

NOMBRE ET APPROXIMATIONS DANS LA THEORIE DE LA GRAVITATION DE LESAGE

Hugues CHABOT (Nantes)

Des Corpuscules Isolés, très subtils, qui se meuvent en ligne droite, dans un grand nombre de sens différens, & qui rencontrent des Corps fort Poreux. Voilà donc la seule façon dont peut exister la Cause matérielle des Attractions.¹

Mais quand une fois une de ces hypothèses a acquis un grand degré de probabilité, par l'exclusion des autres ; alors seulement, il ne faut plus se laisser effaroucher par quelques apparences, en supposant imperceptibles certaines quantités, qu'on avoit d'abord supposées sensibles.²

Les recherches du mathématicien et physicien genevois Georges-Louis Lesage (1724-1803) occupent une place à part parmi les explications mécanistes de la gravitation proposées au XVIII^{ème} siècle. Alors que ces théories sont habituellement d'inspiration antinewtonienne, Lesage adopte la loi de l'attraction. Il se distingue par une connaissance solide de l'œuvre de Newton, comme des travaux des Cartésiens du début du siècle. Il connaît bien les objections qui leur ont été opposées. En dépit d'un nombre très restreint de publications, son statut de correspondant de l'Académie des Sciences de Paris, et de membre associé de plusieurs sociétés savantes étrangères, témoigne de la reconnaissance accordée à ses recherches³. Il entretient une correspondance avec les géomètres et astronomes les plus célèbres de son temps. Il discute ainsi son système avec d'Alembert, Daniel Bernoulli, Euler, Clairaut ou encore Lagrange.

¹ Lesage [1761, p. 20].

² Prévost [1805b, II, p. 335].

³ Correspondant de Lalande à l'Académie des Sciences de Paris à partir de 1761, Lesage sera aussi nommé associé étranger de la Société royale des sciences de Montpellier en 1768, membre de la *Royal Society* de Londres en 1775 et associé étranger de l'Institut et académie des sciences de Bologne en 1782. Le premier biographe de Lesage est Pierre Prévost [1805a ; 1843], son élève et héritier intellectuel qui consacra une partie de son œuvre à la promotion des idées du maître. Haag [1846-1859] fournit quelques renseignements utiles. Sayous [1861] lui consacre une notice particulièrement développée (vol. 2, pp. 3-40). L'article de Gough dans le *Dictionary of Scientific Biography* donne les principaux repères de sa carrière scientifique. L'étude de cas que nous avons consacrée à la théorie de Lesage fait une belle part au récit biographique (Chabot [1999, pp. 105-177]).

C'est dans un contexte de montée du newtonianisme et de discrédit croissant du cartésianisme que Lesage élabore un système qui attribue la gravitation à des corpuscules qui parcourent l'espace en tous sens, sans se gêner mutuellement, et qui sont capables de traverser la matière ordinaire, tout en agissant sur elle. Pour rendre compte de ces propriétés au premier abord paradoxales, Lesage ne recourt pourtant pas à des hypothèses *ad hoc*. La plausibilité de sa théorie est garantie par le rôle central qu'il fait jouer aux approximations. Des principes physiques qu'il met en œuvre, il tire des conséquences mathématiques qui en sont autant de formulations *approchées*. Comme nous allons le voir, le Genevois réduit les calculs algébriques à une simple expression des limites de l'expérience humaine. Il ne modifie pas son explication au gré des observations, il optimise les paramètres qui la caractérisent. Au final, les mesures n'offrent qu'une version édulcorée de la subtilité des phénomènes, tout en constituant le garde-fou du physicien spéculatif. Aussi bien, c'est un aspect de la pensée numérique que Lesage instrumentalise à plusieurs égards, et qui nous permet d'inscrire cette présentation dans le cadre du colloque de Peirescq.

LA THEORIE DES CORPUSCULES ULTRAMONDAINS

En 1758, l'Académie de Rouen met au concours la question des affinités chimiques⁴. À cette époque, qui est celle de la seconde édition du *Traité de Dynamique* de d'Alembert, les explications mécaniques en termes de formes et de mouvements de particules rencontrent une grande faveur en chimie. C'est donc tout naturellement que Lesage entreprend de rédiger un *Essai de Chymie mécanique*, dans lequel il expose son système. En tant qu'essai de chimie, son travail est voué à l'échec, car il est fort éloigné des observations et de la pratique de cette science. Mais parce que Lesage rend compte mécaniquement de l'affinité, le prix lui est attribué pour une partie de la question⁵.

L'essai de Lesage est en fait le premier texte d'importance sur sa théorie de la gravitation, dont l'affinité chimique constitue un cas particulier. Le mémoire original occupe 60 pages. Les additions et corrections en doublent le volume. Lesage fait imprimer le texte complet à compte d'auteur⁶. Le savant genevois garde cependant tous les exemplaires. Il les annote selon l'état d'avancement de ses réflexions et ne les fait parvenir « qu'à ses amis ou aux savans dont il estimoit les lumières »⁷ :

Je ne l'avois fait imprimer ; que pour avoir occasion de perfectionner les théories qu'il ébauche ; savoir, en l'envoyant à plusieurs physico-mathématiciens ; que je conjurois instamment, de ne pas ménager ces théories, mais surtout mon mécanisme de la gravitation.⁸

⁴ « Déterminer les affinités qui se trouvent entre les principaux mixtes, ainsi que l'a commencé Mr Geoffroy ; et trouver un système physico-mécanique de ces affinités ». E. F. Geoffroy (1672-1731) est l'auteur d'un mémoire présenté à l'Académie en 1718, et contenant la première table d'affinités. Destinée à classer les substances, à prévoir leurs réactions et à justifier le mécanisme de leur union, elle constitue le modèle de celles qui vont suivre. Sur le sujet des affinités chimiques, voir Goupil [1991], en particulier le chapitre IV, « Les tables d'affinité », pp. 133-146.

⁵ Le chimiste et médecin liégeois Jean-Philippe de Limbourg emporte le prix pour l'autre partie. Il publie en 1761 sa dissertation, dont le *Journal des Savants* (mai 1762, pp. 295-302) se fait l'écho, accompagnée d'un résumé des thèses développées par son co-lauréat.

⁶ Une note manuscrite de Lesage (p. 23 de l'exemplaire consulté) indique qu'il fit imprimer une addition « en 1759, ou en 1760 ». Le 17 mars 1761, il envoie une partie de l'ouvrage à Daniel Bernoulli en sollicitant son jugement : « Je vous l'envoie, avant que l'Impression en soit entièrement achevée : Afin que, si vous pouviés, sans vous incommoder le moins du monde, m'honorer de quelques unes de vos Reflexions ; je fusse encore à tems d'en faire usage, au cas que vous voulussiez bien me le permettre ». *Bibliothèque Publique et Universitaire de Genève*, Ms. Suppl. 517, f. 76.

⁷ Prévost [1805a, p. 79] ajoute que l'*Essai* a été traduit en allemand. Une indication manuscrite permet de dater les notes comme postérieures à 1765 dans les exemplaires déposés à la Bibliothèque Nationale (cote R 3210, ou microforme m 17 485, et cote V 15 853).

⁸ Lesage [1782].

Avant de présenter le contenu de cet ouvrage, il faut signaler une singularité notable de son auteur : une pratique de la ponctuation et de la typographie qui s'écarte résolument de l'usage alors en vigueur. Nous avons respecté cette manie d'écriture, qui vient doubler l'hétérodoxie des idées que le savant genevois développe⁹.

L'*Essai* se divise en six chapitres. Le premier traite du rapport entre attraction et densité des substances. Le second contient l'explication mécanique de la pesanteur. Les trois suivants traitent spécifiquement des affinités chimiques. Le dernier chapitre enfin développe des calculs algébriques.

Lesage caractérise l'agent responsable des attractions comme un fluide composé de parties discrètes dont les vitesses, sans direction privilégiée, sont très supérieures à celles des corps matériels en mouvement. Ces corpuscules ne se gênent pas mutuellement, car ils sont suffisamment espacés pour que leurs collisions restent rares¹⁰. Ils obéissent à la loi du mouvement rectiligne et ils parviennent en permanence des confins de l'univers matériel. Comme ils ont été engendrés au même instant, chaque jour qui passe renvoie leur provenance vers un horizon toujours plus lointain, au-delà même des limites du monde visible. C'est pour cette raison que Lesage forge l'expression de « Corpuscules Ultramondains » pour désigner ses atomes gravifiques.

LA DEMONSTRATION DE LA LOI INVERSE DU CARRE

Tout corps isolé est donc maintenu en équilibre par les différents courants de corpuscules dont les chocs se compensent. Cependant, dès que deux corps se font face, ils se font écran et gravitent l'un vers l'autre. Lesage démontre la loi inverse du carré par un raisonnement qui fait intervenir la densité des trajectoires des corpuscules :

Si donc, une Particule de Matière (beaucoup trop petite pour que nos sens puissent la distinguer, mais beaucoup plus grande cependant qu'un Corpuscule Ultramondain) ; occupe [un] point de l'Espace ; & arrête par conséquent, tous les Corpuscules qui s'étoient avancé vers ce Point, de sorte qu'il n'y en ait plus qui en reviennent : On pourra concevoir ceux qui y vont ; comme traversant successivement, diverses surfaces sphériques, concentriques à cette Particule. Et comme les Corpuscules qui traversent une de ces surfaces, sont exactement les mêmes que ceux qui ont traversé tout autre d'entr'elles, plus éloignée ; ils y seront d'autant plus serrés, que celle-là sera moins étendue que celle-ci. Or, les surfaces des Sphères, sont quadruples de celles de leurs grands Cercles respectifs (ARCHIM. *De Sphæra & Cylindro, Lib. I. Prop. 30.*) : Et celles-ci sont entr'elles comme les quarrés de leur diamètre (EUCL. *Elem. XII. Prop. 2.*) ; & par conséquent, de leurs demi-diamètres ; qui sont ici, les Distances de ces surfaces à la Particule.

