La mise en place d'une nouvelle philosophie de la physique au 18e siècle

Patrick Guyot

UNIVERSITE DE BOURGOGNE

Ecole doctorale LISIT 491

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Bourgogne

Philosophie

Par Patrick Guyot

Date de soutenance : 15 octobre 2012

La mise en place d'une nouvelle philosophie de la physique au 18e siècle

Directeur de thèse Gérard Chazal, professeur à l'Université de Bourgogne

Jury

Simone Mazauric, professeur à l'Université de Nancy 2, rapporteur.

Anastasios Brenner, professeur à l'Université de Montpellier III, rapporteur.

Frédéric Truchetet, professeur à l'Université de Bourgogne

Résumé :

La mise en place d'une nouvelle philosophie de la physique au 18ème siècle.

L'étude des ouvrages de physique publiés au 18e siècle montre que l'évolution depuis le 17e siècle est loin de se limiter à l'approfondissement des seules découvertes de Newton, comme on a souvent tendance à le présenter aujourd'hui.

La physique mécaniste de Descartes, attaquée par Newton, va continuer de se développer avec l'aide de nombreux savants, en particulier de l'Académie des Sciences parisienne. Les débats entre cartésiens et newtoniens ne sont toujours pas éteints dans les années 1740.

Ce véritable duel scientifique de plus d'un demi-siècle est au cœur d'une réflexion plus large sur la physique et s'exerce sur plusieurs plans :

- Mathématisation
- Concepts, définitions, lois, rôle de l'expérience et des hypothèses.
- Problèmes philosophiques : les principes, la recherche des causes, les problèmes théologiques.

L'objet de cette thèse est de montrer que la diversité des approches et des méthodes tout au long du premier 18e siècle va permettre l'émergence d'une nouvelle conception de la physique. Cette diversité se manifeste dans les écrits d'auteurs nombreux, les savants eux-mêmes, mais aussi ceux qu'on a appelés les transmetteurs, dont le rôle fut très important.

Mots clés : physique, philosophie des sciences, newtonianisme, cartésianisme, expérimentation, rationalisme, mathématisation.

Abstract :

The Development of a new Philosophy of Physics in the 18th Century.

The study of books on physics published in the 18^{th} century shows that the evolution since the 17^{th} century is much more than just a furthering of the discoveries of Newton, as we often tend to present it these days.

Descartes's mechanistic physics, severely criticized by Newton, was to develop with help from many scientists, particularly from the Academy of Sciences in Paris. The discussions between Cartesians and Newtonians did not end in the 1740's. This real scientific duel, which lasted over half a century, was the heart of a broader way of thinking about physics which operated on several levels:

- Mathematization
- Concepts, definitions, laws, the role of experimentation and hypotheses
- Philosophical problems: principles, the search of the causes, theological problems.

The aim of this thesis is to show that the variety of the approaches and the methods throughout the early 18^{th} century was to allow the creation of a new conception of physics.

This variety appears in the works of many authors, who were either scientists themselves, or transmitters of science, who played a very important role, too.

Keywords: Physics, Philosophy of Science, Newtonianism, Cartesianism, experimentation, rationalism, Mathematization.

Remerciements

En terminant ce travail, je tiens à remercier Gérard Chazal, qui a accepté de me faire confiance, d'abord pour me suivre lors de mon DEA et ensuite pendant les années où j'ai préparé cette thèse, qui a su régulièrement et patiemment orienter mes recherches vers des auteurs que j'avais trop peu étudiés, ou sur des thèmes qui ne devaient pas être négligés.

Je remercie également Madame Simone Mazauric, Messieurs Anastasios Brenner et Frédéric Truchetet, qui ont accepté de me lire et de faire partie de mon jury de thèse.

J'ai une pensée particulière pour Evelyne Barbin et les membres de la commission inter-IREM *Épistémologie et Histoire de mathématiques*, avec qui j'ai beaucoup appris et noué des relations qui vont bien au-delà du professionnel.

Je remercie mon ami Frédéric Métin, avec qui j'ai beaucoup travaillé sur des domaines variés d'histoire et de philosophie des sciences, qui sait ce que je lui dois, et auquel me lie une fraternelle complicité.

Merci enfin à mon épouse Françoise qui a bien voulu accepter mon investissement dans cette recherche de longue durée. À elle, à Marion et Fabien, à Muriel et Paul, à Lisa et …., je dédie ce travail.

Introduction

Une première idée qui vient à l'esprit en débutant l'étude qui suit concerne la définition du mot *physique*, qu'on substitue de plus en plus au 18^{e} siècle à *philosophie naturelle*. Le sens de ce mot évolue-t-il entre la fin du 17^{e} siècle et la fin du 18^{e} siècle ? On constate que, dans les dictionnaires généralistes, la définition reste la même, alors que dans les dictionnaires spécialisés, il y a une évolution sensible. Prenons par exemple le *Dictionnaire de l'Académie française* de 1694. Il propose au mot *physique* : « Science qui a pour objet la connaissance des choses naturelles. La physique fait partie de la philosophie. »[1] Le *Dictionnaire de l'Académie* de 1798 fournit la formule suivante, pratiquement identique à celle de 1694 : « Science qui a pour objet les choses naturelles. La physique est une partie de la philosophie. »[2].

En ce qui concerne les ouvrages scientifiques, l'évolution est un peu plus sensible. Jacques Duroure, en 1653, fournit la définition suivante : « C'est la science des choses corporelles, comme la figure, le mouvement, etc. »[3] Il ajoute qu'elle comporte deux parties, ce qui concerne les corps en général, et leur assemblage auquel on a donné le nom de monde, et ce qui concerne les éléments de l'univers (le ciel, le feu, l'air, l'eau, la terre, les météores, les fossiles et les corps vivants). Le *Dictionnaire de mathématique et de physique* de Savérien, paru exactement cent ans après l'ouvrage de Duroure, c'est-à-dire en 1753, montre un changement dans les objectifs, on passe des contenus aux méthodes : « La physique est la science des choses naturelles, c'est-à-dire l'art de connaître les effets et de développer les causes. »[4] Nous pouvons compléter ce regard par la définition du *Dictionnaire raisonné de physique* de Brisson de l'an VIII de la République (correspondant à 1799 et 1800) : « La physique est la science des choses naturelles. L'objet de la physique est de connaître les corps

[1] Dictionnaire de l'Académie française, Paris, Coignard, 1694.
[2] Dictionnaire de l'Académie française, Paris, Smits, 1798.
[3] Duroure, Jacques, *La Physique expliquée suivant les sentiments des anciens et nouveaux philosophes,* Paris, chez l'Auteur, 1653.
[4] Savérien, *Dictionnaire universel de mathématique et de physique*, Paris, Rollin et Jombert, 1753.

par leurs propriétés, par les effets qu'ils présentent à nos sens, et par les lois selon lesquelles s'exercent leurs actions réciproques. »[5]

Que peut-on conclure de ces quelques éléments ? Il semble que les scientifiques aient pris en compte une nouvelle approche de la physique, puisqu'on évoque au milieu et à la fin du 18e siècle les *effets*, les *causes*, les *lois* qui régissent les objets naturels. Il faut donc nous pencher sur les héritages, et les innovations pour comprendre ce qui s'est passé en ce 18e siècle. Est-ce une période de continuité, comme on le dit souvent, ou assiste-t-on à des changements importants, comme pourraient le laisser entendre les définitions que nous venons de donner ? Les fondements de ce qu'on a appelé la nouvelle physique (ou la physique classique) ont été élaborés au 17e siècle à partir des travaux de personnages restés célèbres comme Kepler, Galilée, Descartes, Pascal, Huygens, Newton et Leibniz (ce dernier ayant encore produit de nombreux écrits au 18e siècle), mais aussi par d'autres moins connus, mais qui ont permis un avancement dans la compréhension du monde, comme Stevin, Roberval, Mariotte, Torricelli, Boyle, Hooke.

On voit au siècle suivant une modification se faire jour dans les contenus, avec l'apparition de nouveaux domaines (chaleur, électricité et magnétisme) et la disparition d'autres domaines (par exemple ceux qui feront alors partie de l'histoire naturelle). Mais ce n'est pas par cette entrée là que nous souhaitons observer ce qui caractérise le 18e siècle. Il n'apporte pas de réelle révolution scientifique, la physique va s'organiser au milieu de multiples débats sur des plans bien différents : elle va ressentir de plus en plus le besoin de s'appuyer sur les mathématiques. L'utilisation du calcul infinitésimal apparu à la fin des années 1600 sera la préoccupation mathématique essentielle des physiciens, et va pénétrer tous les domaines de la physique, la mécanique, l'optique, et l'astronomie. Elle va aussi

[5] Brisson, *Dictionnaire raisonné de physique*, Paris, Librairie économique, an VIII, tome cinquième.

chercher à se doter de concepts acceptés par tous, en essayant de faire intervenir des termes clairement définis. Un débat important va se dérouler autour de la notion de force. La question de la méthode à mettre en œuvre, déjà longuement en débat précédemment avec Bacon et Descartes, va être centrale, entre rationalisme et empirisme, incluant des échanges sur l'importance et la place de l'expérimentation et de l'observation. Dieu, omniprésent dans les textes scientifiques du 17^{e} siècle, conserve-t-il cette place prépondérante, ou assiste-t-on à un ralentissement à la référence religieuse dans les textes de physique ? Fait-on encore souvent appel aux principes premiers et seconds des métaphysiciens du 17^{e} siècle ? La question des causes et des effets évolue-t-elle ? Ces commentaires et ces questions nous conduisent à classer notre étude sous trois parties, la première consacrée à la mathématisation de la physique, la seconde aux questions épistémologiques traitant des concepts et des méthodes, et la troisième aux questions philosophiques, les principes, les causes et la place de Dieu.

