Traité de dynamique*, où il cherche, et trouve, une formulation des propriétés fondamentales en termes de *principes*, qu'il devait d'ailleurs s'efforcer par la suite de tenter de justifier totalement en raison (une préoccupation dont l'inspiration cartésienne serait évidemment difficilement niable)⁴⁹.

Nous pouvons pressentir, par ces «déclarations de principe», que si d'Alembert se veut en matière de physique et de méthode scientifique dans la lignée de Newton, ce n'est assurément pas d'une manière exclusive, puisqu'il reconnaît d'autres exigences de la pensée et d'autres inspirateurs, au premier rang desquels se trouve Descartes, avec ses vues sur l'intelligibilité rationnelle pour la pensée en général et pour la science, auxquelles nous ajouterons sa conception des grandeurs mathématisées de la physique⁵⁰. On entrevoit par là que, loin de se tenir confinée à l'intérieur de quelque «paradigme newtonien», sa pensée s'est alimentée aussi d'une manière fondamentale à ces autres exigences, déterminant ainsi un chemin propre et une voie originale pour la physique. Et cette voie, nous le savons par l'examen de son oeuvre scientifique, fut remarquablement créatrice et féconde, sans doute en raison de cet *héritage* revendiqué et de la *liberté* qu'en même temps il s'y reconnaissait, dans une veine d'ailleurs bien cartésienne.

⁴⁴ DP, p. 95, 85.

⁴⁵ Descartes [1637]. Voir Paty [1977], p. 102-104, 121-124, 381.

⁴⁶ Michel Malherbe, dans son introduction à sa récente édition du *Discours préliminaire* (DP, p. 9-81) : voir p. 60. Pour M. Malherbe, d'Alembert est empiriste concernant la connaissance en général et aussi en physique (même mathématisée, puisque ses principes seraient d'origine empirique). Ce jugement me semble reposer sur une acception beaucoup trop générale du terme «empirisme», puisque, à le suivre, le fait d'admettre que sans les sensations il n'y aurait pas de connaissance, et que sans observation de phénomènes il n'y aurait pas de physique, suffirait à vous rendre empiriste. A ce compte, tout le monde depuis ce temps-là serait empiriste. Le jeu de l'empirique et du rationnel me paraît autrement complexe, pour le XVIII^e siècle aussi bien que pour aujourd'hui.

⁴⁷ DP, p. 95.

⁴⁸ Descartes [1628, 1637].

⁴⁹ Mais dans un sens qui correspondrait plutôt à la part du cartésianisme qu'il critiquait. Voir les diverses tentatives de d'Alembert de *démontrer* par la seule raison les trois principes du mouvement des corps, notamment dans les *Opuscules mathématiques* (d'Alembert [1761-1780], en particulier : vol. 1, 1761 ; vol. 6, 1773 ; vol. 9, 1880 ...).

⁵⁰ Sur ce point, voir Paty [à paraître, a].

La pensée de Leibniz

Le *Discours préliminaire* fait une place plus modeste, certes, mais très significative, dans «l'exposition historique» (que d'Alembert qualifia aussi d'«histoire philosophique des progrès de l'esprit humain»⁵¹), à Leibniz⁵². Invention du calcul différentiel oblige, assurément (mais pas seulement, on va le voir), calcul dont d'Alembert évoque dans cette partie du texte la co-invention par Leibniz et Newton : sujet sur lequel il devait s'étendre plus tard, dans l'article «Différentiel», avec une grande objectivité⁵³. On ne saurait en minimiser l'importance, puisque c'est dans la ligne de Leibniz, de ses notations et de sa théorie du calcul, que d'Alembert le pratiquait lui-même, tant en mathématique qu'en physique, tout en ne se satisfaisant pas de la «métaphysique» assez obscure qui l'accompagnait, ce qui l'incita à proposer une «interprétation» plus claire et rigoureuse des grandeurs «différentielles» ou «infinitésimales».

Il justifiait l'usage symbolique des quantités «infinitésimales» par le fait que, lors du passage à la *limite* (où chacune d'elle devenait nulle), leur rapport restait fini, et donc avait un sens : ce sens revenait à celui des fluxions ou des «premières et dernières raisons des grandeurs» newtoniennes⁵⁴. Notons cependant une différence fondamentale entre les fluxions newtoniennes et les dérivées sous leur forme différentielle, leibnizienne : c'est que ces dernières permettent de penser de manière effective et opératoire des grandeurs aussi bien finies qu'arbitrairement (infiniment) petites, et de les utiliser dans le raisonnement, en mathématiques comme en physique, au même titre que des grandeurs finies. Telle fut la portée de l'élucidation par d'Alembert de la notion mathématique de limite⁵⁵. Cette «nouvelle pensée des grandeurs» venait en complément à sa conception (cartésienne) de l'intelligibilité des grandeurs (ou quantités) mathématiques et physiques conçues sur le mode des dimensions spatiales en géométrie, en élargissant ainsi le concept de grandeur des valeurs finies à des formes différentielles. L'effet de cette «nouvelle pensée des grandeurs» sur son œuvre propre fut considérable, même si lui-même ne l'a pas explicité aussi précisément que nous pouvons le faire, probablement parce qu'il ne s'était que fort peu intéressé au formalisme en lui-même (au contraire de Leibniz), tout en le pratiquant.

D'Alembert ne fait pas mention, dans son évocation de Leibniz, des contributions de ce dernier à la mécanique : elles étaient, à ses yeux, éclipsées par celles de Newton. Du moins reprit-il le terme de «dynamique», forgé dans le sens moderne par Leibniz, et répandu par les disciples de ce dernier. Il se justifie, dans le *Traité de dynamique*, d'employer ce terme jusque dans le titre de son ouvrage, tout en évitant de recourir aux forces⁵⁶, et l'on pourrait voir, dans l'énoncé de sa

⁵¹ Avertissement à l'édition de 1753 du *Discours préliminaire*, in DP, p. 81. On notera, en passant, que l'expression «progrès de l'esprit humain» sera reprise par son disciple Condorcet, dans *l'Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* (rédigée en 1793) qui reprend d'une certaine façon, près d'un demi-siècle après, le projet du *Discours préliminaire* de d'Alembert (Condorcet [1794], cf. Paty [1990]).

⁵² DP, p. 133-134.

⁵³ D'Alembert [1754]. Voir aussi «Fluxions» (d'Alembert [1756b]).

⁵⁴ Newton [1687], livre I. Cf. Paty [1994].

⁵⁵ Article «Différentiel» (D'Alembert [1754a]). Cf. Paty [1977, 1998].

⁵⁶ D'Alembert [1743].

conception propre, une prise de distance par rapport à Newton, inspirée, fût-ce indirectement, par Leibniz.

Mais ce qui retient, en fait, d'Alembert chez Leibniz, c'est, plus que les réalisations du savant, l'originalité et la puissance du philosophe et du métaphysicien, sans en avoir lui-même partagé les vues pour autant. Il range, dans l'évocation du *Discours préliminaire*, Leibniz auprès de Descartes, pour avoir osé s'interroger par lui-même sur les «questions les plus élevées, sur l'union du corps et de l'âme, sur la Providence, sur la nature de la matière», insatisfait des réponses traditionnelles, et pour avoir su en déceler «avec plus de force que personne» les immenses difficultés. Comme Descartes, Leibniz «ne s'est pas contenté de former des doutes, il a cherché à les dissiper», et il ne pouvait, lui aussi, qu'échouer, avec «son principe de la raison suffisante, très beau et très vrai en lui-même», mais inopérant ; avec ses «monades», qui «prouvent tout au plus qu'il a vu mieux que personne qu'on ne peut se former une idée nette de la matière» ; avec son «harmonie préétablie», qui «n'ajout[e] qu'une difficulté de plus à l'opinion de Descartes sur l'union du corps et de l'âme» ; et avec son «système de l'optimisme», qui peut être dangereux en croyant pouvoir «expliquer tout». S'il a «porté dans la métaphysique plus de sagacité que de lumière», Leibniz mérite, conclut d'Alembert, l'admiration pour «la grandeur de ses vues en tous genres, l'étendue prodigieuse de ses connaissances, et surtout l'esprit philosophique par lequel il a su les éclairer»⁵⁷.