Donc, les Densités de ces Corpuscules Ultramondains, à diverses Distances de la Particule ; suivent la Raison inverse du Quarré de ces Distances.

Donc, leurs Efficaces, pour entraîner avec eux vers cette Particule, les Corps qu'ils rencontrent sur leur passage ; suivent aussi la Raison inverse des Quarrés des Distances de ces Corps à cette Particule.¹¹

La démonstration n'est pas totalement originale. Elle a été inspiré à Lesage par la lecture des *Leçons élémentaires d'Astronomie* de Lacaille. À la fin de son ouvrage, l'astronome donne en effet une justification de la loi de l'attraction newtonienne dans presque les mêmes termes. À ceci près que Lacaille raisonne sur des rayons (attractifs) là où le

⁹ Prévost [1805a] et Henry [1886] ont délibérément gommé ces bizarreries.

¹⁰ Lesage s'est rendu compte que le nombre de chocs avec la matière ordinaire est alors lui aussi diminué. C'est pourquoi il propose en 1784 une autre alternative : réduire la taille des corpuscules gravifiques sans changer leur masse, ce qui diminue le nombre de leurs interactions tout en conservant le nombre et l'intensité des collisions avec la matière ordinaire.

¹¹ Lesage [1761, p. 28]. Lesage ne manque pas de signaler l'analogie de son fluide gravifique avec la lumière, dont la densité décroît elle aussi en raison inverse du carré des distances, puisque elle est considérée comme de répartition égale sur la surface d'une sphère.

Genevois fait intervenir des corpuscules¹². Autrement dit, Lesage substitue une explication mécanique (celle des chocs) à un raisonnement géométrique. Cette mécanisation est aussi une numérisation, bien différente d'une géométrisation. Les grandeurs qui caractérisent la théorie de Lesage jouent en effet du caractère discret des corpuscules ultramondains et de leurs interactions. Nous allons y revenir. Dans le premier tiers du siècle, certains Cartésiens qui avaient abandonné les tourbillons pour expliquer le mouvement des planètes recouraient déjà à une impulsion radiale capable de justifier la tendance centripète vers le Soleil. C'était en particulier le cas de Jean Bernoulli qui déduit par un raisonnement identique à ceux de Lacaille et Lesage la forme de la loi newtonienne¹³.

UNE PREMIERE APPROXIMATION

Pour que les corpuscules ultramondains agissent en raison des masses, Lesage précise que les corps sont poreux. Les corpuscules peuvent alors agir sur toutes leurs parties et non seulement sur leurs surfaces. Cette porosité est telle que l'on ne perçoit aucune atténuation *sensible* de la proportionnalité du poids à la masse entre des corps de tailles différentes (et de densité égale), alors même que les couches intérieures des plus gros se dérobent davantage à l'action des corpuscules gravifiques. Lesage insiste sur cet aspect qui constitue pour certains physiciens « une *Objection* contre toute Explication Mécanique de la Gravitation, faite ou à faire »¹⁴. Il conteste le bien-fondé de cette critique sur la base d'une réserve de principe :

Cet Argument, tombera entièrement ; s'il n'est, & ne peut pas être, prouvé par aucun *Fait*, que la Gravitation soit *précisément* proportionnelle aux Masses.¹⁵

Lesage note que les observations et les expériences de Newton ne donnent cette proportion qu'au millième près. Il estime que la précision des mesures ne saurait aller au-delà du cent millième. Autrement dit, pense Lesage, la loi mathématique qui impose une proportionnalité stricte ne constitue qu'un modèle approché d'un phénomène physique plus subtil. Selon lui, une atténuation du fluide gravifique et donc de la pesanteur existe bel et bien, mais elle est en-deçà des possibilités de l'observation.

UNE RESISTANCE AU MOUVEMENT IMPERCEPTIBLE

Lesage s'attaque à une autre objection soulignée par tous les détracteurs du mécanisme : la résistance qu'oppose tout milieu matériel au mouvement d'un corps en son sein. Il pose pour axiome que « *les Corps agissent les uns sur les autres uniquement par leurs vitesses respectives* »¹⁶. Pour une direction donnée de l'espace, deux cas se présentent selon que la vitesse des corpuscules gravifiques est inférieure ou supérieure à celle du corps :

¹² Lacaille [1746, pp. 345-346]. Les trois éditions suivantes (1755, 1761 et 1780) ne reprennent pas cette démonstration.

¹³ Le mémoire de Jean Bernoulli [1734] est analysé par Brunet [1931, pp. 279-286]. On trouve encore cette démonstration chez deux promoteurs du newtonianisme dans la France du milieu du XVIII^e siècle. Bouguer [1748] s'en sert pour dénoncer les « insuffisances du mécanisme ». Sigorgne [1747, pp. 87 et sq], qui la cite d'après Keill et Grégory, reproche à cette démonstration d'affaiblir le statut de fait d'expérience de la loi de l'attraction en la faisant dépendre d'un raisonnement, au lieu de laisser à la volonté divine le soin de lui donner librement sa forme.

¹⁴ Lesage [1761, p. 72].

¹⁵ Lesage [1761, p. 73].

¹⁶ Lesage [1761, p. 23]. Souligné dans le texte.

Dans le premier cas : La quantité de mouvement que perd ce corps en un tems donné ; est proportionnelle, à la somme de [leurs] deux vitesses. Dans le second cas : Cette perte, est proportionnelle, au double de la vitesse propre du corps ; sans aucun ègard, au plus ou au moins d'excès de la vitesse du Fluide sur celle-là.¹⁷

Dans le premier cas, seule la partie du fluide qui s'oppose au mouvement du corps agit : l'intensité du choc est proportionnelle à la vitesse relative, c'est-à-dire à la somme des vitesses absolues. Dans le second cas, les vitesses s'ajoutent pour les corpuscules qui vont à l'encontre du mouvement du corps, elles se retranchent pour ceux qui aident ce mouvement. Pour cette dernière situation, Lesage donne une formule algébrique sur la « retardation » ou l'accélération engendrées par les collisions entre corpuscules gravifiques et matière ordinaire. En prenant comme unités la masse des corpuscules ultramondains d'une part et la vitesse du corps matériel d'autre part, il aboutit à loi suivante :

Le ralentissement du Corps intermédiaire ; sera,
 $(v + 1) \times 1 / (m + 1) - (v - 1) \times 1 / (m + 1) = 2 \times 1 / (m + 1)$.¹⁸

La relation est établie par l'application du principe cartésien de la conservation de la quantité de mouvement dans le cas de chocs *inélastiques*, traduction de son axiome de départ : la quantité de mouvement des corpuscules est intégralement transmise au corps heurté. Lesage considère donc corpuscules et atomes comme parfaitement durs, ce qui implique une agglutination des corpuscules sur la matière ordinaire¹⁹. Afin d'éviter à l'univers une mort gravifique prématurée, qui découlerait de l'épuisement progressif des forces vives des corpuscules, à force d'interactions inélastiques, Lesage suppose « hors de l'Univers habité, un *Magazin d'Agens* propre à les renouveler ; assez vaste, pour en fournir jusqu'au terme que le Créateur a jugé à propos de mettre à la durée de son Ouvrage »²⁰. En outre, la relation ne vaut rigoureusement que pour des chocs opposés exactement simultanés et perpendiculaires²¹. Lesage lève la première de ces restrictions en montrant que l'on peut négliger les différences introduites par la prise en compte du caractère successif des chocs contraires, tandis que le traitement mathématique des chocs obliques le conduit à un ralentissement encore plus faible.

Ce résultat permet à Lesage d'écarter l'objection de la résistance au mouvement, et ce sans nuire aux propriétés proprement gravifiques de ses corpuscules. Il diminue en effet leur nombre, ou plutôt leur concentration, en vue de minimiser les chocs avec les atomes de la matière ordinaire. Et comme le freinage ne dépend pas de leur vitesse, mais seulement de celle du corps matériel, il compense la diminution des chocs par l'augmentation de cette

¹⁷ *Ibid.*

¹⁸ Lesage [1761, p. 77]. Ici, v désigne la vitesse d'un corpuscule ultramondain et m la masse du corps.

¹⁹ On trouvera chez Scott [1970, pp. 3-86] un historique fouillé des conceptions divergentes sur l'élasticité et l'inélasticité des corps aux XVII^e et XVIII^e siècles, mais aussi les points de convergence sur les lois mathématiques qui gouvernent leurs chocs. De ce point de vue, l'article « Percussion » écrit par d'Alembert pour l'*Encyclopédie* reflète un consensus, bien établi au milieu du XVIII^e siècle, sur la formulation des lois de conservation de la quantité de mouvement mais aussi des forces vives. L'académicien donne en particulier 10 « lois de la percussion dans les corps sans ressort », en s'appuyant sur la conservation de la quantité de mouvement qu'il formule dans le cas d'un choc frontal et dans celui où deux corps se rattrapent. De même, il fournit 14 « lois de la percussion pour les corps élastiques », qui font en outre intervenir la conservation des forces vives.

²⁰ Lesage [1761, p. 27].