Une question sera présente tout au long de ce travail : les avancées de la science sont-elles linéaires, ou bien, comme au 17^{e}, assiste-t-on à l'intervention ponctuelle de quelques savants (Kepler, Galilée, Descartes, Newton) qui bouleversent les pratiques et les contenus ? Ou bien assiste-t-on à des avancées lentes, mais complexes, à une réorganisation des concepts qui se fait à travers des débats nombreux, souvent sans réel consensus, les lignes de clivage des positions de chacun étant mobiles selon le sujet en cause ? Nous verrons que des écoles de pensée existent, mais moins sectorisées qu'on a pu le dire ; la situation évolue lentement, mais continuellement.

Nous devons ajouter ici notre volonté de montrer que ceux qu'on a appelés les « transmetteurs » ont joué un rôle essentiel, en plus des « découvreurs », au 18^{e} siècle, alors qu'au 17^{e} il y avait essentiellement des découvreurs qui transmettaient eux-mêmes. L'étude des manuels permet d'éclairer cette transmission. Comme le marquis de L'Hôpital qui en mathématiques fait connaître le calcul infinitésimal de Leibniz, nous rencontrons en physique des transmetteurs célèbres, Voltaire, la marquise du Châtelet, d'autres inconnus, Gamaches, d'Antoni, Musschenbroek, Vivens, et d'autres entre les deux, Privat de Molières, Sigorgne, Pemberton, … Grâce à eux, on peut comprendre les acquis immédiats, ce qui ne fait pas encore consensus et la part de conservatisme dans les sciences. Ces personnages jouent un rôle important dans la nouvelle organisation de la physique.

La physique se fait (de nouvelles notions apparaissent, d'autres font l'objet de débats, voire sont rejetées) en même temps qu'elle se structure (séparation du pourquoi et du comment, place de la métaphysique). Cette thèse est consacrée à une mise en place de la physique, il s'agit donc d'étudier la physique qui se fait. Pour cela le contact direct avec les textes nous a semblé répondre le mieux à cette nécessité de montrer le mouvement et la diversité de la pensée, plutôt que des commentaires ou des raccourcis. Les transmetteurs sont souvent des auteurs inconnus, certains montrent des idées peu communes et sans postérité, d'autres ont instillé lentement des idées nouvelles ; on doit en montrer un reflet, même si nous ne pouvons pas être exhaustifs. Nous avons donc dû choisir des exemples significatifs, fournis à titre d'illustration, permettant de se faire une idée la plus claire possible de ce qui se joue.

Partie 1
Mathématisation de la physique

Il est banal de dire de nos jours que l'étude de la physique ne peut se faire sans avoir à sa disposition un solide bagage mathématique, et que toutes les branches des mathématiques, l'arithmétique, l'algèbre, la géométrie, l'analyse, les statistiques et les probabilités, interviennent pour expliquer les phénomènes ou pour théoriser à partir des observations réalisées. La physique enseignée actuellement dans les lycées et les universités est essentiellement quantitative, et les expériences effectuées ont comme objectif principal d'illustrer ou d'induire une relation entre différentes grandeurs. Décrite ainsi, elle est très éloignée de celle qui était étudiée dans les siècles passés. L'électricité par exemple a été constituée jusqu'à la fin du 18ème siècle comme une accumulation d'observations et d'expériences, sans posséder de définitions de grandeurs spécifiques, et sans faire intervenir des relations ou des calculs. Nous pourrions dire pratiquement la même chose pour l'étude de la chaleur. À cette époque une réelle intervention des mathématiques n'est à l'œuvre que pour ce qui concerne l'optique, la mécanique au sens large, et l'astronomie ; il faut ajouter que cette participation dans les trois disciplines n'est pas vraiment neuve, et qu'un retour en arrière permet de mieux appréhender les débats et enjeux au 18ème siècle.

1.1 Retour sur les Anciens

Il est nécessaire, pour comprendre cette progressive mise en relation des deux disciplines que sont les mathématiques et la physique, de remonter suffisamment loin dans le temps, et de brosser rapidement le portrait de leurs rencontres (ou de leur absence de rencontre) et de leur « cohabitation ». On en voit les premières traces importantes chez les Pythagoriciens à partir du 6ème siècle av J-C, Aristote évoque ces derniers dans sa *Métaphysique* :

> *[…] ceux qu'on appelle les Pythagoriciens s'intéressèrent les premiers aux mathématiques et les firent progresser. Comme ils avaient été élevés dans cette science, ils crurent que ses principes étaient les principes de toutes choses ; et, puisque par nature les nombres sont les premiers des principes mathématiques, c'est dans les nombres qu'ils pensaient voir de nombreuses similitudes avec les êtres éternels ainsi qu'avec les créatures soumises au devenir, bien plus encore que dans le feu, la terre et l'eau (c'est ainsi que telle propriété des nombres représentait la justice, telle autre l'âme et l'intellect, telle autre le moment opportun et de même pour à peu près tout ce qui leur ressemblait) ; puisqu'en outre ils voyaient que les propriétés et les rapports musicaux étaient exprimables par des nombres, et puisque enfin, toutes les autres choses étaient, de toute évidence, à la ressemblance des nombres, qui eux-mêmes étaient premiers dans tout ce que comporte la nature, ils formèrent l'hypothèse que les éléments des nombres sont les éléments de toutes choses, et que le ciel tout entier est harmonie et nombre.*[6]

Deux sources d'observations les ont ainsi principalement amenés à ces considérations : il existe un rapport mathématique entre les notes de la gamme musicale et la longueur de la corde qui vibre en émettant des sons, et d'autre part on peut constater des

[6] Aristote, *Métaphysique*, A, V, 985 b 23, cité par André Pichot dans *La naissance de la science*, tome 2, Folio essais, Gallimard, 1991, page 217.

valeurs constantes des périodes orbitales des corps célestes. Les pythagoriciens ont extrapolé ces résultats en concluant que le nombre est omniprésent dans l'univers, et qu'il y a un lien entre les rapports mathématiques de la théorie musicale, et les rapports numériques des périodes orbitales des planètes, en accordant ainsi au nombre un statut de l'ordre du mythique ou du divin, puisqu'il est cause de l'harmonie du monde. Ce sera un thème qui reviendra fréquemment en physique et en astronomie au cours des siècles qui suivront, jusqu'à culminer au 17ème siècle avec Kepler, mais qui n'aura pas de réelle postérité au 18ème siècle.

Les pythagoriciens considèrent que les mathématiques constituent une entité indépendante des applications auxquelles on les confronte. Mais le statut particulier de ces mathématiques conduit ces philosophes à accepter l'idée que les phénomènes naturels sont guidés par des nombres qui commandent au monde qui nous entoure. De plus l'idée d'un monde en harmonie les amène à privilégier certaines formes géométriques dans leur description de l'univers, comme le cercle et la sphère (il faudra attendre le 17ème siècle et Kepler pour voir proposer une forme différente). Leur proposition d'un univers ou d'une terre sphérique doit autant sinon plus à la recherche d'une forme parfaite à laquelle la sphère se prête bien d'après eux, qu'aux résultats d'observations les conduisant à imaginer cette sphéricité. C'est dans cet ordre d'idée qu'on peut ranger leur proposition de la rotation circulaire des astres. Diogène Laërce (troisième siècle après J-C) écrivait au sujet de Philolaos de Crotone, un pythagoricien du cinquième siècle avant J-C : « Il pense que tout est produit par la nécessité et l'harmonie. Il est le premier à avoir affirmé que la Terre tourne en rond, à moins que ce ne soit Hycétas de Syracuse, comme d'autres le disent. »[7]. On assiste là à la première proposition établie d'un mouvement de la terre, avant celle d'Aristarque de la rotation de la terre autour du soleil au troisième siècle avant J-C, cette dernière idée rapportée par Archimède dans l'*Arénaire* quelques décennies après l'époque d'Aristarque.

Les Pythagoriciens ont ouvert la voie à la théorie platonicienne des Idées. Leur conception d'un monde harmonieux issu des liens qu'ils voient entre les mathématiques, la

[7] *Les Présocratiques*, édition établie par Jean-Paul Dumont, La Pléiade, Gallimard, 1988, page 488.

musique et l'astronomie servira de modèle à Platon qui s'inspirera également de leurs recherches autour des cinq figures des volumes « réguliers ». Au quatrième siècle avant JC l'Académie de Platon propose un modèle géométrique de l'univers rendant compte des mouvements de la Lune, du Soleil et des cinq planètes connues (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne). Leur monde est sphérique et les astres doivent se déplacer selon des cercles, qui sont les seules figures géométriques parfaites à leurs yeux. Il s'agit donc de concevoir un système de mouvements circulaires combinés pouvant rendre compte des mouvements « erratiques » des planètes telle Mars. Une astronomie géométrique, qui verra son apogée avec Ptolémée au deuxième siècle après JC, est donc née à cette époque. Les mathématiques sont au premier plan des préoccupations de Platon et de ses élèves. Le maître lui-même résume leurs idées dans le Timée en proposant un monde entièrement dépendant de la géométrie avec le triangle comme figure fondamentale.