En somme, comme Descartes, Leibniz, pour d'Alembert, est un maître en esprit philosophique. Et les deux, à cet égard, avaient éminemment, au fond, à ses yeux, ce qui manquait à Newton, lequel ne «caus[a] sur ce point aucune révolution», s'étant abstenu de développer ses pensées métaphysiques⁵⁸. Cette métaphysique qui est, écrit d'Alembert, «la base de nos connaissances», et dans laquelle il faut chercher «des notions nettes et exactes de tout»⁵⁹, selon la conception positive de la métaphysique, commune à de nombreux penseurs du XVIII^e siècle, qui s'oppose à l'ancienne (celle de la scolastique), et qui se confond en grande partie avec la théorie de la connaissance, de Locke à Kant, en passant par d'Alembert⁶⁰. Pour lui, Descartes et Leibniz avaient montré la nécessité d'une telle métaphysique, en démontant les constructions antérieures et en posant les exigences de l'esprit critique, qui constituaient à ses yeux l'essentiel de la philosophie. Leur défaut fut, sur la ruine des systèmes antérieurs, d'avoir pensé pouvoir leur substituer leurs propres systèmes, alors que la philosophie, dans son approche critique, devait se garder de telles constructions mal assurées : elle devait, au contraire, se contenter d'établir ce qui peut être solidement connu, comme ses propres *Eléments de philosophie* tenteraient de s'y employer⁶¹.

⁵⁷ DP, p. 133-134.

⁵⁸ DP, p. 131.

⁵⁹ DP, p. 131.

⁶⁰ Voir Paty [1977].

⁶¹ D'Alembert [1758] ; voir Paty [1977].

3

HERITAGE INTELLECTUEL ET APPRENTISSAGE

Le «profil», ou le «style», scientifique de d'Alembert se laisse bien caractériser, pour l'essentiel, en mathématique comme en physique, comme une mise en œuvre de l'approche analytique, au sens de la «nouvelle analyse», celle du calcul différentiel et intégral, qui avait succédé, dans le premier quart du XVIII^e siècle, à l'analyse au sens de Descartes, et que l'on appelait aussi «analyse sublime» ou, désormais, simplement «analyse». Les premiers développements du calcul différentiel leibnizien et des fluxions newtoniennes avaient été effectués sur le continent (la situation en Angleterre étant différente), d'abord par Leibniz lui-même (qui avait inventé, outre les règles du calcul, les notations qui sont restées, pour les éléments différentiels, et le signe de l'intégrale⁶²) et par ses disciples de Bâle, les frères Jacques et Jean Bernoulli, vers le tournant du siècle.

Ces derniers avaient été relayés par leurs disciples, qui diffusèrent ces développements par des ouvrages, notamment le marquis de l'Hôpital (auteur de *l'Analyse des infiniments petits pour l'intelligence des lignes courbes*, 1696) et Pierre Varignon (à qui l'on doit les notations différentielles pour la vitesse et l'accélération en cinématique) avec le groupe malebranchiste⁶³. Il faut aussi mentionner les *Eléments de la géométrie de l'infini*, de Fontenelle (1727), où étaient notamment discutés les problèmes posés par les quantités infinitésimales, du point de vue de leur signification et de leur compréhension. Quant au calcul des fluxions de Newton, il était également connu et enseigné⁶⁴.

Le calcul différentiel et intégral fut ensuite adopté par l'Académie des sciences de Paris, où de jeunes savants remarquables comme Alexis Clairaut et Alexis Fontaine firent faire d'importantes avancées à l'analyse, parallèlement aux travaux qu'un Leonhard Euler, disciple des Bernoulli, effectuait de son côté, d'abord à Bâle puis à Saint-Petersbourg et à Berlin.

L'apprentissage de d'Alembert se fit, précisément, quand ces innovations se trouvaient, pour l'essentiel, assimilées et développées : l'outil mathématique étant à peu près au point, il s'agissait dès lors de l'employer, et de le développer (et, également, d'en éclairer la nature, c'est-à-dire la signification des quantités infinitésimales). D'Alembert avait reçu, au Collège des Quatre-Nations, des rudiments de formation mathématique, qui comprenaient sans doute le contenu de l'enseignement qu'y avait donné naguère Varignon (et publiés en 1731 sous le titre *Eléments de mathématique*)⁶⁵. Mais c'est essentiellement dans

⁶² dx et $\int dx$.

⁶³ Vitesse et accélération s'écrivent, respectivement : $v = \frac{dx}{dt}$ et $y = \frac{ddx}{dt^2}$. Voir les textes de Leibniz sur le calcul différentiel (Leibniz [1849-1863, 1989]), Hospital [1696], Fontenelle [1696, 1727], Varignon [1714, 1731], la correspondance de Jean Bernoulli avec Pierre Varignon, *in* Bernoulli [1988, 1992]. Cf., notamment, Robinet [1960], Blay [1992].

⁶⁴ La théorie des fluxions de Newton avait été exposée notamment dans son ouvrage *La méthode des fluxions et des suites infinies*, publié en latin en 1679 et en anglais en 1739, et traduit en français en 1740 par Buffon (cf. Newton [1679]).

⁶⁵ Cet enseignement, correspondant à deux années d'études, comportait des «éléments de géométrie» (divisés en «géométrie spéculative», c'est-à-dire théorique, qui portait sur les lignes,

les livres qu'il apprit la géométrie et l'analyse (et surtout l'analyse infinitésimale⁶⁶). Dès l'âge de dix-neuf ans il était déjà complètement familiarisé avec l'analyse, comme en témoigne un long manuscrit de cette époque⁶⁷. Quant à la physique enseignée au Collège, elle était moins avancée : elle restait spéculative, sans aucune initiation expérimentale, était au mieux cartésienne (on enseignait la théorie des tourbillons) et ignorait Newton.

Parmi les lectures auxquelles d'Alembert puisa sa connaissance approfondie de l'analyse, les œuvres de Jean Bernoulli occupent une place privilégiée, comme il en témoigna lui-même plus tard, dans son «Eloge de Bernoulli»⁶⁸. Ce texte témoigne de l'influence qu'eut sur sa propre formation intellectuelle, comme sur celle de beaucoup de savants de son temps, et bien qu'il ne l'ait pas connu directement, le mathématicien bâlois Jean (I) Bernoulli (cartésien et malebranchiste, mort en 1748) : «Bernoulli ne m'était connu que par ses ouvrages ; je leur dois presque entièrement le peu de progrès que j'ai fait en géométrie.» Géométrie signifiant ici aussi bien l'analyse différentielle et ses applications, notamment à des problèmes de mouvement des corps soumis à diverses contraintes. De fait, bien des problèmes d'analyse ou de mécanique abordés par d'Alembert au début de sa carrière (et notamment dans le *Traité de dynamique*), prennent leur inspiration dans les recherches de Jean Bernoulli, tout en suivant des méthodes différentes (Bernoulli utilisait la conservation des forces vives, d'Alembert son théorème de la dynamique).