²¹ Il est possible de reconstituer une démonstration en rapportant les mouvements à un repère dans lequel le corps heurté est initialement au repos. Dans le cas du choc frontal, on a : $m(v_2 - v_2) + \mu(v_1 + v_2) = (\mu + m)v'$, où m est la masse du corps, μ la masse d'un corpuscule gravifique ($\mu = 1$), v_1 et v_2 les vitesses "absolues" d'un corpuscule et du corps avant le choc, et v' la vitesse commune après le choc dans le repère du mouvement (elle correspond au ralentissement "absolu" éprouvé). Dans le cas du choc arrière, on a : $m(v_2 - v_2) + \mu(v_1 - v_2) = (\mu + m)v''$. Le bilan de ces deux chocs contraires s'obtient en soustrayant les vitesses v' et v'' acquises et redonne la loi de ralentissement fournie par Lesage.

vitesse afin de conserver l'action gravifique aussi efficace. Il dote donc ses corpuscules « d'une prodigieuse Rarité, compensée par une extrême Rapidité »²².

Lesage aboutit à la même conclusion en termes de forces vives. En considérant l'effet des chocs comme proportionnel au carré des vitesses relatives, il déduit que l'action gravifique des corpuscules est proportionnelle au carré de leur vitesse relative, tandis que la résistance au mouvement qu'ils exercent est proportionnelle au produit des vitesses absolues :

La *Gravitation* d'une Particule vers le Soleil, est principalement proportionnelle au *Quarré* de la Vitesse des corpuscules müs selon le Rayon vecteur. Aulieu que la Résistance qu'elle éprouve, est à peu près proportionnelle au Produit, de la vitesse des corpuscules müs selon la tangente, par la Vitesse de la Planète même. Donc, choses d'ailleurs égales : La Gravitation, est à la Résistance ; comme la vitesse des corpuscules, est à la Vitesse de la Planète ; c'est à dire, dans un Rapport aussi immense qu'on le veut.²³

Lesage envisage par ailleurs un ricochet de ses corpuscules, qui ne s'apparente pas à un rebond élastique, mais plutôt à un glissement. Il ne considère en effet comme totalement efficaces que les chocs *perpendiculaires* à la surface des corps matériels. Dans le cas d'une incidence oblique, seule la composante perpendiculaire de la vitesse contribue au choc, tandis que le corpuscule conserve sa composante tangentielle²⁴. Selon l'angle d'incidence, le spectre des vitesses tangentielles de retour se répartit entre la vitesse initiale (choc tangent) et la vitesse nulle (choc perpendiculaire). Lesage précise :

La vitesse moyenne des Corpuscules après le choc, est les 2/3 de leur vitesse avant le choc.²⁵

DE L'IMPULSION A L'ATTRACTION : LE CONTINU COMME APPROXIMATION DU DISCONTINU

Dans une lettre écrite le 9 mai 1757, d'Alembert poursuit avec Lesage une discussion sur la nature de la pesanteur engagée dès l'été 1756, à l'occasion du déplacement du philosophe français à Genève dont est issu son célèbre article pour l'*Encyclopédie*²⁶. Les deux hommes se sont en effet rencontrés et Lesage a pu lui exposer à loisir son système²⁷. D'Alembert a proposé au savant genevois d'écrire pour l'*Encyclopédie* les articles « Inverse » et « Hypothèse ». De ces deux projets éditoriaux, seul le second aboutit, mais preuve est faite de l'estime de d'Alembert qui se réservait les articles scientifiques²⁸. Au

²² Lesage [1761, p. 25].

²³ Lesage [1761, p. 82]. Note manuscrite, souligné dans le texte. Cette approche ne lui serait pas apparue avant 1764, ou même 1765. Avec les mêmes notations que celles utilisées *supra*, la somme des freinages exercés par les corpuscules ultramondains vaut $(v_1 + v_2)^2 - (v_1 - v_2)^2 = 4v_1v_2$. Comme la gravitation est proportionnelle à v_1^2 , le rapport des deux actions est comme v_1/v_2 .

²⁴ Lesage aurait envisagé ce retour des corpuscules gravifiques dès 1758. Prévost [1818, p. 58n].

²⁵ Lesage [1761, p. 86]. La proportion 2/3 a été rajoutée à la main. Dans le texte imprimé, et biffé, Lesage donne une série de rapports qui converge vers $2/\pi$, valeur qu'il a obtenue en calculant la moyenne des composantes tangentielles des vitesses obliques (soit le produit de la vitesse par le sinus de l'angle d'impact) pris sur l'intervalle $[0 ; \pi/2]$. Lesage ne donne aucune précision sur le calcul qui l'a conduit à la nouvelle valeur de 2/3.

²⁶ Candaux [1967] et Speziali [1989] évoquent ce voyage de d'Alembert. Sur l'article « Genève » de l'*Encyclopédie*, qui suscita une vive polémique, voir Candaux [1989].

²⁷ Gagnebin [1960, p. 154] signale une carte où Lesage a écrit : « Du 9^e au 30^e aoust 1756. Mr D'Alembert pour la 1^{ère} fois ». Lesage avait entamé une correspondance avec d'Alembert en 1753. On en trouvera quelques extraits dans Henry [1886].

²⁸ Lesage [1766]. Les matériaux de l'article « Hypothèse » ont été publiés dans Prévost [1805b, II, pp. 253-291]. Ils ont été analysés par Laudan [1981], ainsi que dans notre thèse.

dire même du philosophe, on trouve des échos de ses échanges avec Lesage dans l'*Encyclopédie* :

à l'égard de votre objection sur la nature de la pesanteur, je l'ai exposée, mais d'une manière qui m'est particulière au mot *force*.²⁹

D'Alembert ne discute cependant pas explicitement la théorie de Lesage, car le Genevois n'a encore rien publié. À l'article « Gravitation », il ne fait que signaler l'existence d'un mémoire soumis à l'Académie en 1756 :

M. Le Sage de Genève, a présenté depuis peu à l'Académie des Sciences un écrit qui contient un système ingénieux sur cette matière ; mais ce système n'est pas encore publié, & nous attendrons qu'il le soit pour en faire mention³⁰.

L'article « Force » reprend des arguments exposés dès 1743 dans son *Traité de Dynamique*. Le philosophe refuse d'identifier la notion de force avec la cause du mouvement, cause qui relève selon lui de la métaphysique puisque l'on ne peut connaître une force que par ses effets. C'est pourquoi il considère comme une simple définition la deuxième loi newtonienne du mouvement qui donne la force comme proportionnelle à l'accélération. De façon révélatrice, il utilise l'expression de force accélératrice³¹. En effet, chez d'Alembert, le terme de force s'applique spécifiquement à la propriété qu'a un corps de conserver son état de repos ou de mouvement, c'est-à-dire de résister aux changements. Autrement dit, il s'agit de l'action que peut exercer un corps par son inertie. D'Alembert reprend en outre la distinction introduite par Leibniz entre force vive (produit de la masse par le carré de la vitesse réelle) et force morte (produit de la masse par une vitesse virtuelle). Dans la section de l'article intitulée « Réflexions sur la nature des forces mortes & sur leurs différentes espèces », il remarque que les forces mortes peuvent donner lieu à un mouvement uniforme (cas du ressort) ou à un mouvement accéléré (cas de la chute libre) :

ou la *force morte* est telle qu'elle produiroit une vitesse finie, s'il n'y avoit point d'obstacle ; ou elle est telle que l'obstacle ôté, il n'en résulteroit d'abord qu'une vitesse infiniment petite, ou pour parler plus exactement, que le corps commenceroit son mouvement par zéro de vitesse, & augmenteroit ensuite cette vitesse par degrés. Le premier cas est celui de deux corps égaux qui se choquent, ou qui se poussent, ou qui se tirent en sens contraires avec des vitesses égales & finies ; le second est celui d'un corps pesant qui est appuyé sur un plan horizontal. Ce plan ôté, le corps descendra ; mais il commencera à descendre avec une vitesse nulle, & l'action de la pesanteur fera croître ensuite à chaque instant cette vitesse ; c'est du moins ainsi qu'on le suppose. [...] De-là les Mécaniciens ont conclu que la force de la percussion étoit infiniment plus grande que celle de la pesanteur, puisque la première est à la seconde comme une vitesse finie est à une vitesse infiniment petite, ou plutôt à zéro ; & par-là ils ont expliqué pourquoi un poids énorme qui charge un clou à moitié enfoncé dans une table ne fait pas avancer ce clou, tandis que souvent une percussion assez légère produit cet effet.³²

La force morte de tout corps pesant s'identifie donc avec une force accélératrice. Mais surtout d'Alembert opère une distinction capitale entre percussion et pesanteur, qui sont dans un rapport infini. Et cela le conduit à un paradoxe. En effet, si la force se réduit au

²⁹ Lettre de d'Alembert du 9 mai 1757, citée par Henry [1886].

³⁰ D'Alembert [1757b, p. 874]. Ce mémoire renvoyé à l'examen de Pierre Bouguer ne connaîtra malheureusement pas de rapport, suite au décès de l'académicien. Ce rapport aurait évidemment été d'un grand intérêt. On trouvera dans Bouguer [1748] les principales critiques qu'il opposait au mécanisme. Sur la position originale de Bouguer, Cartésien converti au newtonianisme, voir Fauque [1992].

³¹ Sur la réduction de la mécanique à une cinématique chez d'Alembert, voir Paty [1975, 1977] et Le Ru [1995].