> *Et d'abord, que le feu, la terre, l'eau et l'air soient des corps, c'est une évidence pour tout le monde, je suppose ; or, tout ce qui appartient à l'espèce des corps possède aussi la profondeur. Mais, à son tour, la profondeur se trouve, de toute nécessité, enveloppée naturellement par le plan. Toute face plane limitée par des droites est issue de triangles. Or tous les triangles procèdent de deux triangles qui ont chacun un angle droit et les autres aigus : l'un a, de part et d'autre une partie de l'angle droit divisée par des côtés égaux, tandis que l'autre a des parties inégales d'un angle droit divisées par des côtés inégaux. Voilà bien ce que nous supposons être le principe du feu et de tous les autres corps, en progressant ainsi dans une explication qui combine vraisemblance et nécessité.*[8]

La combinaison des triangles conduit à quatre espèces de solides « réguliers » : la première espèce, le tétraèdre (pyramide), la deuxième, l'octaèdre, la troisième, l'icosaèdre, et la dernière, le cube, et ces quatre solides sont associés aux quatre éléments constitutifs de la matière, respectivement le feu, l'air, l'eau et la terre. Platon, fort de sa connaissance des cinq polyèdres réguliers, associe le cinquième solide connu, le dodécaèdre (le plus proche des cinq de la forme sphérique) au cosmos tout entier. Chacun de ces quatre corps, qu'on appelle *principe*, est considéré par Platon comme « un alphabet de l'Univers », ce qui par exemple lui permet d'expliquer les transformations chimiques par le réarrangement des faces d'un polyèdre en d'autres polyèdres.

[8] Platon, *le Timée*, traduction Luc Brisson, GF-Flammarion, Paris, 1992, p 155.

Le fondateur de l'Académie ne limitait pas ses observations à la seule géométrie ; il fait même passer avant elle l'arithmétique, dont aucune science ne peut se passer, ainsi qu'il l'écrit dans *La République* :

> *Prenons quelqu'une de ces études qui s'étendent à tout.*
>
> *Laquelle ?*
>
> *Par exemple cette étude commune, qui sert à tous les arts, à toutes les opérations de l'esprit et à toutes les sciences, et qui est une des premières auxquelles tout homme doit s'appliquer.*
>
> *Laquelle ? demanda-t-il.*
>
> *Cette étude vulgaire qui apprend à distinguer un, deux et trois ; je veux dire, en un mot, la science des nombres et du calcul ; n'est-il pas vrai qu'aucun art, aucune science ne peut s'en passer ?*
>
> *Certes !* [9]

Après Platon on assiste à une modification des conceptions au sujet de la nature, principalement avec l'introduction de la physique des « causes » d'Aristote (384 – 322 avant J-C), la « philosophie naturelle », qui étudie les « changements » ou « altérations » dont font partie les mouvements dans l'espace, mais ne s'accompagne pas de l'utilisation d'un appareil mathématique. En effet, pour Aristote et après lui pour la plupart des savants du Moyen Âge, les mathématiques ne servent qu'à mesurer des relations entre des variations observées, mais ne peuvent aider à comprendre les causes de ces variations, elles engendrent même des difficultés de compréhension (problème de la continuité, paradoxes de Zénon sur le discret et le continu). Aristote donne toutefois au temps un statut lié à des mathématiques ; selon lui, le temps est « le nombre du mouvement selon l'antérieur et le postérieur »[10].

Nous voyons un des rares exemples de cette utilisation limitée d'un outil mathématique dans un chapitre célèbre de la *Physique* traitant des *rapports proportionnels*

[9] Platon, *La République VII,* trad. Robert Baccou, GF Flammarion, 1966, p 281.
[10] Aristote, *Physique*, Traduction et présentation de Pierre Pellegrin, GF Flammarion, IV, 11, p 252.

entre la force, la masse, la distance et le temps : « […] si donc A est le moteur, B le mû, la quantité de la longueur qui a été parcourue Γ, et ce dans quoi il est mû c'est le temps Δ, alors dans un temps égal la puissance égale à A mouvra la moitié de B sur le double de Γ, et la mouvra sur Γ en la moitié de Δ. Car de cette manière il y aura proportionnalité. Et si la même puissance <meut> la même chose pendant tel temps sur une longueur donnée, et sur la moitié de la longueur dans la moitié du temps, la moitié de la force mouvra la moitié de la chose sur une distance égale dans un temps égal.»[11]

Ce texte peut être transcrit dans un langage plus accessible aujourd'hui de la manière suivante : A déplace le poids (= la masse) B sur la distance Γ dans le temps Δ. On obtient successivement :

- A déplace la masse B/2 sur la distance 2 Γ en un temps Δ.
- A déplace la masse B/2 sur la distance Γ en un temps Δ/2.
- A déplace la masse B sur la distance Γ/2 en un temps Δ/2.
- A/2 déplace la masse B/2 sur la distance Γ en un temps Δ.

Ces résultats d'Aristote sont souvent résumés de nos jours par la relation suivante : *la vitesse est proportionnelle à la force motrice et inversement proportionnelle à la résistance du milieu*, ce qui conduit parfois des commentateurs à rejeter en bloc la physique d'Aristote, en se focalisant sur ce résultat faux, sans analyser plus loin l'ensemble des propos du philosophe grec.

Nous relevons également parmi les travaux d'Aristote un point important de mathématiques ne constituant pas une rupture entre ce dernier et ses prédécesseurs, il s'agit de celui concernant le statut du cercle, toujours privilégié (ni début ni fin, et régularité) : « […] Le transport en cercle est unique et continu, et le transport sur une ligne droite ne l'est pas ; pour celui en ligne droite en effet, son commencement, sa fin et son milieu sont déterminés, et

[11] Aristote, *Physique*, Traduction et présentation de Pierre Pellegrin, GF Flammarion, Paris, 2000, VII, 5, p 378 et 379.

il les a tous en lui-même de sorte qu'il y a un point à partir duquel le mû commencera à se mouvoir et un point où il finira de le faire (car tout est au repos aux extrémités, celle de départ et celle d'arrivée), alors que dans le transport en cercle, le commencement, la fin et le milieu sont indéterminés. »[12]

On retrouve cette conception dans sa cosmologie, qui est caractérisée par un modèle sphérique de l'Univers. D'une manière générale, nous y reviendrons plus loin, dans son discours sur la science, Aristote s'appuie sur l'observation première, l' « expérience sensible », et recherche la connaissance par la méthode inductive et le raisonnement logique. La connaissance immédiate et la logique démonstrative sont les deux fondements de sa réflexion sur la science.

Notre propos sur l'évolution du lien mathématiques-physique dans la science grecque doit accorder une place particulière à Archimède (troisième siècle avant Jésus-Christ) qui fait preuve d'une double démarche originale : il use d'un procédé nouveau pour atteindre ses résultats, mais de plus, à la différence des autres savants grecs, il a laissé des écrits détaillant son mode de pensée et ce qu'il appelle la « méthode mécanique » dont il fait usage. L'imbrication de ses travaux mathématiques et physiques y est dévoilée, et ouvre la porte à des procédures mathématiques qui seront reprises longtemps après. Cette méthode a pu être connue grâce à un manuscrit retrouvé tardivement (en 1906), intitulé « La méthode relative aux théorèmes mécaniques », et adressé à Ératosthène :

> *…j'ai songé à t'exposer par écrit, et à illustrer, dans ce même livre, la nature particulière d'une méthode qui te permettra éventuellement de venir à bout de certaines propositions mathématiques par la mécanique. Or, je suis persuadé que cette méthode n'est pas moins utile pour la démonstration même des propositions ; car certaines d'entre elles, d'abord évidentes pour moi par la mécanique, ont été démontrées après coup par la géométrie, parce que l'investigation par cette méthode est exclusive*

[12] Aristote, *Physique*, traduction et notes de Pierre Pellegrin, GF Flammarion, Paris, 2000, VIII, 9, pp 439 et 440.

d'une démonstration. La recherche de la démonstration, précédée d'une certaine connaissance des questions par cette méthode, est, en effet, plus aisée que cette recherche sans cette connaissance.[13]

L'exemple retenu par l'auteur pour illustrer sa méthode dans ce livre est le calcul de l'aire d'un segment de parabole. Archimède utilise les principes du levier pour équilibrer deux objets géométriques qu'il considère comme réels, un segment de parabole et un triangle. Il suppose ses figures « découpées en tranches », une tranche de triangle étant équilibrée par une tranche de segment de parabole. Une sommation des tranches assimilable à une forme de calcul intégral lui permet d'obtenir son résultat : l'aire d'un segment de parabole est égale aux quatre tiers de l'aire du triangle inscrit dans ce segment.