Les disciples de Malebranche s'en étaient tenus à assimiler et à diffuser l'analyse pure, ainsi que ses applications immédiates concernant la cinématique, œuvre de Leibniz et des Bernoulli, de Varignon et d'autres, tandis que la physique de Newton était restée encore largement ignorée ou, sinon, combattue. C'est par un tout autre canal, et bien plus tardivement, qu'elle était parvenue en France et plus généralement sur le continent européen, avec ses lois du mouvement, sa théorie de l'attraction de gravitation, son explication des lois du mouvement des planètes ou «système du monde», et sa théorie de la lumière et de l'optique. Cette introduction fut en grande partie le résultat des efforts de Pierre Louis Moreau de Maupertuis et d'Alexis Clairaut, auxquels on n'oubliera pas de joindre Voltaire⁶⁹. La mesure d'un degré d'arc de méridien terrestre à l'équateur et au cercle polaire, effectuée sous l'égide de l'Académie des sciences de Paris,

les surfaces, les propriétés des corps solides, et en «géométrie pratique», relative à la mesure des surfaces et des volumes), des «éléments d'algèbre et d'arithmétique» (organisés suivant les «opérations élémentaires, proportions, fractions, racines, équations»), ainsi que des éléments de trigonométrie sphérique.

⁶⁶ Profitant des nombreux ouvrages de la bibliothèque du Collège, il se nourrissait des grands auteurs comme Descartes ou Fermat, et lisait aussi des ouvrages moins considérables mais plus récents, tels que *L'application de l'Algèbre à la Géométrie* de M. Guisnée (livre paru en 1705 et ré-édité en 1733), *L'Analyse des Infiniments Petits* du Marquis de l'Hôpital, *L'Analyse démontrée* de Reyneau (parue en 1708, puis ré-éditée avec des additions par Varignon en 1736-1738).

⁶⁷ D'Alembert, manuscrit de 72 pages intitulé «Remarques et éclaircissements sur différents endroits de *L'application de l'Algèbre à la Géométrie* de M. Guinée».

⁶⁸ Ce n'était pas un éloge académique, comme il en ferait ultérieurement, mais un article publié dans le *Mercure de France* de mars 1748, peu après la mort du mathématicien bâlois, sous le titre «Mémoire historique sur la vie et les ouvrages de M. Jean Bernoulli» (voir d'Alembert [1748]).

⁶⁹ Voltaire avait publié ses *Lettres anglaises* en 1734 et ses *Eléments de la philosophie de Newton* en 1738. La première traduction française des *Principia* de Newton, faite par la marquise du Châtelet, avec l'aide de Clairaut, était prête en 1749, et parut en 1756-1759. Voir Brunet [1931].

décidée dès 1735, avait confirmé par son résultat la prédiction de la théorie newtonnienne de la gravitation (selon laquelle la forme de la Terre est un sphéroïde aplati), contre la conception adverse (d'un sphéroïde allongé), défendue par le directeur de l'Observatoire de Paris, Jacques Cassini⁷⁰.

Les newtoniens avaient donc désormais droit de cité sur le continent, en particulier à l'Académie des sciences de Paris (dont Clairaut et Maupertuis étaient membres), et la «philosophie naturelle» de Newton était déjà largement répandue dans le public. Cela ne s'était pas fait sans mal, comme on le sait, et comme d'Alembert le rappelait à l'occasion. Dans sa contribution à l'article «Cartésianisme» de l'*Encyclopédie* (rédigé entre 1749 et 1751, et paru en 1752, dans le volume 2), il témoigne de ce que le newtonianisme, adopté assez tardivement en France, y dominait désormais : «Ce n'est que depuis environ 18 ans, écrit-il, qu'il s'est élevé des newtoniens en France : mais ce mal (car il y a des gens pour qui c'en est un), a prodigieusement gagné ; toutes nos Académies maintenant sont newtoniennes, et quelques professeurs de l'Université de Paris enseignent aujourd'hui ouvertement la Philosophie Anglaise»⁷¹.

D'Alembert put lire, vers 1739, les premiers volumes de la nouvelle édition en latin, publiée à Genève (en 4 tomes, parus de 1739 à 1744), des *Principia* de Newton préparée par les Révérends Pères Thomas Le Seur et François Jaquet, qui comportait d'importantes notes de bas de page où les raisonnements géométriques de Newton, aussi bien que son utilisation, plus rare, des fluxions, étaient souvent transcrits dans le symbolisme leibnizien du calcul différentiel et intégral⁷². Il lut également le *Traité des fluxions* de Mac Laurin dès sa parution en 1742, l'assimilant très vite, puisque cet ouvrage est cité dans son *Traité de dynamique* de 1743⁷³. A l'Académie, il prit aussi connaissance des travaux de ses aînés, Dortous de Mairan, Maupertuis, Clairaut et Fontaine.

Dès 1739 et surtout à partir de 1741, d'Alembert adressa des mémoires originaux à l'Académie des sciences qui inauguraient une riche série de recherches en analyse (sur les équations algébriques et les équations différentielles)⁷⁴, en hydrodynamique puis en mécanique et en astronomie, pour ne mentionner que les sujets principaux. Parmi ses premiers travaux, il est utile de mentionner les trois mémoires sur le mouvement des corps solides dans les fluides (de 1741 et 1742), qui montrent comment il s'orienta très vite vers l'étude analytique différentielle des problèmes de mécanique. Il aborda ce sujet dans une perspective que l'on peut dire située entre Descartes et Newton, et qui était celle de l'Académie à l'époque, comme un problème de *réfraction*, ce dont son

⁷⁰ Les deux missions envoyées au Pérou (avec La Condamine et Bouguer), et en Laponie (avec Maupertuis et Clairaut), firent connaître leurs observations en 1737 pour la seconde et en 1743-1744 pour la première. Sur les deux théories alors en vigueur pour l'attraction de gravitation sur la Terre (loi de Newton de la force comme l'inverse carré de la distance, ou loi de la force d'attraction constante à l'intérieur de la Terre), voir Clairaut [1743], d'Alembert [1756a] ; Passeron [1994], Greenberg [1995].

⁷¹ D'Alembert [1752b].

⁷² Cette édition, plusieurs fois réimprimée, fut la plus diffusée tout au long du XVIII^e siècle. Il existe un manuscrit attribué à d'Alembert, datant de cette époque, intitulé «Remarques sur quelques endroits des principes de Newton».

⁷³ D'Alembert [1743], p. 37.

⁷⁴ Travaux (surtout ceux d'analyse) qui lui valurent d'entrer à l'Académie des sciences comme associé astronome adjoint, à l'âge de vingt-quatre ans, sur la proposition de Dortous de Mairan et de Clairaut.

appellation d'alors témoigne («réfraction d'un corps solide dans un liquide»), maintenue longtemps après, et par d'Alembert lui-même⁷⁵, par analogie avec le parcours de la lumière. Cette analogie, proposée initialement par Descartes, avait été par la suite transcrite dans les termes de la théorie corpusculaire de la lumière de Newton, qui semblait justifier directement le parallèle : puisque la lumière était constituée de corpuscules, les lois de sa propagation devaient être considérées, pensait-on, comme un cas particulier de celles du mouvement des corps.

Remarquons, incidemment, que c'est dans cette perspective que Maupertuis conçut, en 1744, son «principe de moindre action», qu'il voulait substituer au principe de Fermat pour la lumière, principe selon lequel le trajet de la lumière traversant plusieurs milieux est celui pour lequel son temps de parcours est minimum. Le principe de Maupertuis posait que tous les corps suivent un parcours pour lequel leur «quantité d'action» est minimum, l'«action» étant définie par lui comme le produit de la masse par la vitesse et par le chemin parcouru.