³² D'Alembert [1757a, p. 116b].

mouvement ou à sa tendance, c'est-à-dire à une vitesse actuelle ou virtuelle, puisque celle-ci est nulle dans le premier instant dans le cas de la chute libre, alors un corps pesant ne devrait exercer aucune action :

si le mouvement produit par une force accélératrice quelconque, comme la pesanteur, commence par zéro de vitesse, pourquoi un corps pesant soutenu par un fil fait-il éprouver quelque résistance à celui qui le soutient ?³³

D'Alembert examine et réfute deux solutions destinées à résoudre cette difficulté. Seule la première va retenir notre attention, car elle est directement liée aux réflexions échangées avec Lesage. Elle consiste à prendre une vitesse de chute infiniment petite au premier instant. Considérant que la pesanteur agit de façon continue, d'Alembert fait remarquer que cette solution conduit à une vitesse de chute infinie en un temps fini. Pour sauver une telle explication, il faudrait rendre discontinue l'action de la pesanteur, c'est-à-dire l'assimiler à des percussions successives :

On dira peut-être que la nature de la pesanteur n'est point d'agir à chaque instant, mais de donner des petits coups finis qui se succèdent comme par secousses dans des intervalles de tems finis, quoique très-petits : mais on sent bien que cette supposition est purement arbitraire ; & pourquoi la pesanteur agiroit-elle ainsi par secousses et non par un effort continu & non-interrompu ? On ne pourroit tout-au-plus admettre cette hypothèse que dans le cas où l'on regarderoit la pesanteur comme l'effet de l'impulsion d'un fluide ; & l'on sait combien il est douteux que la pesanteur vienne d'une pareille impulsion, puisque jusqu'ici les phénomènes de la pesanteur n'ont pû s'en déduire, ou même y paroissent contraires.³⁴

Lorsque d'Alembert révoque en doute l'hypothèse d'un fluide responsable de la pesanteur, il pense bien entendu aux tourbillons cartésiens. Mais c'est aussi, on l'a vu, un écho à la théorie de Lesage qui, dans une lettre à d'Alembert, reprend précisément cet argument pour résoudre le paradoxe soulevé par le philosophe :

Le développement que j'osai donner dans ma dernière Lettre à votre Pensée sur le rapport *fini* des Pressions aux Percussions (en tant qu'il semble indiqué par la sensation qu'un Poids fait dans la main), n'avoit pour motif que distinguer tellement les parties de ce Raisonnement, qu'on sût précisément laquelle avoit besoin d'un appui ultérieur : Mais, je me plûs à la présenter sous un point de vûe qui fortifioit beaucoup une de mes idées favorites, c'est que *l'action de la gravité n'est pas continue* ; en vous laissant absolument le droit (qu'il auroit été bien absurde de vous contester) d'en faire tout l'usage que vous jugerîés à propos.³⁵

Dans son *Essai de chymie mécanique*, imprimé quelques années plus tard, Lesage tourne encore la remarque de d'Alembert à l'avantage d'une conception de la pesanteur discontinue, résultat de chocs qui se succèdent à des intervalles de temps donnés. Il précise :

ces Intervalles, ne sont pas infiniment petits. Car, comme alors, il arriveroit, que dans un tems Fini (une seconde par exemple), un même Corps, essuyeroit une Infinité de Chocs, de la part des Corpuscules ; sans cependant parcourir un Espace Infini (mais seulement quinze pieds par exemple) : Il faudroit ; que chacun des Chocs, fût infiniment foible ; c'est-à-dire, que la masse ou la vitesse des Corpuscules, fût Infiniment petite. [...] L'Expérience, contredit formellement, cette petitesse Infinie de

³³ *Ibid.*

³⁴ *Ibid.*, p. 117b.

³⁵ Henry [1886, pp. 18-19]. Lettre du 15 août 1757. Souligné dans le texte.

chaque Impression de la Gravité ; puisque, un Corps de quelques onces, posé sur la main, y fait & y maintient un creux très visible & une impression très sensible.³⁶

Dans une addition, il ajoute :

J'ai eu le bonheur de me rencontrer sur ce point, avec un grand Gèomètre ; qui me communiqua de vive voix, dès l'été 1756, sa façon de concevoir cette Difficulté, à peu près comme on la lit dans l'Encyclopédie à l'article *Force*, quoiqu'imprimé seulement en 1757 ; & dans ses *Elémens de Philosophie*, quoiqu'imprimé seulement en 1759.³⁷

Lesage cite un extrait des *Éléments de philosophie* dans lequel d'Alembert suit le même raisonnement que dans l'article « Force », mais écarte *a priori* l'idée d'une pesanteur discontinue :

suivant l'hypothèse généralement admise par les Philosophes ; l'action de la Pesanteur est *Continüe* ; & tend à chaque instant, à imprimer au Corps, la même Vitesse qu'au prèmier instant. Ainsi, cette Vitesse ; si elle étoit Finie au prèmier instant ; seroit *Infinie* au bout d'un tems Fini ; ce qui est contraire aux Observations. Voilà donc un Problème, que nous laissons à rèsoudre, aux Mèchanciens Philosophes³⁸.

Outre ce paradoxe, Lesage propose une démonstration par l'absurde de la discontinuité de la pesanteur. Elle repose sur le raisonnement suivant :

Si l'Action de la Gravité étoit *Continüe* ; les Loix que ses Effets observent dans les grandes parties de sa durée, seroient observées aussi dans ses plus petites parties.³⁹

Ainsi, la vitesse d'un corps en chute libre devrait être proportionnelle au temps écoulé quel que soit l'intervalle de temps considéré. Pour un intervalle de temps infiniment petit, cette vitesse est un infiniment petit du premier ordre. Or, si l'on mesure l'effet de la force d'un corps en mouvement par le carré de sa vitesse (autrement dit par sa force vive), « dans un tems infiniment plus petit qu'une Seconde, l'Impression d'un Poids sur ma main devrait être un infiniment petit du second ordre »⁴⁰. Et Lesage reprend le raisonnement de d'Alembert sur le « rapport infini des pressions aux percussions » :

L'Expèrience m'apprend ; que l'Impression perpetuelle que ce Poids produit sur ma main, est Finie, ou tout au moins Infiniment-petite du prèmier ordre, par rapport à celle qu'y produit la Chûte de ce même Corps⁴¹.

Il conclut :

La supposition que l'Action de la Gravité est *Continüe*, contredit formellement l'Expèrience.⁴²

³⁶ Lesage [1761, pp. 25-26].

³⁷ Lesage [1761, pp. 93-94].

³⁸ Souligné, orthographié et ponctué par Lesage. En renvoyant le problème aux seuls mécaniciens philosophes, d'Alembert semble donc estimer qu'il relève spécifiquement de la physique.

³⁹ Lesage [1761, pp. 94-95].

⁴⁰ Lesage [1761, p. 95].

⁴¹ *Ibid.*

⁴² *Ibid.*

LA FORMULE NEWTONIENNE COMME LIMITE D'UNE LOI UNIVERSELLE DES ATTRACTIONS ET REPULSIONS

En 1763, Lesage soumet à l'astronome Lalande, professeur au Collège royal et membre de l'Académie des sciences, une nouvelle loi mathématique de l'attraction. Pour lui éviter une rebuffade à l'Académie, l'astronome préfère la publier dans le *Journal des savants* :

je donnerai au journal dès qu'il rentrera la loi nouvelle que vous m'envoyés, parce que je crois qu'elle éprouveroit trop d'objections à l'académie ou l'on est attractionnaire newtonien pur-et-simple⁴³.

Le mémoire, intitulé « Loi qui comprend, malgré sa simplicité, toutes les Attractions et Répulsions, chacune entre des limites conforme aux Phénomènes », est publié en avril 1764. Le savant genevois propose rien moins qu'une formule capable de rendre compte de la gravitation universelle, de la cohésion moléculaire, de la dureté de certains arrangements atomiques, enfin de l'élasticité des fluides. Elle s'énonce comme suit :

HYPOTHÈSE. Les Sphères s'attirent en raison inverse des triangles de la distance de leurs centres, diminuée d'une quantité constante.

Symboliquement. Que la quantité constante soit exprimée par l'unité, et que deux distances que l'on compare, soient, l'une de D unités, et l'autre de d unités ; les nombres triangulaires correspondans à $D - 1$ et $d - 1$, sont $(DD - D) / 2$ et $(dd - d) / 2$. Je suppose donc que les Attractions sont réciproquement proportionnelles à $DD - D$ et $dd - d$.⁴⁴

L'expression mathématique de la loi de Lesage fait donc intervenir une constante *physique*, qui est l'unité dans laquelle doivent s'exprimer les distances. La valeur de cette grandeur unité est bien entendu déterminante, en particulier pour retrouver la formule newtonienne comme une approximation de cette loi générale. Lesage la fixe comme « beaucoup plus petite que toute mesure visible ». Pour les distances très supérieures à cette unité, la loi de Lesage tend vers la loi inverse du carré. À un niveau microscopique, lorsqu'on tend vers l'unité, l'attraction devient plus forte que celle prévue par Newton et rend compte de la cohésion. Pour une distance exactement égale à l'unité, elle devient infinie. Lesage estime que ce dernier cas correspond à des sphères parfaitement dures au contact, c'est-à-dire « dont les diamètres (ou la somme des demi-diamètres de celles qui se touchent) seroient exactement égaux à [l']unité »⁴⁵. L'unité en question correspond donc à la taille des atomes qui constituent les corps durs. Enfin, si la distance est inférieure à l'unité, une répulsion apparaît. Lesage ajoute :

Et quand cette distance est imperceptible relativement à l'unité de telle sorte que son quarré disparoit devant elle, l'attraction devient $1 / (0 - D)$; c'est-à-dire, $- 1 / D$; ou elle se change en répulsion réciproquement proportionnelle aux simples distances. Ce qui explique la nature de l'air et des autres *fluides élastiques*.

La structure des fluides élastiques, plus fine que celle des corps durs, rend ainsi compte de leurs propriétés. Dans la remarque qui clôt son article, Lesage entrevoit d'autres domaines d'application pour sa formule :

⁴³ Lettre du 2 novembre 1763. *Bibliothèque Publique et Universitaire de Genève*, Ms. suppl. 513, f. 208.