Mais la méthode mécanique ne constitue pas pour Archimède une justification acceptable, parce que non rigoureuse mathématiquement ; elle s'apparente seulement à une entrée dans le problème et à une recherche de sa solution : « Ce que nous venons de dire ne démontre sans doute pas ce qui précède, mais donne jusqu'à un certain point l'idée que la conclusion est juste. C'est pourquoi reconnaissant nous-même que la conclusion n'est pas démontrée, mais ayant dans l'idée qu'elle est exacte, nous donnerons en son lieu la démonstration géométrique que nous avons trouvée et déjà publiée. »[14]

Il va donc lui substituer une méthode géométrique qui constituera pour lui une démonstration valable. Cette seconde démonstration est publiée dans un autre livre, *la quadrature de la parabole* ; elle utilise le principe d'exhaustion, qui se résume à une double réduction par l'absurde. Le travail d'Archimède décrit ici, s'il est marginal dans notre démarche, puisqu'il y met cette fois la physique au service des mathématiques, est néanmoins caractéristique d'une mise en relation des deux disciplines. De plus Archimède n'en est pas resté là puisque dans un autre de ses ouvrages, *Sur l'équilibre des plans*, il établit les lois de la

[13] Archimède, *Les œuvres complètes*, traduites du grec en français par Paul Ver Eecke, Paris, Blanchard, 1959. Pages 478 et 479.

[14] Archimède, *Les œuvres complètes*, traduites du grec en français par Paul Ver Eecke, Paris, Blanchard, 1959. p 484.

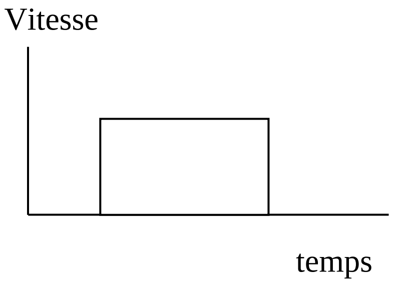
statique (toujours utilisées de nos jours) à l'aide de la géométrie en suivant un procédé hypothético-déductif semblable à celui mis en œuvre dans les éléments d'Euclide. On observe bien dans ce travail les mathématiques en appui de la physique pour conduire de manière rigoureuse aux résultats.

On ne perçoit pas de réelle avancée dans la relation entre les mathématiques et la physique au Moyen Âge. On s'appuie sur la logique pour démontrer, on utilise la géométrie, l'arithmétique et une forme de trigonométrie pour l'étude des trajectoires des planètes, mais la physique dans son ensemble reste essentiellement qualitative, avec cependant une exception notable, l'étude des mouvements, que nous allons illustrer par deux exemples permettant de montrer la richesse des réflexions médiévales sur la science du mouvement, beaucoup plus importantes qu'on ne le lit souvent.

Le premier exemple concerne ce qu'on nomme aujourd'hui la dynamique, il est l'aboutissement de la recherche issue des débats autour de la relation de proportionnalité entre la vitesse et le rapport force motrice/force résistante énoncée par Aristote que nous avons présentée précédemment. Cette relation fausse verra un certain nombre de tentatives pour la corriger jusqu'à Thomas Bradwardine (Oxford, 14^{e} siècle). Il exprime une relation de proportions mathématiques entre le mouvement d'un mobile d'une part et la puissance motrice et la résistance d'autre part. La *loi de Bradwardine* s'exprime ainsi : « si les rapports potentia/mobile sont en progression géométrique, alors les velocitas sont en progression arithmétique. », ce qui peut s'illustrer par le fait que par exemple quand la vitesse triple alors le rapport puissance motrice / résistance est élevé au cube. Nous assistons avec Bradwardine à une modification du type de proportion énoncé par Aristote. Il présente dans le *Traité des proportions et des vitesses dans les mouvements* (1328) une proportion géométrique au lieu d'une proportion arithmétique, qui lève plusieurs des contradictions de l'énoncé d'Aristote, sans toutefois nous fournir une relation acceptable de nos jours.

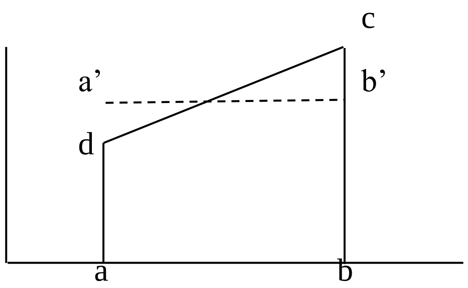
Le second exemple se situe du point de vue du physicien dans la cinématique, mais est en réalité issu d'un champ de réflexion beaucoup plus vaste. Vers 1350, Nicole Oresme, évêque de Lisieux, professeur à la Sorbonne à Paris, publie son *Traité sur la configuration des qualités et du mouvement* ; il représente graphiquement les variations en fonction du temps d'une grandeur (qu'il appelle qualité) par une série de segments dont la longueur (intensité) est proportionnelle à la grandeur : « […] Toute intensité qui peut être acquise de façon successive doit donc être représentée par une ligne droite élevée perpendiculairement en un point de l'espace ou du sujet de la chose intensive, par exemple d'une qualité. »[15]

Les intensités de la qualité étudiée sont notées sur l'axe vertical et les temps sur l'axe horizontal. Il relie alors les extrémités des segments entre elles et obtient une figure dont il va définir l'aire. Afin de mieux appréhender la méthode, on peut se limiter à une des applications proposées, qui est celle d'un mouvement. La qualité étudiée est alors la vitesse. Le rectangle caractérise le mouvement uniforme.



Le trapèze caractérise le mouvement uniformément accéléré qualifié par Oresme d'« uniformément difforme ». À l'aide du théorème de Thalès (Toute parallèle à un côté d'un triangle détermine sur les deux autres côtés des segments proportionnels), on montre que des accroissements égaux de temps correspondent à des accroissements égaux de vitesse. C'est la définition du mouvement uniformément accéléré.

[15] Nicole Oresme, *Tractatus de configurationibus qualitatum et motuum*, traduction P. Souffrin et J.P. Weiss, Paris, Belles Lettres, 1988, I.1 de la continuité de l'intensité.

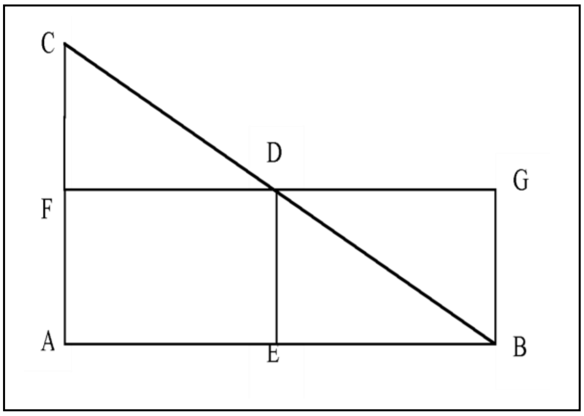


La figure d'Oresme montre que l'aire du trapèze abcd est égale à celle du rectangle abb'a'. L'aire étant remplie par des bâtonnets de vitesse, on peut donc assimiler l'aire à une distance parcourue. D'un point de vue scientifique, on peut y voir du calcul intégral utilisé en physique. Oresme exprime ses résultats de la manière suivante : « […] Ainsi toute qualité uniforme est représentée par un rectangle et toute qualité uniformément difforme se terminant à un degré nul est représentable par un triangle rectangle. De plus, toute qualité uniformément difforme se terminant à ses deux extrémités avec des degrés non nuls doit être représentée par un quadrangle ayant deux angles droits à sa base et les deux autres angles inégaux. »[16]

Mais cette présentation sur un exemple extrait de la physique ne doit pas nous faire oublier qu'Oresme et les savants d'Oxford tel Bradwardine travaillent de façon très abstraite. Par cette technique Oresme prétend mesurer aussi bien la foi religieuse que l'éclat du soleil, la chaleur ou la vitesse d'un objet en mouvement (ce qui correspond au « changement » d'Aristote). C'est à l'aide de cette méthode qu'Oresme va démontrer la fameuse loi « du degré moyen », qui avait déjà été énoncée avant lui mais sans être accompagnée d'une démonstration. La loi se trouve justifiée par la géométrie euclidienne, énoncés des théorèmes des *Éléments* à l'appui.

[16] Nicole Oresme, *Tractatus de configurationibus qualitatum et motuum*, traduction P. Souffrin et J.P. Weiss, Paris, Belles Lettres, 1988, I 11 sur les qualités uniformes et difformes.

Toute qualité uniformément difforme est de même grandeur que la qualité du même sujet, ou d'un sujet égal, qui serait uniforme avec le degré du point médian du sujet donné ; cela, sous-entendu, si le sujet est linéaire. Si c'est une surface, ce serait avec le degré de la ligne médiane, et si c'est un solide, avec le degré de la surface médiane, les choses étant comprises de la même façon.