Maupertuis et Dortous de Mairan avaient poursuivi à l'Académie des sciences de Paris, au cours des années précédentes, des recherches sur la «réfraction des solides dans les fluides» considérée comme un problème de réfraction, et d'Alembert commença les siennes propres avec la même orientation. Mais il se rendit très vite compte que l'analogie n'était pas opérante, et qu'il fallait s'en tenir à considérer le problème hydrodynamique dans sa spécificité, sans lui étendre indûment les lois de la réfraction de la lumière : «Il résulte de mes démonstrations», indique-t-il dans son premier mémoire sur le sujet, «qu'aucune des lois qu'on observe dans la réfraction de la lumière ne doit avoir lieu dans celle des corps solides, et qu'ainsi c'est mal à propos qu'on a fait dépendre l'une et l'autre réfraction des mêmes principes»⁷⁶.

Faisons encore, à ce propos, une parenthèse : peut-être tenons-nous ici une clef du peu d'enthousiasme que d'Alembert manifesta par la suite pour le «principe de moindre action» de Maupertuis, fondé sur cette fausse analogie, sans compter la justification finaliste, de nature métaphysique, invoquée par son auteur, qu'il ne pouvait, quant à lui, admettre pour légitimer un principe de la physique. Mais il en constata, cependant, l'intérêt, en faisant remarquer que le principe de Fermat et celui de moindre action, utiles chacun dans leur domaine, présentent une certaine parenté formelle⁷⁷. (Le principe de moindre action serait cependant repris, en raison de son intérêt du point de vue formel, par Lagrange, qui l'utiliserait, en 1761, pour développer le calcul des variations dont Euler avait posé les premiers jalons. Mais Lagrange l'abandonnerait ensuite au profit du principe de d'Alembert, et il faudrait attendre la formulation de la mécanique par Hamilton pour que le principe de moindre action prenne toute sa force en physique.)

⁷⁵ Voir les reprises périodiques qu'il en fit dans ses *Opuscules mathématiques* (D'Alembert [1761-1783]).

⁷⁶ Voir Grimberg et Paty [à paraître].

⁷⁷ D'Alembert [1751b]. Voir Paty [1977]. L'identification des deux principes ne serait pensable qu'avec la théorie de la relativité restreinte. C'est en le réalisant que Louis de Broglie serait amené, en 1923, à concevoir l'extension de la dualité onde-corpuscule, établie par Einstein en 1916 pour la lumière, à tout élément de matière.

D'Alembert poursuit donc le traitement de son problème d'un solide s'enfonçant dans un fluide (dès le premier mémoire de 1741 et dans les deux contributions suivantes de 1742), en n'employant que des notions et des propriétés relatives aux corps matériels solides et fluides, comme le volume d'un élément différentiel de fluide et sa vitesse, ainsi que la relativité des mouvements, utilisée par Newton dans un cas semblable⁷⁸, qui permettait de considérer indifféremment que le solide s'enfonce dans le fluide ou que c'est, au contraire, le fluide qui s'écoule autour du solide. En réalité, ces problèmes étaient d'une trop grande complexité pour être traités de manière satisfaisante avec les moyens mathématiques dont il disposait, et ce n'est qu'avec l'utilisation de son calcul aux dérivées partielles qu'il parviendrait à en donner une formulation totalement analytique⁷⁹.

D'Alembert se porta entretemps vers des problèmes de corps solides en formulant son *principe* ou *théorème de la dynamique*, qui fait la substance de son *Traité de dynamique*, lu en 1742-1743 devant l'Académie, et qu'il fit paraître en volume en 1743. Puis il reprit, en 1744, dans son *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*, le traitement du problème de résistance des fluides effectué en 1741-1742, sans y rien changer, mais en le présentant comme une «application de son principe de la dynamique»⁸⁰. Il n'en était, en fait, une «application» qu'après coup, puisqu'il avait préexisté à l'énoncé du théorème de la dynamique. Il est bien vraisemblable que ce soit, au contraire, ce traitement particulier qui ait suggéré à d'Alembert son principe, comme une généralisation à tous les corps de ce qu'il avait conçu pour le problème d'enfoncement d'un solide dans un fluide. Cet enfoncement contre la résistance du fluide impliquait l'annulation des mouvements (différentiels) virtuels correspondant à des actions compensées en sens opposés : ceci lui aura sans doute suggéré un rapprochement avec le problème du pendule composé, les mouvements compensés dans le liquide apparaissant comme équivalents aux liaisons pour les solides⁸¹. La représentation de l'effet des liaisons comme annulation de mouvements virtuels opposés est en effet l'idée centrale de son principe de la dynamique.

D'Alembert tenait alors le fil de son orientation propre dans les problèmes de physique, qui prenait d'entrée la perspective d'une unification de la mécanique (science du mouvement) à toutes les sortes de corps. Elle se situait dans la direction de la physique de Newton, tout en mettant en œuvre l'outil mathématique (et, en fait, conceptuel) du calcul différentiel leibnizien, avec une exigence d'intelligibilité cartésienne. Son premier acte original, dans cette voie qui lui était désormais ouverte, fut, en même temps qu'une première analytisation systématique de la mécanique sous l'égide de son principe synthétique (le «principe de la dynamique» de d'Alembert), de réorganiser conceptuellement ce qu'il est convenu d'appeler la *mécanique newtonienne*, conformément à une intelligibilité rationnelle qui ne veut faire appel, dans la science du mouvement, à rien qui n'appartienne à la seule considération du mouvement et des grandeurs qui le caractérisent.

⁷⁸ Newton [1687], livre 2.

⁷⁹ D'Alembert [1749-1752]. Voir Grimberg [1998].

⁸⁰ D'Alembert [1744].

⁸¹ Cette vue nouvelle sur la genèse du principe de d'Alembert résulte d'un examen attentif des trois mémoires indiqués : voir Grimberg et Paty [à paraître].

4

LA PENSEE MATHEMATIQUE DES GRANDEURS
ET LA NATURE DES PRINCIPES DU MOUVEMENT

C'est dans le *Traité de dynamique*, que d'Alembert exprime pour la première fois de la manière la plus claire sa conception de la physique et son programme à son sujet, dont ses autres travaux «physico-mathématiques» ultérieurs devaient constituer pour l'essentiel le développement. Les grandes réalisations de cette œuvre qui s'amorçait alors concernent la mécanique des solides quelconques, la mécanique des fluides ou hydrodynamique, l'astronomie théorique avec, en particulier, les premières solutions du problème de l'interaction par attraction gravitationnelle de trois corps. Tous ces travaux, fondamentaux et destinés à marquer durablement la science à venir, par les résultats obtenus, les méthodes adoptées, les innovations théoriques et conceptuelles proposées, les principes d'intelligibilité qui leur sont sous-jacents, ainsi que par les prolongements que d'autres savants et disciples leur donneraient, sont centrés autour de deux idées.

L'une concerne l'énoncé de principes pour une discipline physique donnée, l'autre l'utilisation du calcul différentiel et intégral pour traiter (et pour concevoir) les grandeurs physiques. Ces deux idées entretiennent entre elles une relation étroite : en particulier, seul l'énoncé de principes adéquats justifie l'usage du calcul dans les problèmes de physique. Ce sont ces idées fondamentales qui ont permis à d'Alembert d'apporter à la mécanique les innovations remarquables qu'on lui doit, tant pour la physique des corps terrestres (solides et fluides) que pour celle des corps célestes. Nous allons voir qu'inversement l'énoncé des principes physiques a tenu très étroitement à sa pensée mathématique des grandeurs physiques, conçues à travers cet outil de pensée que constituait le calcul différentiel.