⁴⁴ Lesage [1764, p. 230]. Le "triangle" d'un nombre entier n est la somme arithmétique des n premiers nombres entiers, c'est-à-dire $n(n+1)/2$. Il faut ici étendre cette formule aux nombres réels. En appliquant la formule de la somme arithmétique, on a en effet $(D - 1) \times (D - 1 + 1) / 2 = (DD - D) / 2$.

⁴⁵ Cet assemblage forme à son tour un corps dur. Une des propriétés essentielles d'un corps dur est précisément d'être insécable. Sur cette définition des corps durs, héritée de Newton, voir Scott [1970].

Sans introduire une Loi différente pour des particules de différentes espèces, mais en appliquant seulement la même Loi à des particules de différens diamètres, entremêlés différemment, on rendra raison des Phénomènes les plus différens, soit dans l'inflexion de la lumière, soit dans les cohésions, soit dans les tubes capillaires, peut-être même dans les affinités Chymiques.⁴⁶

Mais elle a aussi ses limites. Le savant genevois signale que les attractions magnétiques n'en relèvent pas, qu'on les suppose en raison inverse du cube des distances (hypothèse de Whiston) ou en raison inverse du quadruple des distances (hypothèse de Musschenbroeck).

En dépit de l'existence d'une grandeur physique microscopique au cœur même de sa loi, Lesage ne suggère aucun mécanisme qui permettrait de la dériver. Le contraste est net avec la démarche suivie dans l'*Essai de chymie mécanique*, où la formule newtonienne était déduite du système des corpuscules ultramondains. C'est que cette publication répond à une autre finalité. La formule générale des attractions et des répulsions, dont Lesage décline les conséquences par des démonstrations algébriques, est destinée à montrer à la communauté savante qu'il possède l'étoffe d'un géomètre. Cette contribution au *Journal des Savants*, initialement écrite pour l'Académie, sert de caution mathématique pour ses recherches physiques sur la nature de la gravité, comme le confirme une lettre écrite à Lalande dès 1762 :

Toutes les recherches que je pourrai faire sur la géométrie pure, sur la physique expérimentale, et même sur l'agriculture, je ne m'y adonnerai, et je ne les publierai que pour inspirer au public un peu de confiance en moi ; et pour servir d'un petit passe-port à ma *Théorie générale des agens de la nature*, dont je suis très décidé à être le *héraut*.⁴⁷

DE LA SPECULATION SUR LES CAUSES A L'OPTIMISATION DES PARAMETRES

Ce n'est qu'en 1784 que Lesage publie dans les *Mémoires de l'Académie de Berlin* un texte destiné à une large audience et intitulé *Lucrèce newtonien*⁴⁸. Le titre est étonnant pour un morceau de physique du XVIII^e siècle car, plutôt que d'annoncer ce dont traite le mémoire, Lesage se place dans la tradition de l'atomisme grec. Avec ce texte, il cherche à réhabiliter la légitimité de faire système en matière de théorie physique. Il se fixe comme objectif de convaincre ses lecteurs, en particulier les mathématiciens, du bien-fondé de sa démarche.

Pour ce faire, Lesage met en scène une fiction historique et scientifique, celle de la découverte de la cause de la gravité par des Épicuriens idéalisés. La reconstruction rationnelle se veut une démonstration de la supériorité de l'esprit de spéculation sur les méthodes empiriques. Lesage reproche en effet aux recherches d'un Kepler ou d'un Galilée d'être erratiques : le premier ne déduit ses lois qu'après bien des conjectures gratuites et de longs tâtonnements, tandis que le second établit la loi de la chute des corps sur un principe d'accélération arbitraire. Il estime cette méthode de découverte des lois de la nature quelque peu inefficace, alors que les recherches *a priori* présentent l'avantage d'économiser les efforts du physicien en menant par voie de démonstration à des hypothèses dont la découverte, laissée à une démarche par essais et erreurs successifs, a tant coûté. Lesage cite Bacon pour souligner les limites de l'empirisme radical et l'importance des conjectures pour guider le physicien dans l'exploration des propriétés de la nature. Ces conjectures sont des auxiliaires précieux, sinon indispensables, quand bien même il faut les placer sous le contrôle des expériences et du calcul. Car Lesage sait bien que c'est la correspondance

⁴⁶ Lesage [1764, p. 234].

⁴⁷ Lettre à Lalande du 26 novembre 1762, citée par Prévost [1805a, pp. 85-88].

⁴⁸ Lesage [1784]. L'édition citée est celle de Prévost [1805a, pp. 565-598].

entre prédictions théoriques et phénomènes observés qui fait le succès d'un système explicatif :

[...] c'est un tel *accord*, plutôt que les marches mêmes les plus méthodiques, qui opère une conviction vraiment profonde sur presque tous les lecteurs d'une théorie physique quelconque : et cela, soit qu'ils soient instruits de cet accord avant que de l'avoir été de ces marches belles et louables, soit qu'il n'ait examiné celui-là qu'après celles-ci.⁴⁹

C'est en gardant à l'esprit cette exigence de vérification que Lesage s'engage dans un récit au conditionnel de la découverte de la nature de la gravité par des Épicuriens « laborieux » et « savants ». Jouant le jeu de l'antiquité fictive jusqu'au bout, Lesage substitue à l'expression de « corpuscules ultramondains » qu'il a forgée celle d'atomes gravifiques. Ses démonstrations font abstraction de tout symbolisme mathématique. Il y a là une véritable opposition de style scientifique entre une démarche *a priori*, purement physique, privilégiée par Lesage, et les recherches *a posteriori*, qui font la part belle aux développements mathématiques et qui sont plébiscitées par ses contemporains. Le savant genevois donne un exemple de l'efficacité de sa méthode « synthétique » en démontrant la loi de la chute des corps. A l'aide de son mécanisme de la gravité, il obtient le principe de l'accélération constante et, par des raisonnements géométriques, la loi des espaces parcourus⁵⁰. Il préfère cette approche à la voie « analytique ». Il critique en effet le caractère arbitraire, imprécis, voire contingent des principes tirés de faits observés et des calculs :

Ces démonstrations synthétiques des lois de la chute des graves, d'après un mécanisme dont la réalité n'avoit point été établie régulièrement, sont peut-être moins philosophiques, que n'auroient été des démonstrations analytiques, où l'on seroit uniquement parti des phénomènes, comme cela étoit possible (quoique très-difficile, à cause de l'inexactitude inévitable de cette sorte d'expériences). Mais, d'un autre côté, ces premières démonstrations sont bien plus philosophiques que ne l'étoit une *hypothèse* gratuite, qui est cependant le moyen d'invention employée par Galilée ; et elles sont tout aussi bien établies que les dernières, puisqu'elles le sont exactement par le même moyen de preuve, je veux dire, l'accord sensible de leurs conséquences avec les phénomènes : forme que l'inventeur et ses principaux successeurs ont jugé à propos d'employer, en avouant qu'ils étoient partis d'une pure *hypothèse*.⁵¹

Toute recherche commence par des conjectures dont la légitimité ne dépend pas tant de la méthode suivie pour les élaborer que de leur accord avec les phénomènes. Pour établir le mécanisme de la gravité, Lesage plaide pour une démarche synthétique qui part d'une cause physique, les atomes gravifiques, et conduit à aux lois mathématiques qui règlent la chute des corps et le mouvement des planètes. Lesage est tout à fait conscient que son approche spéculative est en rupture avec l'esprit du temps. Un texte de Condillac entérine au milieu du XVIII^e siècle une autre pratique scientifique qui, renseignée par les errements passés, gagne de plus en plus de savants :

Aujourd'hui, quelques physiciens, les chimistes sur-tout, s'attachent uniquement à recueillir des phénomènes, parce qu'ils ont reconnu qu'il faut embrasser les effets de la nature, et en découvrir la dépendance mutuelle, avant de poser des principes qui les expliquent. L'exemple de leurs prédécesseurs leur a servi de leçon ; ils veulent au moins éviter les erreurs où la manie des systèmes a entraîné.⁵²

⁴⁹ Lesage [1784, p. 568].

⁵⁰ Rappelons que les atomes gravifiques, pour être efficaces, possèdent une vitesse très supérieure à celle que les corps acquièrent au cours de la chute libre. En outre, l'action de la pesanteur est discontinue, puisqu'elle résulte d'impulsions successives.

⁵¹ Lesage [1784, pp. 586-587]. Souligné dans le texte.

⁵² Condillac [1749, p. 26].