On le montrera d'abord pour une qualité linéaire. Soit donc une qualité représentée par le triangle ABC, uniformément difforme se terminant avec un degré nul au point B. Soit D le point médian de la droite du sujet. Le degré ou l'intensité de ce point est représenté par la droite DE. La qualité qui serait uniforme sur tout le sujet avec le degré DE peut être représentée par le rectangle AFGB, d'après le chapitre dix de la première partie. Il est alors établi par la Proposition 26 du Livre I d'Euclide que les deux petits triangles DFC et DGB sont égaux. Donc les qualités ainsi représentables par ce triangle et par ce rectangle sont égales. Et c'est ce qui était proposé. (...)[17]

La grande généralité de son étude l'amène à considérer à titre d'illustration le cas particulier d'un mouvement accéléré avec des comparaisons entre distances, vitesses et durées : « On doit parler d'une vitesse tout à fait de la même façon que d'une qualité linéaire, en prenant à la place du point médian l'instant médian du temps qui mesure une vitesse de ce genre. On voit donc à quelle qualité ou à quelle vitesse uniforme est égale une qualité ou une vitesse uniformément difforme. Mais le rapport de qualités ou de vitesses est égal au rapport de qualités ou de vitesses qui leur sont égales, et de telles qualités ou vitesses uniformes nous avons parlé au chapitre précédent. »[18]

Ce théorème ainsi énoncé, qualifié de *Théorème du degré moyen pour les qualités, et pour les mouvements* (dans le sens général de changement) *de sujets indivisibles* dans la

[17] Nicole Oresme, *Tractatus de configurationibus qualitatum et motuum*, traduction P. Souffrin et J.P. Weiss, Paris, Belles Lettres, 1988, III 7 sur la mesure des qualités et des vitesses difformes.

[18] Nicole Oresme, *Tractatus de configurationibus qualitatum et motuum*, traduction P. Souffrin et J.P. Weiss, Paris, Belles Lettres, 1988, III 7 sur la mesure des qualités et des vitesses difformes.

traduction de P. Souffrin et JP Weiss, sera présenté par Galilée dans son intégralité à l'intérieur de son *Discours concernant deux sciences nouvelles*. G Beaujouan commentera cette recherche d'Oresme en en montrant les limites, principalement dues au fait que les résultats sont présentés sous forme de rapports et de proportions ; signalons ici que la présentation des résultats quantitatifs sous cette forme se poursuivra encore avec Galilée, comme nous le verrons plus loin : « L'un des grands mérites de la scolastique est, on l'a vu, d'avoir cherché à quantifier les qualités, mais elle a adopté une attitude fondamentalement différente de celle de la science moderne puisque, pour ce faire, elle a pris en considération plutôt des degrés d'intensité que des grandeurs extensives ramenées au temps et à l'espace. Calculant sur des nombres, et non sur des mesures, elle s'est condamnée à la mathématique des proportions. »[19]

Dans les derniers siècles du Moyen Âge, on assiste également à une évolution des préoccupations. On ne se contente plus des réflexions purement théoriques. Léonard de Pise par exemple résout des problèmes concrets à l'aide des mathématiques, et développe en particulier l'arithmétique commerciale. Les religieux et philosophes du Moyen âge font bientôt place aux ingénieurs et artistes de la Renaissance (Alberti, Brunelleschi, Piero della Francesca, Léonard de Vinci). Ils vont s'exprimer sur le rôle dévolu selon eux aux mathématiques. Dans *De la peinture*, ouvrage publié dans les années 1430, Alberti se défend de traiter son sujet en mathématicien en ce sens que, contrairement aux mathématiciens, il ne reste pas sur un plan purement abstrait mais il prend en compte les objets réels et, nouveauté par rapport à l'art médiéval, il met en avant une volonté d'effectuer un travail intellectuel, et d'utiliser les connaissances mathématiques pour les arts tels que la peinture, la sculpture et l'architecture. Parlant du peintre qu'il appelle de ses vœux, Alberti écrit : « Je souhaite qu'il soit savant, autant que possible, dans tous les arts libéraux, mais je désire surtout qu'il soit versé dans la géométrie. […] Quant à moi, je pense que ni les premiers enseignements, ni aucune règle de peinture, ne peuvent être saisissables aux gens étrangers à la géométrie ; aussi affirmé-je que les peintres ne doivent la négliger sous aucun prétexte. »[20] Il reprend un peu

---

[19] G Beaujouan, in *Histoire Générale des Sciences*, sous la direction de René Taton, Paris, PUF, 1966, p 625 et 626.

[20] Léon-Battista Alberti, De la statue et de la peinture, traduits par Claudius Popelin, Lévy, Paris, 1868, pages 174 et 175.

plus tard cette thèse dans ses *Divertissements mathématiques* (*ludi mathematici*). Il y propose un certain nombre de problèmes pratiques de mesures en décrivant les procédures en jeu. Mais l'auteur n'a peut-être pas écrit cet ouvrage que pour fournir des conseils techniques destinés à effectuer des mesures sur le terrain. Pierre Souffrin, traducteur et commentateur de cette œuvre, souligne la nouveauté qu'il observe dans son ouvrage : « Il semble que l'objet central du traité soit la démonstration de la possibilité de principe de mesurer avec une grande économie de moyens des grandeurs apparemment insaisissables, par le recours systématique à une certaine mathématisation de la connaissance de la nature. »[21]

C'est la période de l'émergence des mathématiques pratiques. Hélène Vérin explique, dans *La gloire des ingénieurs*, que les lettrés du Moyen Âge ont dû se soumettre aux souhaits de leurs dirigeants, sensibles aux avantages matériels qu'ils pouvaient en espérer, de voir intégrer les techniques dans la classification des savoirs. D'abord réticents à ce que les arts mécaniques soient considérés au même titre que les sciences « nobles » (à structure démonstrative), ils les ont finalement intégrés dans les mathématiques pratiques. S'est donc développée à la fin du Moyen Âge une tentative de « régler les arts mécaniques selon les mathématiques. »[22] Léonard de Vinci a participé à cette avancée vers l'utilisation des mathématiques en écrivant : « Aucune investigation humaine ne peut s'intituler véritable science si elle ne passe par la démonstration mathématique. »[23]

Plus qu'un apport de contenus mathématiques nouveaux, si l'on excepte le raisonnement algébrique, la période allant du 14^e au 16^e siècle voit donc une évolution du rapport aux mathématiques, un sorte de désacralisation de celles-ci, leur pénétration dans tous les domaines de la vie, et non seulement dans les sciences, jusqu'à aboutir à la déclaration de

[21] Alberti, *Divertissements mathématiques*, présenté et traduit par Pierre Souffrin, Le Seuil, Paris, 2002, page 14.
[22] Hélène Vérin, *La gloire des ingénieurs*, l'intelligence technique du XVIème au XVIIIème siècle, Albin Michel, Paris, 1993, p 74.
[23] Léonard de Vinci, *Textes choisis*, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, 187 p 96.

Galilée « le monde est écrit en langue mathématique ». Cette dernière affirmation, qui concerne d'après l'auteur italien les figures géométriques, sera reprise et amplifiée au 17^{e} et au 18^{e} siècle, dans l'esprit de l'énonciation de Galilée, et non comme un vestige du pythagorisme. Les mathématiques ne sont plus sur un piédestal, on leur réserve une place essentielle, mais pas au niveau de celui atteint avec les anciens grecs. L'innovation viendra plus tard de la langue qui décrit le monde dont parle Galilée, elle ne se limite plus à la géométrie mais fait appel aux nouvelles mathématiques.

Dans le renouveau du 16^{e} siècle, on veut que la science ne fasse pas que répondre à des questions abstraites et la plupart du temps théoriques, mais qu'elle conduise aussi à des résultats pratiques. On voit un exemple de ce qui vient d'être écrit chez Simon Stevin, savant et ingénieur flamand, qui, dans l'introduction à la *Disme* en 1585, insiste pour présenter avec beaucoup de modestie le système de notation décimale qu'il propose au lecteur : « Ce n'est pas une grande invention mais elle est utile pour tout le monde ».

Le système décimal qu'il a conçu et qu'il décrit en détail permet d'effectuer les principaux calculs pratiqués dans les différents domaines du monde professionnel, en se libérant des contraintes du calcul fractionnaire en usage jusque-là, et son statut d'ingénieur et de mathématicien reconnu l'autorise à ne revendiquer qu'un esprit de discernement qui lui a permis de faire émerger cette petite idée qui devrait avoir un grand intérêt pour tous ; il ne s'agit pas d'une grande invention, elle en mérite d'ailleurs à peine le nom ; on peut la comparer à la découverte par hasard d'un grand trésor, ou encore à celle par un marin d'une île inconnue, suivie de la description des richesses qui y ont été trouvées. Stevin invite donc son lecteur à prendre connaissance de l'invention du système décimal, pour laquelle il ne se glorifie pas. Il décrit ensuite ce que permet ce système décimal, effectuer des comptes de façon simple avec les quatre opérations, en facilitant également le calcul avec les jetons, calcul qui se pratiquait souvent à cette époque :

[…] Elles enseignent (à fin de dire beaucoup en un mot) d'expédier facilement sans nombre rompu[24], tous comptes qui se rencontrent aux affaires des humains : de sorte que les quatre principes d'arithmétique que l'on appelle ajouter, soustraire, multiplier et diviser par nombres entiers, pourront satisfaire à tel effet : causant semblable facilité à ceux qui usent des jetons. Or si par tel moyen sera sauvé, ce qui se perdrait autrement ; Si par tel moyen sera ôté labeur, noise, erreur, dommage, et autres accidents communément adjoints à ceux-ci, je le mets volontiers à votre jugement.[25]

Autre ingénieur, Jean Errard est le premier français à fournir avec des méthodes géométriques de construction de ses fortifications régulières la démonstration mathématique de ses techniques (comme Alberti pour sa peinture). Il utilise pour cela les *Éléments* d'Euclide, qui sont une référence obligée à cette époque, et pour longtemps encore.