Considérons l'économie du *Traité de dynamique*. L'ouvrage repose sur la conviction que ce qui nous est intelligible dans les mouvements variés des corps, c'est le mouvement lui-même en tant que déplacement dans l'espace au cours du temps (et non les causes qui engendrent ce mouvement) et que c'est autour de cette idée que la *dynamique* doit être organisée. Le terme «dynamique» doit être entendu comme ne se rapportant pas directement aux forces, mais à leurs effets (le mot manifeste une influence de l'approche leibnizienne)⁸². La force, si l'on appelle ainsi la cause du mouvement, comme toutes les causes, nous échappe : c'est ainsi que d'Alembert évite d'utiliser cette notion newtonnienne, en tout cas dans le sens de cause, et préfère s'en tenir aux effets. Seuls les effets, c'est-à-dire les changements de mouvement, sont susceptibles à ses yeux d'une conceptualisation claire, et les lois de ces changements s'expriment en termes des grandeurs par lesquelles on décrit le mouvement : distance (et temps), vitesse, accélération, etc. (sans oublier la masse, à travers la quantité de mouvement, mv

⁸² D'Alembert [1743] ; Fichant [1998].

et son «élément», mdv). S'il définit des forces, c'est toujours dans le sens de grandeurs qui expriment l'état de mouvement («force d'inertie», expression reprise de Newton pour désigner la continuation du mouvement uniforme d'un corps livré à lui-même), ou l'effet du changement de mouvement («force motrice» et «force accélératrice», expressions également reprises de Newton, mais définies par lui différemment des *Principia*). La «force motrice» désigne, dans le *Traité de dynamique*, le produit de la masse par l'élément de vitesse, et la «force accélératrice» n'est autre que le changement de vitesse lui-même, ou plutôt son «élément» (il faut entendre, malgré l'ambiguïté, son élément, dv , par unité d'élément de temps, c'est-à-dire $\frac{dv}{dt}$), c'est-à-dire une grandeur purement cinématique : la «force accélératrice» est, en fait, l'accélération. Remarquons qu'en définissant ainsi les «forces» comme les effets du changement de mouvement, et en particulier la force motrice comme le changement de la quantité de mouvement, ou produit de la masse par l'accélération, d'Alembert évite rétrospectivement la critique de circularité qui serait plus tard portée sur la détermination réciproque des grandeurs newtoniennes de force, de masse et d'accélération figurant dans la loi de la dynamique (deuxième loi de Newton)⁸³.

Le *temps* intervient d'une manière fondamentale, et définitoire du mouvement : c'est, en effet, la variable proprement physique qui fait différer le mouvement effectif de simples déplacements de figures comme peut les considérer la géométrie, et qui fait, précisément, que la mécanique diffère de la géométrie⁸⁴. En l'exprimant ainsi, d'Alembert tirait implicitement les conclusions de l'évolution de la science mécanique de Galilée à Newton : le premier avait fait entrer en physique *le temps comme la variable* permettant d'exprimer la loi de la chute des corps, et le second avait introduit, de fait, *le temps instantané*, avec sa loi de «causalité» (deuxième loi de Newton) par laquelle la force (motrice) est égalée au produit de la masse par le changement de la quantité de mouvement.

Soit dit en passant, Newton avait encore, au début de ses travaux, utilisé le temps en dehors de toute considération de mécanique pour exprimer la modification d'une variable, lorsqu'il élaborait son calcul des fluxions (d'où son expression de «moment» de la fluente) ; d'autre part, en formulant sa géométrie des mouvements infinitésimaux ou des premières et dernières raisons (sa géométrie «infinitésimale» et «dynamique»), il fixait, certes, avec le mouvement instantané, le temps instantané, mais sans le nommer ni le conceptualiser avec précision, puisqu'il n'exprimait pas explicitement un temps infinitésimal, ne le concevant que par l'opération du passage à la limite pour des grandeurs géométriques. L'idée d'une différentielle de temps (dt) ne viendrait qu'avec l'école leibnizienne, et encore elle n'éviterait pas les ambiguïtés dans son maniement (qui tenaient à l'origine géométrique du temps instantané), encore présentes chez

⁸³ Les définitions de d'Alembert correspondent à la notation devenue courante par la suite, supposée transcrire la loi de la dynamique newtonienne. La force motrice est $F = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}$

(D'Alembert [1743], 1^{ère} éd., p. 19). Sur la critique de la circularité de la définition newtonienne des grandeurs par cette relation, voir Mach [1883], Hertz [1884] et Poincaré [1902, 1905].

⁸⁴ D'Alembert [1743], p. vi (sur la mesure du temps : p. 9-13) ; [1758], p. 385 ; cf. Paty [1977], p. 246.

d'Alembert lui-même. La conceptualisation claire du concept de temps instantané mis en œuvre dans la dynamique ne serait acquise que progressivement⁸⁵.

La *variation dans le temps* était la première caractéristique par laquelle la mécanique diffère de la physique : la mécanique, disait d'Alembert, est une géométrie dans le temps, elle est dans ce sens une sorte de géométrie à quatre dimensions, et le temps pourrait à cet égard être considéré comme une quatrième dimension à côté des trois dimensions spatiales⁸⁶. Une autre différence entre la mécanique et la géométrie résidait dans le fait que les corps, qui occupent une certaine extension spatiale, sont également caractérisés par des *propriétés qui échappent à la géométrie*, comme la *masse*, l'*impénétrabilité*, l'*attraction gravitationnelle*⁸⁷. Ces propriétés échappent également au raisonnement *a priori*, et leur connaissance nous vient de notre expérience des corps. Il faut voir dans ces deux caractères appartenant à la mécanique la plus grande différence entre la conception de d'Alembert et celle de Descartes.

La représentation du «mouvement seul» fait appel à ces notions propres à la mécanique et qui portent sur les corps, aussi bien qu'à des rapports de distances et de vitesses à des durées. Ainsi, lorsque d'Alembert énonce les «principes» du mouvement, ceux-ci incorporent ces propriétés qui ne nous sont connues que par notre réflexion à partir de l'expérience, et que nous n'aurions pu inventer par notre raison seule. Mais c'est là une constatation, pour d'Alembert, qui concerne tout ce qui est physique d'une manière générale, et qui fait la différence entre la physique et les mathématiques (en particulier avec la géométrie).

Pour revenir à l'économie du *Traité de dynamique*, il comporte, après quelques définitions, deux parties. La première porte sur l'énoncé des *principes du mouvement*, et elle est divisée en trois chapitres où sont explicités, justifiés, commentés et illustrés ces principes, leurs raisons et leurs implications : ce sont, respectivement, le «principe de la force d'inertie», le «principe de la composition des mouvements», et le «principe de l'équilibre». La seconde partie porte sur le théorème général de la dynamique, qui est démontré comme une conséquence des trois principes précédents, et sur son application à de nombreux problèmes de la mécanique. Ces problèmes sont, pour une grande part, des problèmes traditionnels de la mécanique, en ce sens qu'ils avaient été étudiés avant d'Alembert, mais en faisant généralement appel à des hypothèses ou propositions admises mais non démontrées, comme, par exemple, la conservation des forces vives (très utilisée notamment par Jean Bernoulli).

L'organisation du *Traité de dynamique* indique donc son intention d'intelligibilité rationnelle des problèmes de mécanique abordés qui élargissent à l'ensemble des corps solides, de formes et de liaisons quelconques, les résultats sur la mécanique qui n'étaient, avec les *Principia* de Newton, acquis à strictement parler que pour des points matériels libres (et les solides finis engendrés par intégration à partir de ceux-ci). L'extension aux autres corps, déjà en puissance

⁸⁵ Elle ne serait effective de manière définitive qu'avec la représentation purement algébrique de la mécanique, adoptée dans la *Mécanique analytique* de Lagrange (Lagrange [1788]).

⁸⁶ D'Alembert [1743], Préface, p. viii, et Première partie ; [1754b]. Cf. Paty [1998c].