En mécanique, soutient Condillac, c'est par la mesure des proportions dans lesquelles le mouvement se communique que le physicien peut découvrir les lois du mouvement et trouver dans les phénomènes les principes qui les gouvernent⁵³. Une nouvelle hiérarchie dans l'ordre de la connaissance s'affirme. Elle accorde la primauté aux faits sur les conjectures. Le discrédit de l'« esprit de système » et la révision à la baisse des ambitions explicatives des hypothèses dévalorisent les recherches spéculatives sur la nature intime des phénomènes ou les conjectures détachées de toute expérience préalable. C'est pourquoi Lesage dresse la liste des compétences qu'il juge nécessaires pour apprécier son système à sa juste valeur. Il désavoue en particulier les physico-mathématiciens qui se livrent exclusivement à des recherches dominées par l'analyse :

Toutes leurs connoissances, astronomiques, dynamiques, algébriques, etc. sont entièrement inutiles pour ce but. Et même s'ils s'étoient fortement livrés à ces connoissances, superflues à mon but, ce seroit à mes yeux, un titre d'incompétence, à moins qu'ils ne fussent des génies supérieurs : parce que plus ils y auroient consacré de temps et d'attention, moins ils auroient pu en accorder aux connoissances que j'exige.⁵⁴

La lecture des *Principes* de Newton lui inspire des mots qui trahissent sa position de physicien pur et le peu de cas qu'il accorde à la seule habileté mathématique, sans compromettre en rien l'admiration qu'il porte au savant anglais :

sa réputation, auprès des lecteurs plus savans et géomètres que philosophes, se fonde presque uniquement sur un mérite qui est étranger au physicien en tant que tel : savoir sur la profondeur de ses talens mathématiques. Les seuls philosophes apprécient cet ouvrage immortel, par ses deux côtés les plus flatteurs, les ressources d'un grand génie et le discernement le plus exquis.⁵⁵

Dans son *Lucrèce Newtonien*, Lesage qualifie de « luxe » pour l'usage de la physique « les proposition curieuses » et les « généralisations » de la théorie des forces centrales qui occupent les géomètres⁵⁶. Ici encore, l'opposition est totale avec ceux qui pensent, comme Condillac, qu'en astronomie physique le théorème des forces centrales constitue la véritable explication du monde. Lesage réserve la primauté au calcul dans « toutes les évaluations délicates », mais celles-ci sont « nécessaires seulement pour perfectionner les tables astronomiques ». Au préalable, il faut évaluer la pertinence du mécanisme de la gravité par la seule réflexion théorique, attitude qu'il prête encore une fois à des Épicuriens fictifs :

Comme ces philosophes auroient entrevu beaucoup de difficultés à presser *rigoureusement* quelques-unes de ces conséquences [de la gravitation mutuelle], pour savoir si elles s'accordoient *parfaitement* avec l'observation, et que cependant on ne s'embarque pas dans un travail pénible, avant que d'apercevoir au moins que ses résultats s'accorderont *en gros* avec des vérités d'expérience ; je présume qu'ils n'auroient appliqué sérieusement la *géométrie et le calcul* à cette gravitation, qu'après avoir cherché, par de *simples raisonnemens*, quels seroient à peu près les effets qui en découleraient, et avoir *aperçu* que ces effets conjecturés s'accordoient (à vue de pays) avec la constitution réelle de l'univers.⁵⁷

⁵³ L'allusion aux lois du choc, élaborées par Descartes sur le seul mode hypothético-déductif et presque toutes fausses, est transparente.

⁵⁴ Prévost [1805a, p. 107].

⁵⁵ Cité par Prévost [1805a, p. 71]. Lesage a très certainement eu connaissance de l'œuvre de Newton dans son édition continentale en 3 tomes par T. Le Sueur et F. Jacquier, Genève, 1739-40-42, avec des commentaires de D. Bernoulli, L. Euler, C. Maclaurin et *al.*

⁵⁶ Lesage [1784, p. 582].

⁵⁷ Lesage [1784, p. 580]. Souligné dans le texte.

La précision mathématique stricte n'a donc pas lieu d'être pour déterminer les principes physiques qui gouvernent le mécanisme de la gravité, d'autant que Lesage propose de recourir à des approximations aussi fines que nécessaire pour caractériser les atomes gravifiques. Après s'être accordé sur des ordres de grandeur capables de rendre compte « en gros » des « vérités d'expérience », il est toujours possible d'ajuster les paramètres physiques de la théorie, en particulier pour répondre aux objections des philosophes newtoniens contre tout mécanisme destiné à rendre compte des mouvements des astres. Lesage les a déjà discutées dans son *Essai de chymie mécanique*. Lesage souligne que ces ajustements qui jouent sur la porosité des corps matériels d'une part, sur la densité et la vitesse des atomes gravifiques d'autre part, ne se contredisent pas. Une même grandeur n'est pas sollicitée en sens contraires :

Point ici de symptômes, qui fournissent des indications opposées, et qui par là gênent le choix des remèdes.⁵⁸

C'est une allusion à l'éclectisme des explications destinées à sauver les tourbillons du début du siècle, éclectisme dénoncé par Bouguer en particulier. Cependant, Lesage éprouve le besoin de prévenir une nouvelle critique que pourrait susciter l'ingéniosité avec laquelle il défend son mécanisme :

Si l'on est satisfait de l'exacte conformité de ce système avec toute l'astronomie physique et avec ses dépendances sublunaires, on ne doit point se défier de la source de cette conformité ; comme si elle étoit l'effet de l'art avec lequel j'aurois ajusté toutes ces choses, et comme si d'autres systèmes aussi pouvoient être rectifiés de façon à cadrer tout autant que celui-là avec les phénomènes, pourvu qu'une main plus habile prît la même peine pour les y accommoder.⁵⁹

Autrement dit, Lesage se défend de recourir à des modifications *ad hoc* pour sauver son explication. En effet, il ne dote pas ses corpuscules gravifiques de caractéristiques nouvelles. Au contraire, il précise les limites entre lesquelles se situent les paramètres qui les caractérisent et, en annexe de son mémoire, il fournit des ordres de grandeur. À l'échelle microscopique, la matière ordinaire possède une structure semblable à des cages dont les barreaux interceptent les atomes gravifiques dans une proportion inférieure à un dix millième. Les atomes gravifiques, d'une taille presque négligeable par rapport aux intervalles qui séparent les barreaux, suivent en outre des trajectoires rectilignes selon plusieurs milliers de millions de directions. Leur vitesse s'élève à quelques millions de fois celles des corps célestes⁶⁰. Leur densité de population est telle que les collisions entre atomes gravifiques sont de l'ordre d'une sur quelques siècles, voire sur quelques millénaires. Ces valeurs limites assurent l'efficacité du mécanisme de la gravité et l'accordent avec les phénomènes observés. Elles sont destinées à convaincre le lecteur mathématicien que les recherches spéculatives de Lesage sur le mécanisme de la gravité n'entraîne aucune incohérence du point de vue des calculs.

Selon Lesage, du fait de la précision nécessairement limitée des observations, il est légitime de recourir aux approximations pour fonder le mécanisme de la gravité. L'argument était déjà présent dans l'*Essai de chymie mécanique* :

⁵⁸ Lesage [1784, p. 593].

⁵⁹ Lesage [1784, p. 595].

⁶⁰ Cette dernière valeur, destinée à minimiser la résistance au mouvement, est bientôt revue à la hausse par un célèbre contemporain de Lesage. En effet, dans l'hypothèse d'une gravitation produite par l'impulsion d'un fluide, Laplace [1805, pp. 325-326] calcule les conséquences de « la transmission successive de la force attractive » sur la trajectoire d'un astre, plus précisément la contribution à son équation séculaire. Dans le cas de la Lune, où cette contribution est insensible, il estime la vitesse de l'agent de la gravité « au moins cent millions de fois plus grande que celle de la lumière ».

Il regneroit assez de *Regularité* dans les conséquences déduites de cette Théorie ; non seulement pour satisfaire à la Regularité apparente, que l'imperfection de nos organes (auxquels les petites Irrégularités doivent échapper) nous fait croire avoir lieu dans la Nature ; mais même, pour satisfaire une Regularité beaucoup plus grande encore, si cela étoit nécessaire ; c'est-à-dire, si nous avions quelque certitude, qu'il y en règne effectivement une plus grande. Autant de Précision, par exemple, que dans l'Optique ; où l'on raisonne sur des Lignes Physiques, comme si c'étoit des Lignes Mathématiques.⁶¹

L'analogie avec l'optique est intéressante. Une loi mathématique règne sans conteste sur les recherches astronomiques et rend compte de l'attraction dans ses moindres détails (marées, chute libre, problème des trois corps...) sans préjuger de sa nature. En optique, des principes géométriques permettent de prévoir la marche des rayons lumineux, mais en première approximation seulement : ils ne constituent qu'une simplification de la réalité physique. En dernier ressort, Lesage juge que la formule newtonienne n'est qu'une approximation mathématique extraordinairement précise du mécanisme physique de la gravité.

LE VERDICT DE LA PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

Après 1784, Lesage ne publie aucun nouveau développement sur sa théorie mécaniste de la gravitation. C'est seulement à titre posthume que paraît en 1818 un *Traité de physique* composé par son élève Pierre Prévost à partir d'un manuscrit du savant genevois. Bien qu'il ait l'avantage d'offrir un exposé enfin complet du système des corpuscules ultramondains, ce texte n'apporte rien à ce que Lesage avait publié auparavant. Mais l'histoire ne s'arrête pas là.

Au début des années 1870, la théorie de Lesage est redécouverte⁶². Elle fait l'objet de discussions animées pendant plus de vingt ans. Au cœur des débats, on trouve les deux grands physiciens écossais du moment, Sir William Thomson (futur Lord Kelvin) et James Clerk Maxwell. Le premier reformule la théorie de Lesage dans le contexte de deux nouvelles branches de la physique, la théorie cinétique des gaz et la thermodynamique⁶³. Le second réfute cette version actualisée⁶⁴.

Dans le cadre de la théorie cinétique des gaz, les quantités qui caractérisent les atomes gravifiques (taille, vitesse, population par unités de volume) sont contenues dans la notion de libre parcours moyen, qui est la distance moyenne parcourue par un corpuscule entre deux collisions. Lesage avait cherché à minimiser les interactions entre corpuscules afin qu'ils ne soient pas confinés dans une zone limitée de l'espace. Dans un gaz, les chocs entre particules empêchent en effet que se développe tout flux anisotrope. Or, dès que deux corps matériels se font mutuellement écran, le mécanisme gravifique de Lesage nécessite un tel flux anisotrope. Autrement dit, le libre parcours moyen correspond à la portée de la force de gravité, qui par conséquent n'est pas infinie. De ce point de vue, Thomson fait remarquer que le libre parcours moyen doit seulement être assez grand pour permettre aux corpuscules gravifiques d'être efficaces dans le cadre de l'expérience humaine qui ne s'étend pas, à l'époque, au-delà du système solaire. Cela laisse ouverte la possibilité que la portée de la force de la gravité ne représente qu'une fraction des distances interstellaires.