La nouvelle physique du 17^{e} siècle, celle de Galilée puis plus tard de Newton, s'appuie sur les mathématiques « traditionnelles » avec la géométrie d'Euclide ou quelques éléments de coniques, mais également sur l'algèbre ou même une approche de calcul différentiel dont nous reparlerons. Mais avant d'entrer dans les détails, l'évocation d'un personnage qui sera fréquemment mis à l'honneur au siècle suivant nous permet préalablement de montrer sa position ambiguë sur le sujet qui nous intéresse. Son apport reconnu à la réflexion sur la science ne doit cependant pas nous faire oublier que Francis Bacon, c'est de lui dont il s'agit, n'est pas un savant, et qu'il ne s'exprime pas en tant que praticien.

Dans ses écrits du début du 17^{e} siècle, Bacon préconise l'utilisation de la méthode expérimentale : il pense remettre les mathématiques à la place qui leur revient dans la philosophie naturelle, auxiliaire et aux ordres. Un exemple de sa position tranchée nous est donné dans un extrait du *Novum Organum* : « Jusqu'ici, la philosophie naturelle ne s'est jamais trouvée pure, mais toujours infestée et corrompue : dans l'école d'Aristote par la

[24] Un nombre rompu est une fraction de l'unité.
[25] Stevin, *La Disme*, 1585, Présentation.

logique ; dans l'école de Platon, par la théologie naturelle ; dans le néo-platonisme de Proclus et des autres, par les mathématiques qui doivent terminer la philosophie naturelle et non l'engendrer et la produire. Mais on doit espérer beaucoup mieux d'une philosophie naturelle, pure et sans mélange. »[26]

Il reprend cette réflexion dans le *De Dignitate et augmentis*, en rappelant le statut de science auxiliaire dont sont affublées les mathématiques, aussi bien pour les sciences théoriques que pour les sciences pratiques. Ne pourrait-on pas plutôt les classer dans la métaphysique, puisqu'elles s'appuient sur la notion de quantité, qui est selon son expression la « dose de la nature » et qui serait à classer parmi les formes essentielles (relevant de l'essence). Revenant au statut privilégié accordé par les Grecs aux figures et aux nombres, il ajoute que ce sont les plus abstraites des formes naturelles ; c'est pour cette raison qu'on s'en est plus occupé, l'homme étant plus attiré par les généralités que par les cas particuliers : « …comme l'esprit humain se plaît beaucoup plus dans les choses générales, qu'il regarde comme des champs vastes et libres, que dans les faits particuliers où il se croit enseveli comme dans une forêt et renfermé comme dans un clos, on n'a rien trouvé de plus agréable et de plus commode que les mathématiques pour satisfaire ce désir de se donner carrière et de méditer sans contrainte. »[27]

Sans refuser de reconnaître l'importance de l'utilisation des mathématiques pour les sciences, il conclut son propos par l'affirmation que la certitude des résultats mathématiques ne doit pas nous empêcher de les considérer comme étant au service des sciences qui les utilisent :

> *Or, quoique dans ce que nous disons ici il n'y ait rien que de vrai, néanmoins à nous, qui n'avons pas simplement en vue l'ordre et la vérité, mais encore l'utilité et l'avantage des hommes, il nous a paru plus convenable, vu la grande influence des mathématiques, soit dans les matières de physique et de métaphysique, soit dans celles de mécanique et de magie, de les désigner comme un appendice de toutes et comme leur troupe auxiliaire. Et c'est à quoi nous sommes en quelque manière*

[26] Francis Bacon, *Novum Organum*, 1623, paragraphe 96.
[27] Francis Bacon, *De Dignitate et augmentis*, Liv. III, chap. VI, trad. Buchon, Paris, Desrez 1836, p. 103.

forcé par l'engouement et l'esprit dominant des mathématiciens, qui voudraient que cette science commandât presque à la physique ; car je ne sais comment il se fait que la logique et les mathématiques, qui ne devraient être que les servantes de la physique, se targuant toutefois de leur certitude, veulent absolument lui faire la loi.[28]

Le dix-huitième siècle, nourri des travaux et des écrits du siècle précédent, accorde une place particulière au philosophe anglais, en témoignent les éloges répétés de Voltaire envers Bacon qu'il nomme *le père de la philosophie expérimentale*. Il cite parmi les réussites des prédécesseurs de Bacon l'invention de la boussole, de l'imprimerie, de la peinture à l'huile, des glaces, des lunettes de vue, de la poudre à canon, etc. Or toutes ces découvertes ont eu lieu à l'époque de la « barbarie scolastique », presque toutes par hasard d'ailleurs : « … on a même prétendu que ce qu'on appelle hasard a eu grande part dans la découverte de l'Amérique ; du moins a-t-on cru que Christophe Colomb n'entreprit son voyage que sur la foi d'un capitaine de vaisseau qu'une tempête avait jeté jusqu'à la hauteur des îles Caraïbes. »[29]

Voltaire peut alors exprimer toute son admiration devant les travaux de Bacon, avec la tendance excessive qui le caractérise souvent :

[…] En un mot, personne avant le chancelier Bacon n'avait connu la philosophie expérimentale ; et de toutes les épreuves physiques qu'on a faites depuis lui, il n'y en a presque pas une qui ne soit indiquée dans son livre. Il en avait fait lui-même plusieurs ; il fit des espèces de machines pneumatiques, par lesquelles il devina l'élasticité de l'air ; il a tourné tout autour de la découverte de sa pesanteur, il y touchait ; cette vérité fut saisie par Torricelli. Peu de temps après, la physique expérimentale commença tout d'un coup à être cultivée à la fois dans presque toutes les parties de l'Europe. C'était un trésor caché dont Bacon s'était douté, et que tous les philosophes, encouragés par sa promesse, s'efforcèrent de déterrer.[30]

---

[28] Francis Bacon, *De Dignitate et augmentis*, Liv. III, chap. VI, trad. Buchon, Paris, Desrez 1836, p. 103.

[29] Voltaire, *lettres philosophiques*, in Œuvres complètes de Voltaire, tome XXIV, Paris, Renouard, 1819, lettre XII, Sur le chancelier Bacon, p 56.

[30] Voltaire, *lettres philosophiques*, in Œuvres complètes de Voltaire, tome XXIV, Paris, Renouard, 1819, lettre XII, Sur le chancelier Bacon, p 57.

On remarque dans cet écrit l'absence de commentaires sur les prises de position de Bacon sur les relations entre mathématiques et physique, alors qu'elles n'auront non seulement pas de postérité mais qu'elles seront contredites par Galilée et les autres savants du 17e siècle.

1.2. Niveaux successifs de types de mathématiques. « Stratification conceptuelle ».

L'évolution de la relation entre mathématique et physique est à la fois la cause et la conséquence de la transformation de la discipline scientifique qu'est la physique : cause chez Galilée qui pose que les mathématiques constituent le langage de la nature (phrase célèbre qui implique que les mathématiques sont nécessaires pour décrire et prévoir les phénomènes naturels), ou chez Descartes qui dit que la matière c'est l'étendue, donc que la physique c'est l'étendue ; conséquence parce que la physique s'éloigne de plus en plus de la recherche des causes (raisons) des phénomènes, des fondements métaphysiques, et se rapproche de la recherche de modèles expliquant les phénomènes, et autorisant l'introduction du prévisionnel. Ce mouvement engendre l'utilisation de mathématiques de plus en plus complexes tout au long du 18ème siècle. Cependant un certain nombre de « niveaux » subsistent ; mais nous ne proposons pas de donner ici une classification hiérarchique, il ne s'agit pas de partir de mathématiques « de base » que représenterait par exemple l'arithmétique, pour rejoindre un niveau « noble » ou du moins de meilleure qualité scientifique qui serait le calcul différentiel, on observe plutôt une juxtaposition de domaines mathématiques qui se trouvent ainsi former des strates, certaines d'entre elles justifiées par les auteurs, pour des raisons de simplicité par exemple, ou encore par rejet des nouveaux concepts liés aux mathématiques infinitésimales.