⁸⁷ Sur l'impénétrabilité, voir, p. ex., [1743], Préface, p. v-vi, et Première partie, p.1. ; DP, p. 90, EP [1758] ; sur l'attraction, voir d'Alembert [1751d], EP [1758], p. 420-427, et les analyses proposées dans Paty [1977], p. 283-297 ; [1998], p. 150-152 ; [à paraître, b et c].

dans la généralité même du théorème de la dynamique, serait obtenue dans les traités ultérieurs.

L'un des traits frappants de la présentation de la mécanique donnée par le *Traité de dynamique* est la formulation de ses trois «principes», là où Newton parlait de «lois ou axiomes du mouvement». C'est sur une brève analyse de cette transformation et de ses raisons que nous terminerons cette étude.

La transformation des *lois* du mouvement de Newton en *principes* par d'Alembert correspond, en fait, à une réorganisation de la dynamique par rapport à celle des *Principia*, qui tend à en faire une science analytique en ce qui concerne ses grandeurs caractéristiques et leurs rapports, sous la conduite et la régulation de principes généraux de la nature, qui seront d'autant plus féconds qu'ils seront en petit nombre⁸⁸.

Dans les *Principia*, Newton parle de *lois ou axiomes* du mouvement des corps. Dans le *Traité de dynamique*, d'Alembert parle de *principes* du mouvement, et ses trois principes correspondent en fait aux trois lois de Newton. Il s'agit, sous des formulations équivalentes quant aux conséquences sur les lois du mouvement des corps, d'un changement dans les contenus conceptuels qui correspond à une modification de significations et à une véritable réorganisation de cette science. Cette réorganisation part des *Principia*, tout en retrouvant des formulations de résultats qui leur étaient antérieurs : tels sont, en fait, le principe d'inertie (Galilée, Descartes, Gassendi), et les principes de composition des mouvements (Galilée) et de l'équilibre (Stevin). Newton les avait utilisés pour formuler les propriétés des forces et, en particulier, sa seconde loi (écrite après lui, et en notation différentielle, comme $F = m\gamma = m \frac{d^2x}{dt^2}$) avait à ses yeux un contenu plus riche que la seule composition des forces et des mouvements, étant la loi même de la dynamique, qui exprimait la proportionnalité des effets aux causes (une proposition dénuée de sens pour d'Alembert, car «métaphysique»⁸⁹).

Dans la réorganisation proposée par d'Alembert, le *principe de la composition des mouvements* vient à la place de la *seconde loi de Newton* sur le changement de mouvement (dont il a lui-même déjà donné la forme, comme l'expression analytique de la force motrice, mais *par définition* : $F_m = m\gamma = m \frac{d^2x}{dt^2}$). La loi fondamentale de la dynamique, pour lui, n'est donc pas celle de Newton, et sera essentiellement l'expression synthétique des trois principes, à savoir, le «principe fondamental de la dynamique», démontré à partir de ces derniers. Directement déduit des principes généraux du mouvement, il en partage le caractère fondamental et principiel et la généralité, et possède ainsi une *double fonction, fondatrice et unificatrice* (cette dernière, par la généralité de son application à toutes sortes de corps).

Quant à la composition des accélérations, «corollaire» pour Newton de sa seconde loi (exprimée en termes de forces), elle découle, chez d'Alembert, de son propre second principe (de la composition des mouvements), et elle résulte en fait directement de l'expression de ce principe dans le langage des grandeurs différentielles. La composition des mouvements est conçue en termes de mouvements différentiels, c'est-à-dire qu'elle permet de combiner à un instant donné des mouvements constants et finis (mouvements d'inertie, de vitesse v), et

⁸⁸ D'Alembert [1743], Préface, p. iii-iv, xxv, et Première partie. Voir aussi EP, p. 462-463, 467.

⁸⁹ D'Alembert [1743], Préface, p. xi-xii.

des éléments de mouvements variés, accélérés, uniformément ou non, linéaires ou courbes (dv , d^2v , etc.). C'est, du point de vue de la formulation *symbolique*, la capacité de ce langage (celui de l'analyse) à rendre compte de la relation instantanée des espaces et des temps qui permet à d'Alembert d'exprimer les grandeurs de la dynamique et leurs relations en ne faisant appel qu'à des grandeurs (exprimant des concepts) homogènes au mouvement. Mais, parlant de langage, on doit souligner que l'expression symbolique porte la charge *sémantique* des nouveaux concepts, dont le sens physique même devient tributaire. Autrement dit, les concepts-grandeurs d'espace, de temps, de vitesse, d'accélération, de force accélératrice, etc., sont désormais pensés à travers leur expression mathématique différentielle, qui maintient l'homogénéité des grandeurs physiques de même nature, finies ou «infinitésimales» (en fait, arbitrairement petites), et permet de les mettre directement en relation dans une équation (différentielle).

Il ressort de ces éléments d'analyse que d'Alembert pouvait alors à bon droit retrouver une intelligibilité «claire», finalement cartésienne, de la dynamique, entendue comme l'étude du mouvement varié des corps. Il le put, non pas en tournant le dos aux exigences de la physique newtonnienne par un retour à une conception du mouvement par «impulsions», c'est-à-dire par contacts et par chocs, comme dans la physique cartésienne, mais parce que la physique newtonnienne pouvait effectivement être reformulée de cette manière, à la faveur de la transformation conceptuelle rendue possible par l'utilisation systématique des grandeurs différentielles.

BIBLIOGRAPHIE

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1743]. *Traité de dynamique*, David, Paris, 1743. 2ème éd., modif. et augm., David, Paris, 1758. Ré-impr. de la première édition, Culture et Civilisation, Bruxelles, 1966 ; Ré-impr. de la deuxième édition, 2 vols., Gauthier-Villars, Paris, 1921 ; 1 vol., Gabay, Paris, 1990. (Nous utilisons, dans le présent travail, la première édition).

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1744]. *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*, David, Paris, 1744.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1748]. Mémoire historique sur la vie et les ouvrages de M. Jean Bernoulli, *Mercur de France*, mars 1748 ; repris sous le titre : Eloge de Jean Bernoulli, in D'Alembert [1821], vol. 3, p. 338-360.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [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 (édition utilisée, notée DP).

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1751b]. Action, *Encyclopédie*, vol. 1, 1751, p. 119-120.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1751c]. Application de l'analyse à la géométrie, *Encyclopédie*, vol. 1, 1751, p. 550-553.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1751d]. Attraction, *Encyclopédie*, vol. 1, 1751, p. 846-856.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1752a]. *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*, David, Paris, 1752 ; ré-éd. Culture et Civilisation, Bruxelles, 1966. (Trad. par d'Alembert sur l'original en latin soumis au concours de l'Académie de Berlin en nov. 1749, manuscrit).

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1752b]. Cartésianisme (contribution), *Encyclopédie*, vol. 2, 1752, p. 725-726.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1754a]. Différentiel, *Encyclopédie*, vol. 4, 1754, p. 985-989.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1754b]. Dimension, *Encyclopédie*, vol. 4, 1754, p. .

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

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1756a]. Figure de la Terre, *Encyclopédie*, vol. 6, 1756, p. 749-761.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1756b]. Fluxions, *Encyclopédie*, vol. 6, 1756, p. .

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1758]. *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 *Éclaircissements*]. Ré-éd., préface de Richard N. Schwab, Olms Verlagbuchhandlung, Hildesheim, 1965 ; autre ré-éd, sans préface, Fayard, Paris, 1986.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1761-1780]. *Opuscules mathématiques*, 8 vols, David, Paris, 1761-1780 ; vol. 9 inédit (manuscrit aux Archives de l'Académie des sciences, Paris).