L'aspect crucial de la théorie de Lesage demeure l'interaction entre matière ordinaire et corpuscules gravifiques. La dynamique de la collision ne peut être parfaitement élastique car le retour des corpuscules compenserait alors exactement la force de gravité. Pour se

⁶¹ Lesage [1761, p. 29].

⁶² Aronson [1964] a retracé l'historique de cette redécouverte.

⁶³ Thomson [1873]. Le physicien S. T. Preston contribue lui aussi à cette actualisation des corpuscules ultramondains.

⁶⁴ Maxwell [1890].

tirer d'affaire, Lesage envisageait une élasticité partielle de ses corpuscules. Dans le contexte de la thermodynamique, Thomson doit tenir compte d'une contrainte supplémentaire, la conservation de l'énergie, principe formalisé au milieu du siècle. L'énergie cinétique de translation perdue au cours du choc entre corpuscules gravifiques et matière ordinaire doit nécessairement apparaître sous une autre forme dans le bilan énergétique global. Thomson propose une solution au premier abord paradoxale : les particules gravifiques repartiraient après la collision avec une vitesse moindre sans cependant abandonner d'énergie au corps qu'ils ont heurté. Sur le modèle des molécules de gaz ordinaire, il affecte trois types de mouvement aux corpuscules gravifiques : translation, rotation et vibration. Selon Thomson, l'abaissement de l'énergie de translation est compensée par une augmentation de l'énergie de rotation et de vibration. Il parvient à exprimer cette propriété remarquable dans le cadre de la théorie cinétique des gaz. Il pense ainsi avoir accordé la théorie de la gravitation de Lesage avec les connaissances modernes.

C'est sur la base d'un argument thermodynamique que Maxwell la prend en défaut. Il fait en effet remarquer que la température des corps doit tendre vers celle à laquelle l'énergie cinétique moyenne d'une molécule est égale à l'énergie cinétique moyenne d'un corpuscule gravifique. En d'autres termes, le modèle d'interaction formulé par Thomson conduit bien à un équilibre mécanique entre corpuscules gravifiques et molécules de matière ordinaire, mais pas thermodynamique. Comme l'énergie cinétique moyenne des premiers est largement supérieure à celle des secondes, un transfert d'énergie sous forme de chaleur est inévitable afin que l'équilibre thermodynamique entre les deux soit réalisé⁶⁵. La quantité de chaleur alors dégagée est proprement colossale comme l'illustre, dans le cas de collisions parfaitement inélastiques avec le globe terrestre, un calcul de Henri Poincaré :

[...] cette quantité suffirait pour élever la température de 10^{26} degrés par seconde ; la Terre recevrait dans un temps donné 10^{20} fois plus de chaleur que le Soleil n'en émet dans le même temps ; je ne veux pas parler de la chaleur que le Soleil envoie à la terre, mais de celle qu'il rayonne dans toutes les directions.

Il est évident que la Terre ne résisterait pas longtemps à un pareil régime.⁶⁶

Même dans le cas de chocs partiellement élastiques, la portion de force vive dévolue aux effets gravifiques et convertie en chaleur donnerait des résultats tout aussi fantastiques. Après être restée en sommeil pendant un siècle, la théorie de la gravitation de Lesage venait de connaître une réhabilitation fulgurante.

L'ECUEIL DE LA MATHEMATISATION

Si le rejet de la théorie de Lesage au XVIII^e siècle opère sur plusieurs registres, on peut pour une bonne part les regrouper sous le thème de l'écueil de la mathématisation. Cet écueil de la mathématisation est en quelque sorte reconnu par Lesage. En effet, la seule publication destinée à une large diffusion qu'il consacre à sa théorie vise à revendiquer le droit à spéculer en matière de physique, sans nécessairement partir d'hypothèses mathématiques. De ce point de vue, il signe bien une physique obsolète. Dans le même temps, il ne refuse pas l'usage du calcul en physique. Bien au contraire, il développe des calculs algébriques sur les interactions entre corpuscules ultramondains et matière ordinaire. Il fixe même les ordres de grandeurs des principales caractéristiques des corpuscules ultramondains, afin d'accorder son mécanisme avec les phénomènes observés. Dans une perspective poppérienne, on peut voir dans ces spécifications, qui sont très

⁶⁵ Aronson [1964, pp. 65-67].

⁶⁶ Poincaré [1918, pp. 263-271].

différentes de modifications *ad hoc*, une promesse de mises à l'épreuve à venir⁶⁷. Mais Lesage ne fixe que des valeurs limites — valables dans l'état "actuel" de la précision des mesures — qui rendent indécélable, à l'époque, le seul effet capable de les trahir, un écart à la loi de l'attraction. Et comme elles sont toujours révisables, elles empêchent surtout que la théorie des corpuscules ultramondains soit prise en défaut.

La différence est notable avec les travaux des autres géomètres. Non seulement ces derniers livrent la théorie de l'attraction aux observations, la rendent controuvable, mais leurs calculs sont en outre dirigés vers des prédictions quantitatives et vers des mesures. Le puissant calcul différentiel est devenu indissociable des recherches de mécanique céleste, dans laquelle la gravité est un phénomène faisant jouer le continu. À l'inverse, il n'existe pas de théorie satisfaisante des fluides rares ou discontinus au XVIII^e siècle et les corpuscules ultramondains ne donnent lieu qu'à une mathématisation rudimentaire. C'est sans doute une des raisons du désintérêt des géomètres pour la théorie de Lesage.

Mais c'est tout autant le côté purement spéculatif de ses recherches qui est rejeté, car les « atomes gravifiques » sont proprement imperceptibles. Au milieu du XIX^e siècle, le philosophe et historien des sciences William Whewell souligne le caractère « inconcevables » de l'explication, tout en reconnaissant sa robustesse et son efficacité :

Such a hypothesis is very difficult to refute. [... It] may be made to account for the principal facts of the universal gravitation of matter. The great difficulty in the way of such a hypothesis is, the overwhelming thought of the whole universe filled with torrents of an invisible but material and tangible substance, rushing in every direction in infinitely prolonged straight lines and with immense velocity. Whence can such matter come, and whither can it go ? Where can be its perpetual and infinitely distant fountain, and where the ocean into which it pours itself when its infinite course is ended ? A revolving whirlpool is easily conceived and easily supplied ; but the central torrent of Bernoulli, the infinite streams of particles of Le Sage, are an explanation far more inconceivable than the thing explained.⁶⁸

Paradoxalement, aux yeux de Whewell, une explication en termes de tourbillons est plus facile à concevoir que celle des corpuscules ultramondains, alors même que ces derniers résolvent les difficultés auxquelles les premiers ont succombé. C'est donc une position épistémologique qui est refusée, celle d'une physique traitant d'entités qui échappent à la mesure.

Les idées de Lesage ont pourtant subsisté. Reformulées dans le cadre mathématique de la théorie cinétique des gaz, elles sont réfutées sur la base de calculs thermodynamiques. Entre-temps, la mathématisation de la physique a permis de conquérir de nouveaux domaines d'investigation. Mécanique statistique et thermodynamique ont rendu possible la mise à l'épreuve des corpuscules ultramondains par la mesure et le calcul. Il est difficile d'adhérer ici à la thèse de l'incommensurabilité de Thomas Kuhn.

BIBLIOGRAPHIE

Publications de Georges-Louis Lesage

1761 : *Essai de chymie mécanique, couronné en 1758 par l'Académie de Rouen, quant à la 2de partie de cette question : Déterminer les affinités qui se trouvent entre les principaux mixtes, ainsi que l'a commencé Mr Geoffroy ; et trouver un système physico-mécanique de ces affinités.* - Additions & corrections

⁶⁷ Lévy-Leblond [1996, pp. 239-240] souligne ce point en particulier.

⁶⁸ Whewell [1851, p. 499]. Le philosophe rapproche, à juste titre, le mécanisme de Lesage de l'explication fournie par Jean I Bernoulli en 1734.

postérieures au terme prescrit pour le concours, faisant la suite de l'Essai. Sans lieu ni date de l'impression. In-4°, 113 p., fig. et pl.

Exemplaires consultés à la Bibliothèque Nationale : cotes R 3210 et V 15853, ce dernier microfiché en 1984 (cote m 17485). Tampon Bibliothèque Royale. Titre, sommaire et notes marginales, sans doute de la main de Le Sage. Plusieurs exemplaires avaient été confiés à La Rochefoucauld, à l'occasion d'une visite à Genève en 1762, pour être remis à Lalande et au *Journal des Savants*. Dans une lettre publiée dans le *Journal Encyclopédique* du 15 mars 1782, Lesage fait savoir qu'il va déposer à la Bibliothèque royale un exemplaire de cette « œuvre de jeunesse », alors introuvable en librairie. Compte rendu dans le *Journal des Savants*, novembre 1762, pp. 734-738. Prix partagé avec Limbourg [1761], qui présente dans sa brochure les travaux de Lesage, et dont on trouvera un compte rendu dans le *Journal des savants*, mai 1762, pp. 295-302.

1764 : « Loi, qui comprend, malgré sa simplicité, toutes les Attractions et Répulsions, chacune entre des limites conformes aux Phénomènes », *Journal des Savants*, avril 1764, pp. 230-234.

1766 : Article « Inverse » de l'*Encyclopédie*, tome VIII, pp. 849-852.

1782 « Lettre sur le rapport du vide au plein dans un espace occupé par des sphères égales », *Journal Encyclopédique*, 1^{er} mars 1782, pp. 284-301.