1.2.1 Mathématiques qualitatives

Un premier plan concerne un niveau essentiellement qualitatif (méthodologique) ; il fait appel à la logique démonstrative à l'image de celle d'Aristote et des scolastiques. Privat de Molières en 1740 présente ses *Leçons de physique* comme formées d'une suite de propositions, dans un esprit tout cartésien, à l'image de la « longue chaîne de raisons » décrite dans le *Discours de la méthode* de 1637 :

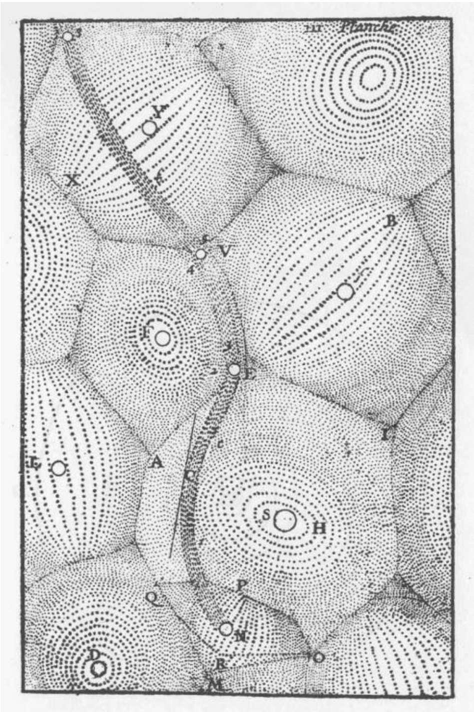
> *Cependant comme la construction de l'univers, qui est un ouvrage tout formé, ne peut être soumise à notre choix, et qu'elle ne peut par conséquent que dépendre d'un ordre déterminé de principes, si bien liés qu'il devrait suffire d'en connaître un, pour découvrir tous les autres ; j'ai pensé que le meilleur moyen de réunir les esprits sur un point si important, était de former une suite de propositions, anciennes ou nouvelles il n'importe : mais si exactement déduites les unes des autres, qu'elles composassent comme une chaîne de laquelle il fût dorénavant comme impossible de se détacher.*[31]

Privat veut construire un cours de physique selon le modèle des *Éléments* d'Euclide en mathématiques, qui lui semblent proposer la meilleure méthode d'étude d'une science, en partant d'une cause unique, et en déroulant les conséquences déduites les unes des autres avec la même technique que pour les mathématiques : « En un mot, je me propose de donner dans ces leçons les éléments de la physique, comme Euclide a donné ceux de la géométrie ; de les démontrer de la même façon, en déduisant mes propositions les unes des autres, selon les règles de la méthode dont les géomètres se servent ; […] sans quoi il est évident qu'on ne peut jamais faire un solide progrès dans cette science, dont le but principal est de ramener autant

[31] Joseph Privat de Molières, Premier tome *des Leçons de Phisique, contenant le Elémens de la Phisique, determinés par les seules loix des Méchaniques expliquées au Collège Royal de France,* Brocas, Paris, seconde édition 1740, Remarques générales pages X et XI.

qu'il est possible tous les effets à une même cause, et de les ranger, pour ainsi dire, dans l'ordre de leur génération. »[32]

Une remarque voulant anticiper d'éventuelles critiques souligne le caractère pédagogique de son ouvrage, et le fait qu'une attention toute particulière a été attachée à la description du passage d'une propriété à une autre qui lui succède : « Que si l'on trouve étrange que dans ces leçons je m'attache avec trop de soin à détailler des points qu'aucun savant n'ignore aujourd'hui, je prie le lecteur de considérer que ces leçons n'ont été composées que pour instruire des commençants, et que d'ailleurs il ne suffit pas pour former des éléments, que des propositions soient connues, mais qu'il faut outre cela montrer évidemment la liaison qu'elles ont entre elles.»[33]



L'abbé de Molières, disciple de Malebranche, tout en le poussant beaucoup plus loin, ne fait que prolonger l'esprit dans lequel Descartes a présenté le monde qu'il concevait, ainsi qu'on peut le lire dans ses *Principes de Physique* lors de la description des Tourbillons, éléments clés du système solaire qu'il imagine, issu de la Création qu'il évoque dans le texte fondateur de sa théorie. Il nous propose de supposer que Dieu a créé la matière en parties égales de taille moyenne. Celles-ci se sont mises en mouvement chacune autour d'un centre, pour former le ciel liquide ;

> *… et avec cela, plusieurs ensemble autour de quelques centres… disposés en même façon dans l'univers, que nous voyons que sont à présent les centres des étoiles fixes, mais le nombre a été*

[32] Joseph Privat de Molières, Premier tome *des Leçons de Phisique, contenant le Elémens de la Phisique, déterminés par les seules loix des Méchaniques expliquées au Collège Royal de France,* Brocas, Paris, seconde édition 1740, Remarques générales pages XI et XII

[33] Joseph Privat de Molières, Premier tome *des Leçons de Phisique, contenant le Elémens de la Phisique, déterminés par les seules loix des Méchaniques expliquées au Collège Royal de France,* Brocas, Paris, seconde édition 1740, Remarques générales page XXIII.

plus grand, en sorte qu'il a égalé le leur joint à celui des planètes et des comètes ; et que la vitesse dont il les a ainsi mues était médiocres, c'est à dire, qu'il a mis en elles toutes autant de mouvement qu'il y en a encore à présent dans le monde. Ainsi, par exemple, on peut penser que Dieu a divisé toute la matière qui est dans l'espace AEI, en très grand nombre de petites parties, qu'il a mues, non seulement chacune autour de son centre, mais aussi toutes ensemble autour du centre S ; et tout de même, qu'il a mu toutes les parties de la matière qui est en l'espace AEV autour du centre F, et ainsi des autres ; en sorte qu'elles ont composé autant de différents tourbillons (je me servirai dorénavant de ce mot pour signifier toute la matière qui tourne ainsi en rond autour de chacun de ces centres) qu'il y a maintenant d'astres dans le monde.[34]

Dans la physique de Descartes on ne trouve pratiquement aucun contenu quantitatif, excepté essentiellement dans deux cas, pour sa théorie des chocs dans laquelle il propose une relation de conservation d'un terme qui correspond à notre quantité de mouvement (la relation fournie contient des erreurs, ce qui lui vaudra les critiques les plus fortes), et pour étudier l'optique (dans la *Dioptrique* pour énoncer les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière, et dans les *Météores*, pour expliquer le phénomène de l'arc-en-ciel, sujet que nous aborderons plus loin). Descartes propose de ramener les propriétés physiques de la matière à la géométrie qui elle-même se réduit à l'algèbre, mais il ne le met pas en pratique dans les *Principes*. Il se limite la plupart du temps à une géométrie qualitative, ce que nous pouvons observer dans l'explication qu'il donne de la trajectoire elliptique des planètes, en s'appuyant sur des analogies :

D'autant que, comme dans les détours des rivières où l'eau se replie en elle-même, et tournoyant ainsi fait des cercles, si quelques fétus, ou autres corps fort légers, flottent parmi cette eau, on peut voir qu'elle les emporte et les fait mouvoir en rond avec soi ; et même, parmi ces fétus, on peut remarquer qu'il y en a souvent quelques uns qui tournent aussi autour de leur propre centre ; et que ceux qui sont plus proches du centre du tourbillon qui les contient, achèvent leur tour plus tôt que ceux qui en sont plus éloignés ; et enfin que, bien que ces tourbillons d'eau affectent toujours de tourner en rond, ils ne décrivent presque jamais des cercles entièrement parfaits, et s'étendent quelquefois plus en long, et quelquefois plus en large, de façon que toutes les parties de la circonférence qu'ils

[34] Descartes René, *Les Principes de la Philosophie* (1ère édition 1644, traduction en français par l'abbé Picot en 1647), Œuvres IX-2, publié par Adam et Tannery, Vrin, 1989, troisième partie, art. 46, p. 125.

décrivent, ne sont pas également distantes du centre. Ainsi on peut aisément imaginer que toutes les mêmes choses arrivent aux planètes ; et il ne faut que cela seul pour expliquer tous leurs phénomènes.[35]

Au 18e siècle, les idées ont naturellement évolué pour beaucoup de savants, même chez un certain nombre de cartésiens comme l'abbé de Molières. Il fournit dans ses *Leçons* des explications aux phénomènes naturels basées sur la géométrie, mais intentionnellement ne souhaite pas alourdir son propos avec des calculs complexes, et se limite donc la plupart du temps à une explication géométrique très élémentaire, car, écrit-il, pour découvrir la physique, il suffit d'approfondir les notions les plus simples, en évitant les calculs, « mon dessein n'étant pas ici de chercher dans la physique des occasions d'employer le calcul, mais de ne me servir du calcul qu'autant qu'il est nécessaire pour parvenir au but que je me propose. »[36]

De plus, comme Euclide qui n'a pas eu besoin du calcul différentiel et intégral, il espère pouvoir démontrer les *Éléments* de sa physique en utilisant les mêmes moyens que le savant grec :

Ce n'est pas que ces Éléments ne soient susceptibles du calcul le plus sublime, lorsqu'on voudra les pousser plus loin, pour entrer dans le détail, pour expliquer les suites des effets généraux ; et que pour cet effet on transformera les cercles que je considère en d'autres lignes courbes, et les sphères en des sphéroïdes de toutes les façons ; et qu'on ne puisse tirer de là de grandes lumières. Mais je laisserai à ceux qui en sont curieux le soin d'étendre ces Éléments selon toutes les méthodes nouvelles, parce que je n'entreprends pas ici de tout expliquer, mais seulement d'ôter les principaux obstacles qui empêchent de voir que la nature n'est précisément qu'un mécanisme perpétuel.[37]

[35] Descartes René, *Les Principes de la Philosophie* (1ère édition 1644, traduction en français par l'abbé Picot en 1647), Œuvres IX-2, publié par Adam et Tannery, Vrin, 1989, troisième partie, art. 30, pp. 115 et 116.