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1765]. *Eclaircissements à l'Essai sur les éléments de philosophie ou sur les principes des connaissances humaines*, Paris, in d'Alembert, *Mélanges de Littérature, d'Histoire et de Philosophie*, vol. 5, Paris, 1765 ; repris dans les éditions de 1965 et 1986 des *Eléments de philosophie*.

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1821]. *Œuvres philosophiques, historiques et littéraires*, 5 vols., Belin, Paris, 1821 ; ré-éd., Slatkine Reprints, Genève, 1967.

D'ALEMBERT, Jean le Rond, 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.

AUROUX, Sylvain et CHUILLET, Anne-Marie (dirs.) [1984]. *D'Alembert (1717-1781), Dix-huitième siècle*, n° 16 (numéro spécial), 1984.

BACON, Francis [1620]. *Novum Organum* (1620), in Bacon [1857] ; engl. transl. by J. Spedding, R.L. Ellis and D.D. Heath, *The New Organon*, in BACON [1857-1874], vol. 7 ; new ed. by Fulton H. Anderson, Bobbs Merrill, Indianapolis, 1960. Trad. fr., *Nouvel Organon, ou règles véritables pour l'interprétation de la nature*, in Bacon [1843-1845], vol. 2, p. 1-235.

BACON, Francis [1623]. *De Dignitate et Augmentis Scientiarum*, 1623, in Bacon [1857]. Trad. fr., *De la dignité et de l'accroissement des sciences*, in Bacon [1843-1845], vol. 1, p. 1-453.

BACON, Francis [1843-1845]. *Oeuvres*, trad. par M. F. Riaux, Charpentier, Paris, 2 vols. (vol. 1, 1845 ; vols. 2, 1843).

BACON, Francis [1857-1874]. *The Works*, ed. by James Spedding, Robert Leslie Ellis and Douglas D. Heath, 7 vols., London, 1857-1874 ; re-impr., 1887-1892.

BERNOULLI, Jean [1988-1991]. *Der Briefwechsel von Johann I Bernoulli*, vol. II, 1-2, Edition de la correspondance de Jean Bernoulli, par Pierre Costabel et Jeanne Peiffer, Birkhäuser, Basel, 1988, 1991.

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.

BOYER, Carl B. [1939]. *Concepts of the calculus*, New York, 1939; ré-éd., 1959.

BOYER, Carl B. [1968]. *A history of mathematics*, Princeton University Press, 1968; re-ed., 1985.

BRUNET, Pierre [1931]. *L'introduction des théories de Newton en France au XVIII^e siècle avant 1739*, Paris, 1931.

CASINI, Paolo [1969]. Le newtonianisme au siècle des Lumières, *Dix-huitième siècle* 1, 1969.

CASSIRER, Ernst [1932]. *La philosophie des Lumières* (original alld., 1932), trad. fr. par Pierre Quillet, Fayard, Paris, 1966.

CLAIRAUT, Alexis [1743]. *Théorie de la figure de la Terre*, Paris, 1743 ; ré-éd., 1803.

COHEN, I. B. [1975]. Newton, Isaac, in C.C. Gillispie (ed.), *Dictionary of scientific biography*, vol.11, 1975, p. 42-101.

CONDORCET, Jean Antoine Nicolas Caritat de [1793]. *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain* (terminée en octobre 1793), première édition, an V (1896) ; éd. par François Arago, 1847 ; nlle éd. critique par François et Monique Hincker, Ed. Sociales, Paris, 1971.

DEMIDOV, Serguei S. [1989]. D'Alembert et la naissance de la théorie des équations différentielles aux dérivées partielles, in Monique Emery et Pierre Monzani (eds.), *Jean d'Alembert, savant et philosophe. Portrait à plusieurs voix*, Archives contemporaines, Paris, 1989, p. 333-350.

DESCARTES, René [vers 1628]. *Regulae 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 [1644]. *Principia philosophiæ*, 1^{ère} 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. [A.T.].
- DIDEROT, Denis [1750]. *Prospectus de l'Encyclopédie*, in Diderot [1975-], vol 5 ; également in Diderot [1994], vol. 1, *Philosophie*, p. 211-237.
- DIDEROT, Denis [1753]. *De l'interprétation de la nature*, 1753, ré-éd. augm., 1754 ; in Diderot [1964], p. 165-246.
- DIDEROT, Denis [1964]. *Oeuvres philosophiques*, éd. par Paul Vernière, Garnier, Paris, 1964.
- DIDEROT, Denis [1975-]. *Oeuvres complètes*, éd. par Herbert Dieckmann, Jacques Proust, Jean Varloot, *et al.*, Herman, Paris, 22 vols parus (sur 33 prévus).
- DIDEROT, Denis [1994]. *Oeuvres*, éd. établie par Laurent Versini, Collection Bouquins, Robert Laffont, Paris, 4 vols.
- DUHEM, Pierre [1903]. *L'évolution de la mécanique*, Paris, 1903.
- EMERY, Monique et MONZANI, Pierre (éds.) [1989]. *Jean d'Alembert, savant et philosophe. Portrait à plusieurs voix*, Archives contemporaines, Paris, 1989.
- ENGELSMAN, Steven B. [1984]. D'Alembert et les équations aux dérivées partielles, *Dix-huitième siècle*, n° 16, 1984, 27-37.
- EULER, Leonhard [1734]. De infinitis curvis eiusdem generis seu methodus inveniendi aequationes pro infinitis curvis eiusdem generis; Additamentum ad dissertationem de infinitis curvis eiusdem generis, *Commercium Academiae scientiae Petropolitanae* 7 (1734-1735), 1740, 174-183; 184-200. In Euler, [1911-], series prima, vol. 22.
- EULER, Leonhard [1911-]. *Opera omnia*, Birkhauser Verlag, Basel, 3 séries de nombreux volumes, depuis 1911.
- FICHANT, Michel [1998]. *Science et métaphysique dans Descartes et Leibniz*, Presses Universitaires de France, Paris, 1998.
- FONTENELLE [1696]. Préface de l'*Analyse des infiniments petits* de M. le Marquis de l'Hôpital, in Fontenelle, *Oeuvres*, Fayard, Paris, 1989, vol. 3, p. 237-245.
- FONTENELLE [1727]. *Eléments de la géométrie de l'infini*, Paris, 1727.
- FONTENELLE [1989]. *Oeuvres*, Fayard, Paris, 1989, 3 vols.
- GALILEI, Galileo (Galilée) [1632]. *Dialogo sopra i due massime sistemi del mondo : tolemaico e copernicano* ; trad. fr., *Dialogues sur les deux plus grands systèmes du monde* (1632), Seuil, Paris, 1992.
- GALILEI, Galileo (Galilée) [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, *Discours sur deux sciences nouvelles* (1638), A. Colin, Paris, 1970.
- GRANGER, Gilles-Gaston [1968]. *Essai d'une philosophie du style*, Armand Colin, Paris, 1968 ; rééd., Odile Jacob, Paris, 1988.
- GREENBERG, John [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, soutenue le 14.12.1998.

GRIMBERG, Gérard et PATY, Michel [à paraître]. L'origine hydrodynamique du principe de d'Alembert, à paraître.

GUSDORF, Georges [1971]. *Les principes de la pensée au siècle des Lumières*, Payot, Paris, 1971. (*Les sciences humaines et la pensée occidentale*, 4).

GUSDORF, Georges [1972]. *Dieu, la nature et l'homme au siècle des Lumières*, Payot, Paris, 1972. (*Les sciences humaines et la pensée occidentale*, 5).

HANKINS, Thomas [1971]. *Jean d'Alembert, Science and the Enlightenment*, Oxford University Press, Oxford, 1971.

HERTZ, Heinrich [1894]. *Die prinzipien der Mechanik, in neuem zusammenhange*, Teubner, Leipzig, 1894. Trad. angl. par D.E. Jones et J.T. Walley, *The principles of mechanics presented in a new form*, Mac Millan, London, 1893; Dover, New York, 1956.