1784 : *Lucrèce newtonien*, s. l. n. d., In-4°, 31 p., extrait des *Mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres de Berlin pour 1782*, Berlin, 1784, pp. 1-28. Édition citée : Prévost [1805, pp. 565-598].

BN : Vp 3175.

Sources primaires

Alembert Jean le Rond d', 1757a, Article « Force », *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Paris, Briasson, David, Le Breton, Durand, vol. 7, pp. 110-120. Fac-similé : Stuttgart - Bad Cannstatt, 1988.

1757b, Articles « Gravitation » et « Gravitité », *Ibid.*, vol. 7, pp. 871-876.

Bernoulli Jean, 1734, *Essai d'une nouvelle physique céleste servant à expliquer les principaux phénomènes du ciel, et en particulier la cause physique de l'inclinaison des orbites des planètes par rapport au plan de l'équateur du soleil*. Edition consultée : *Recueil des Pièces qui ont remporté les prix de l'Académie Royale des Sciences depuis leur fondation jusqu'à présent avec quelques Pièces qui ont été composées à l'occasion de ces Prix*, Paris, Martin, Coignard, Guerin, Jombert, 1752, Tome III.

Bouguer Pierre, 1748, *Entretiens sur la cause de l'inclinaison des orbites des planètes*, Seconde Édition, Dans laquelle on a saisi l'occasion d'examiner quelle est l'étendue du Mécanisme ou des loix de Physique, Paris, Ch. Ant. Jombert.

Condillac Etienne Bonnot de (Abbé) 1748, *Traité des sistèmes, où l'on en démêle les inconveniens et les avantages*, La Haye, Neaulme. Édition consultée : Paris, Dufart, 1803.

Lacaille Nicolas, 1746, *Leçons élémentaires d'astronomie géométrique et physique*, Paris, Guérin. Autres éditions : 1755, 1761, 1780.

Laplace Pierre-Simon, 1805, *Traité de mécanique céleste*, Tome quatrième, Paris, Courcier.

Limbourg Jean-Philippe (de) 1761, *Dissertation de Jean-Philippe de Limbourg, Docteur en Médecine, sur les affinités chymiques, qui a remporté le Prix de Physique de l'an 1758, quant à la partie chymique, au jugement de l'Académie Royale des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Rouen*. A Liège, chez F.G. Defoer, Imprimeur & Libraire, sous la Tour S. Lambert, à la Main d'Or, 1761. brochure in-12. de 87. pages, avec une table très étendue & corrigée des affinités.

Maxwell James Clerk, 1890, « Atom », *Encyclopaedia Britannica*, New York, Henry G. Allen, Ninth Edition, vol. 3, pp. 46ff.

Prévost Pierre, 1805a, *Notice de la vie et des écrits de Georges-Louis Lesage de Genève*, J. J. Paschoud, Genève.

1805b, *Essais de philosophie ou Étude de l'esprit humain*, Genève, J. J. Paschoud, 2 vol. Contient les matériaux de l'article « Hypothèse » de Lesage initialement destiné à l'*Encyclopédie*, tome II, pp. 258-291.

1818, *Deux traités de physique mécanique*, Genève, J. J. Paschoud. Contient le *Traité de physique mécanique*, rédigé d'après les notes de Le Sage. Selon Haag [1846-1859], ce *Traité de physique mécanique* rédigé d'après les notes de Le Sage est sans doute tiré d'un manuscrit intitulé *Physique de Le Sage* et déposé à la Bibliothèque de Genève. Il est suivi d'un développement de Prévost sur la chaleur rayonnante. BN : V. 50005, microfilmé mf 2741.

- 1843, Article « Lesage », *Biographie Universelle (Michaud) Ancienne et Moderne*, C. Desplaces, Paris, nouvelle édition, tome 23, pp. 277-281.
- Sigorgne Pierre, 1747, *Institutions newtoniennes ou Introduction à la Philosophie de Newton*, Paris, Quillau, 2 vol.
- Thomson William, 1873, « On the Ultramundane Corpuscles of Le Sage, also on the Motion of Rigid Solids in a Liquid circulating irrototially through perforations in them or in a Fixed Solid », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Fourth series, may 1873, pp. 321-332.

Sources secondaires

- Aronson Samuel 1964, « The Gravitational Theory of Georges-Louis Lesage », *Natural Philosopher*, 3, 51, pp. 53-74.
- Brunet Pierre, 1931, *L'introduction des théories de Newton en France au XVIII^e siècle, Avant 1738*, Paris, Blanchard. Édition citée : Slatkine Reprints, Genève, 1970.
- Candaux Jean-Daniel, 1967, « D'Alembert et les Genevois : quelques documents inédits », *Les Musées de Genève*, juillet et août 1967, n° 77 et n° 78, pp. 10-12 et 8-9.
- 1989, « D'Alembert et les genevois ou l'enchantement rompu », in Emery, Monzani [1989, pp. 119-133].
- Cantor G. N., Hodge M J. S. (eds), 1981, *Conceptions of ether, Studies in the history of ether theories (1740-1900)*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Chabot Hugues, 1999, « Enquête historique sur les savoirs scientifiques rejetés à l'aube du positivisme (1750-1835) », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2 volumes.
- Costabel Pierre, 1983, « La question des forces vives », *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, nouvelle série, n°8.
- Emery Monique, Monzani Pierre, 1989, *Jean d'Alembert, savant et philosophe : Portrait à plusieurs voix*, Paris, Éditions des archives contemporaines.
- Fauque Danielle, 1992, « Tourbillons ou attractions, Les physiciens du XVIII^e siècle entre un monde plein et un monde vide », in *De la nature, De la Physique Classique au Souci Écologique*, Paris, Beauchesne, pp. 205-235.
- Gagnebin Bernard, 1960, « Un maniaque de l'introspection révélé par 35 000 cartes à jouer : Georges-Louis Lesage », *Mélanges d'histoire du livre et des bibliothèques offerts à Mr Frantz Calot*, Paris.
- Gough J. B., « Georges-Louis Lesage », in Charles Coulston Gillispie (dir.), *Dictionary of Scientific Biography*, New York, Charles Scribner's Sons.
- Goupil Michelle, 1991, *Du flou au clair ? Histoire de l'affinité chimique*, Paris, Éditions du CTHS.
- Haag Eugène et Émile, 1846-1859, *La France protestante ou Vie des protestants français... depuis les premiers temps de la Réformation jusqu'à la reconnaissance du principe de la liberté*, Réimpr. de l'éd. de J. Cherbreliez, Slatkine Reprints, Genève, 1966. T. VI, pp. 570-571.
- Henry Charles, 1886, *Correspondance inédite de D'Alembert avec Cramer, Lesage, Clairaut, Turgot, Castillon, Beguelin, etc. publiée avec notice, Extrait du Bulletin di bibliografia e di storia delle scienze matematiche e fisiche*, Tome XVIII, Septembre-décembre 1885, Rome, imprimerie des sciences mathématiques et physiques.
- Hoefffer (dir.), 1862-1870, *Nouvelle Biographie Générale*, Paris, Firmin Didot.
- Jovy Ernest, 1917, 1918a, 1918b, « La correspondance du Duc de la Rochefoucauld d'Enville et de Georges Louis Le Sage conservée à la bibliothèque de Genève », *Bulletin du bibliophile*, novembre-décembre 1917, pp. 461-490, janvier-février 1918, pp. 35-55, mars-avril 1918, pp. 135-151. Réédition : Paris, H. Leclerc, 1918, In-8°, 71 p.
- Laudan Larry, 1981, « The medium and its message : a study of some philosophical controversies about ether », in Cantor et Hodge [1981, pp. 157-185].
- Le Ru Véronique, 1993, *Jean le Rond d'Alembert philosophe*, Paris, Vrin.
- 1995, « La force accélératrice : un exemple de définition contextuelle dans le *Traité de Dynamique* de d'Alembert », *Revue d'Histoire des Sciences*, XLVIII / 3-4, pp. 475-494.
- Lévy-Leblond Jean-Marc, 1996, *Aux contraires, L'exercice de la pensée et la pratique de la science*, Paris, Gallimard, nrf essais.
- Paty Michel, 1975, « L'âge classique de la physique : d'Alembert (principes, causalité et théorie physique) », *La Pensée*, n° 182, août 1975, pp. 43-65.

- 1977, *Théorie et pratique de la connaissance chez Jean d'Alembert*, Thèse de doctorat en philosophie, Université de Strasbourg-2.
- 1998, *D'Alembert ou la raison physico-mathématique au siècle des Lumières*, Paris, Les Belles Lettres, Figures du savoir.
- Plan Pierre-Paul, 1944, « Les papiers de Georges-Louis Lesage », *Les Musées de Genève*, novembre 1944.
- Poincaré Henri, 1918, *Science et méthode*, Paris, Flammarion. Édition citée : 1947.
- Sayous André 1861, *Le dix huitième siècle à l'étranger, Histoire de la littérature française dans les divers pays de l'Europe depuis la mort de Louis XIV jusqu'à la révolution française*, Amyot, Paris, 2 volumes.
- Scott Wilson L., 1970, *The conflict between atomism and conservation theory, 1644-1860*, London, MacDonald, New York, Elsevier.
- Senebier Jean, 1786-1790, *Histoire littéraire de Genève*, t. III, pp. 200-203.
- Speziali Pierre, 1989, « D'Alembert et les savants de Genève », in Emery, Monzani [1989, pp. 461-474].
- Whewell William, 1851, « Of the transformation of hypotheses in the history of science », *Cambridge Philosophical Society*, May 19, 1851. Édition citée : *On the philosophy of discovery, Chapters historical and critical*, New York, Burt Franklin, 1971, pp. 492-503.