HOSPITAL, Marquis de l' [1696]. *Analyse des infiniments petits pour l'intelligence des lignes courbes*, Paris, 1696.

KOYRE, Alexandre [1935-1939]. *Etudes galiléennes*, Actual. sc. industr., 3 fasc., Hermann, Paris, 1935-1939 ; 1 vol., Hermann, Paris, 1966.

KOYRE, Alexandre [1968]. *Etudes newtonniennes* (édition française), Gallimard, Paris, 1968.

KUHN, Thomas [1962]. *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1962 ; 2nd ed., 1970.

LAGRANGE, Joseph Louis [1788]. *Mécanique analytique*, Paris, 1788; 4è éd. (posth.), de 1753, in *Oeuvres*, vols. 11 et 12, 1888 et 1889.

LAGRANGE, Joseph Louis [1797]. *Théorie des fonctions analytiques, contenant les principes du calcul différentiel...*, Imprimerie de la République, Paris, an V (1797) ; 2è éd., 1813 ; 4 è éd. d'après la 2è, in Lagrange [1867-1823], vol. 9, 1881.

LAGRANGE, Joseph Louis [1867-1892]. *Oeuvres*, publiées sous la dir. de J.A. Serret (vols 1-10 et 13) et Gaston Darboux, 14 vols, Gauthier-Villars, Paris, 1867-1892.

LAPLACE, Pierre Simon [1799-1825]. *Traité de mécanique céleste*, 5 vols., Paris, 1799-1825. Rééd. en 4 vols., Paris, 1829-1939.

LEIBNIZ, Wilhelm Gottfried [1684], Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas, nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illis calculi genus, *Acta eruditorum* (Leipzig), oct. 1684, 467-473, repris in Leibniz [1849-1863], vol. 5, p. 220-226.

LEIBNIZ, W. G. [1671-1684]. Theoria motus abstracti seu rationes motuum universalis, a sensu et phaenomenis independentes, repris in Leibniz [1849-1863], vol. 6, p. 61-80.

LEIBNIZ, W. G. [1849-1863]. *Mathematische Schriften. Oeuvres*, édité par C. J. Gerhardt, 1849-1863, Halle, 7 vols, 1849-1863. Ré-éd., G. Olms, Hildesheim, 1962.

LEIBNIZ, W. G. [1989]. *La naissance du calcul différentiel : 26 articles des Acta Eruditorum*, éd. par Marc Parmentier, Vrin, Paris, 1989.

LOCKE, John [1690]. *A Treatise Concerning Human Understanding*, London, 1680 ; tr. fr. par Pierre Coste, *Essai philosophique concernant l'entendement humain*, Amsterdam, 1723.

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

MAC LAURIN, [1742]. *A treatise of fluxions*, London, 1742.

MICHEL, Alain et PATY, Michel (éds.) [à paraître]. *Analyse et dynamique. Etudes sur l'œuvre de Jean d'Alembert*, Presses de l'Université Laval, Québec, sous presse.

NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, London, 1687 ; 2^{ème} éd., 1713 ; 3^{ème} éd., 1726 ; éd. par Alexandre Koyré et I. B. Cohen, Cambridge University Press, Cambridge, 1972. Trad. angl. par Andrew Motte, *The mathematical principles of natural philosophy*, 1729 ; trad. rév. par Florian Cajori, Berkeley, Univ. California Press, 1934. Trad. fr. par Mme la Marquise du Chastelet, *Les Principes mathématiques de la philosophie naturelle de M. Newton*, 2 vols., Paris, 1756-1759.

NEWTON, Isaac [1670-1671]. *Tractatus de methodis serierum infinitarum et fluxionem* (publié en latin en 1779) ; trad. angl., *A treatise of the methods of series and fluxions*, publiée par John Colson, en 1736 ; in Newton [1967-1981], vol. 3, 1969, p. 32-353 ; trad. fr. par Georges Louis Leclerc de Buffon, *La méthode des fluxions et des suites infinies*, 1740, ré-impr., Blanchard, Paris, 1966.

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, 19.12.1994.

PATY, Michel [1977]. *Théorie et pratique de la connaissance chez Jean d'Alembert*, Thèse de doctorat en philosophie, Université de Strasbourg-2, 1977, dactyl., non publiée.

PATY, Michel [1984]. Rapport des mathématiques et de la physique chez d'Alembert, *Dix-huitième siècle*, n° 16, 1984, 69-80.

PATY, Michel [1989]. D'Alembert et la théorie physique, in Emery et Monzani [1989], p. 233-260.

PATY, Michel [1990]. Ciência, filosofia e sociedade, da *Encyclopédie* até à Revolução francesa : de d'Alembert a Condorcet, in Coggiola, Osvaldo (org.), *A Revolução francesa e seu impacto na America Latina. (Atas do Simposio internacional, São Paulo, 29 de maio-1º de junho de 1989)*, Nova Stella/CNPq/EDUSP, São Paulo, 1990, p. 95-106.

PATY, Michel [1994]. 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 [1998a]. *D'Alembert ou la raison physico-mathématique au siècle des Lumières*, Les Belles Lettres, Paris, 1998.

PATY, Michel [1998b]. 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 [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, in Sebestik, Jan et Soulez, Antonia (éds.), *Actes du Colloque France-Autriche Paris, mai 1995, Interférences et transformations dans la philosophie française et autrichienne (Mach, Poincaré, Duhem, Boltzmann), Fundamenta philosophiæ* (Nancy/éd. Kimé, Paris) 3 (2), 1998-1999, 61-74.

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

PATY, Michel [à paraître, a]. La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique, *Deuxième Journée de Philosophie des Sciences Jean Largeault*, Universités de Paris-Sorbonne (Paris-4), Paris 1-Panthéon-Sorbonne, Marc Bloch-Strasbourg-2 et Institut Universitaire de France, 7 Mai 1999, éd. par Espinoza, Miguel, L'Harmattan, Paris, sous presse.

PATY, Michel [à paraître, b]. Principes de la mécanique et analyse chez d'Alembert. Le point de vue conceptuel, à paraître.

PATY, Michel [à paraître, c]. Intelligibilité et historicité (Science, rationalité, histoire), *Quipu* (Mexico), à paraître.

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

POINCARÉ, Henri [1905]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905 ; 1970.

ROBINET, André [1960]. Le groupe malebranchiste, introducteur du calcul infinitésimal en France, *Revue d'Histoire des Sciences* 13, 1960, 287 et suiv.

SCHWAB, Richard N. [1963]. Introduction and notes, in d'Alembert, Jean, *Preliminary Discourse of the Encyclopedia*, Bobbs-Merril, New York, 1963.

SCHWAB, Richard N. [1965]. Introduction, in d'Alembert, Jean, *Essai sur les Eléments de philosophie*, Olms Verlagsbuchhandlung, Hildesheim, 1965.

SZABO, Ivo [1977]. *Geschichte der mekanischen Prinzipien*, Basel/Stuttgart, 1977.

TODHUNTER, I. [1873]. *A History of the Mathematical Theories of Attraction and the Figure of Earth from the Time of Newton to that of Laplace*, 2 vols., Macmillan, London, 1873.

VARIGNON, Pierre [1714]. Réflexions sur l'usage que la mécanique peut avoir en géométrie, *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1714, 77-121.

VARIGNON, Pierre [1731]. *Eléments de mathématique*, Paris, 1731.

VOLTAIRE, François Marie Arouet [1734]. *Lettres anglaises*, Paris, 1734.

VOLTAIRE, François Marie Arouet [1738]. *Eléments de la philosophie de Newton*, Paris, 1738.