[36] Joseph Privat de Molières, Premier tome des *Leçons de Phisique, contenant le Elémens de la Phisique, déterminés par les seules loix des Méchaniques expliquées au Collège Royal de France,* Brocas, Paris, seconde édition 1740, remarques générales pages XXI.

[37] Joseph Privat de Molières, Premier tome des *Leçons de Phisique, contenant le Elémens de la Phisique, déterminés par les seules loix des Méchaniques expliquées au Collège Royal de France*, Brocas, Paris, seconde édition 1740, remarques générales pages XXII et XXIII.

Ce point de vue sera celui de plusieurs savants et auteurs, dont certains étofferont le raisonnement à l'aide d'une géométrie plus élaborée, que nous qualifierons de quantitative, puisqu'elle fait intervenir des calculs plus ou moins importants.

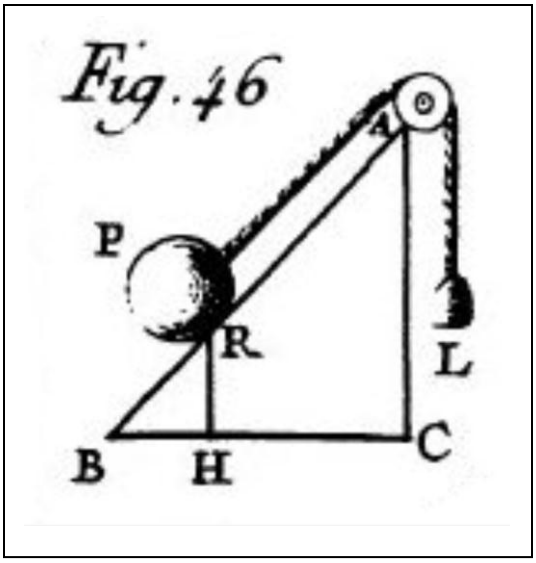
1.2.2. Géométrie quantitative

On observe dans un certain nombre de manuels de mathématiques du 18e siècle la présentation d'une géométrie destinée à une utilisation pratique. Clairaut, dans la préface de ses *Éléments de géométrie* (1ère édition 1741, 2ème édition 1765), évoque les différentes méthodes proposées dans les ouvrages de son époque pour présenter la géométrie. Il revient sur les auteurs qui ont voulu montrer l'intérêt de la géométrie dans la vie courante ou la technique, en faisant suivre les théorèmes des applications qui en découlent, pour rejeter leur méthode car si « par là il prouvent l'utilité de la géométrie », ils n'aident pas les lecteurs dans leur apprentissage, « car chaque proposition venant toujours avant son usage, l'esprit ne revient à des idées sensibles, qu'après avoir essuyé la fatigue de saisir les idées abstraites ». Clairaut militera pour une approche préalablement concrète des mathématiques, ses *Éléments de géométrie* en seront un exemple, ils débutent par l'étude des surfaces (la mesure des terrains), ce qui ne se faisait pas à son époque, parce que pour lui le monde se présente ainsi, et ce n'est qu'ensuite qu'on fera un passage vers l'étude plus théorique de la géométrie plane.

Des auteurs comme Privat de Molières, Trabaud, Pemberton, Madame du Châtelet feront une utilisation importante d'une géométrie quantitative dans leurs ouvrages, nous pouvons par exemple le montrer à travers un chapitre des *Éléments de physique* de la dernière nommée, le chapitre XVII, consacré au repos et à la chute des corps sur un plan incliné.

La première partie du chapitre étudie la statique, c'est-à-dire les conditions d'équilibre d'un objet sur un plan incliné. Le rôle d'un plan incliné n'est pas d'empêcher un corps de descendre, il est de retarder sa chute ; il faut donc employer une force supplémentaire pour retenir un objet sur un plan incliné. La démonstration de la première propriété fournit une relation quantitative du plan incliné. Elle s'obtient par l'utilisation de la propriété 4 du livre 6 des *Éléments* d'Euclide qui dit que dans des triangles équiangles (semblables) les côtés autour des angles égaux sont proportionnels. Cette démonstration conduit ainsi Madame du Châtelet à des résultats de proportionnalité directe ou inverse entre les grandeurs (des grandeurs inversement proportionnelles sont dites ici en raison réciproque) :

> *Donc la hauteur dont le poids P est monté, est à celle dont le corps L est descendu, comme la hauteur du plan est à sa longueur, et les hauteurs auxquelles ces deux poids monteront et descendront seront en raison réciproque de leur poids.* [38] *(fig 46)*

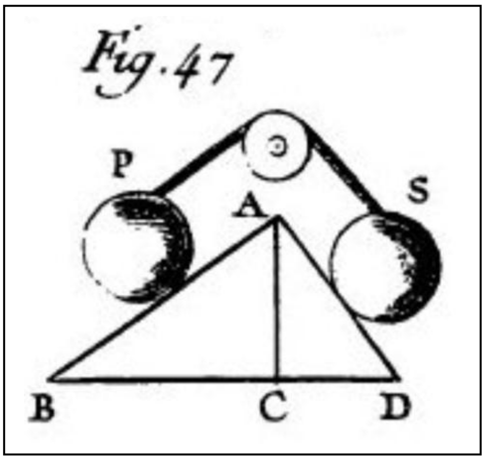


On a donc obtenu une proportion inverse entre les poids et les hauteurs.

Madame du Châtelet prolonge très pédagogiquement cette démonstration par la justification d'un phénomène naturellement observé, la difficulté de gravir une montagne avec un véhicule :

> *Il est aisé de voir par tout ce qui vient d'être dit pourquoi un carrosse monte plus difficilement une montagne qu'il ne roule sur un terrain horizontal ; car il faut que les chevaux soutiennent pendant qu'ils montent une partie du poids du carrosse, laquelle est à son poids total, comme la hauteur perpendiculaire du plan, c'est-à-dire, de la montagne, est à sa longueur ; et c'est par la même raison que l'on roule plus aisément sur un terrain uni, que sur le terrain raboteux ; car les inégalité du terrain sont autant de petits plans inclinés. »*[39]

[38] Madame du Châtelet, *Institutions de physique*, Paris, Prault fils, 1741, pp 341 et 342.
[39] *ibid* p 342.



Les propriétés importantes du plan incliné simple sont ensuite démontrées, et suivies de l'étude d'un double plan incliné. Les deux corps P et S de la figure 47, en équilibre sur deux plans de même hauteur AC et d'inclinaisons différentes, sont « entre eux comme la longueur des plans, sur lesquels ils s'appuient ; car ils sont alors l'un pour l'autre ce que seraient des poids qui les tiendraient en repos sur ces plans, et dont la direction serait parallèle à ces plans. »[40] On obtient alors la proportion suivante : $\frac{P}{S} = \frac{AB}{AD}$.

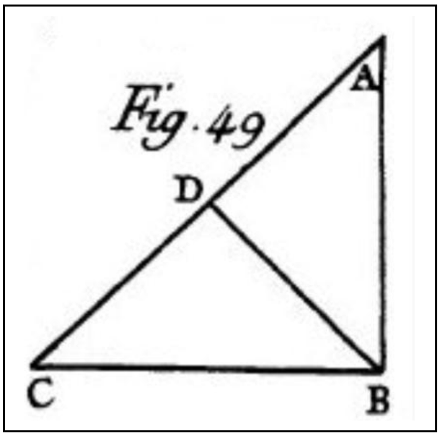
Dans la deuxième partie du chapitre XVII, l'auteur s'attache à expliquer la descente le long d'un plan incliné, ce qui est nouveau dans un manuel de physique, puisqu'on traite dans un même chapitre de repos et de mouvement, de statique et de dynamique. En utilisant ce qui a été montré dans les paragraphes précédents et dans le chapitre XIII consacré à l'étude de la pesanteur, il est progressivement obtenu que « la descente des graves[41] dans un plan incliné suit donc les mêmes lois que leur chute perpendiculaire, ainsi les espaces qu'ils parcourent dans le plan incliné sont comme les carrés de leurs temps, ou de leurs vitesses. »[42] L'étude peut donc se poursuivre autour de problèmes purement géométriques, cette dernière relation permettant de rattacher la géométrie utilisée à la cinématique du plan incliné.

L'auteur ajoute que, bien que les corps suivent les mêmes proportions dans leur chute sur un plan incliné et leur chute verticale, les vitesses acquises ne sont pas égales pour un plan

[40] *ibid* p 342.
[41] Un grave est un corps soumis à la gravité.
[42] *ibid* p 344.

incliné et pour la chute libre pendant des temps égaux. (Même remarque pour les espaces parcourus)

On ne peut pas se contenter du fait que les vitesses sont inégales, et que les espaces parcourus sont inégaux. On établit donc la loi de proportion du plan incliné simple : « Les espaces que le corps parcourt en tombant dans un plan incliné sont à ceux qu'il parcourrait en tombant perpendiculairement dans un temps déterminé, comme la vitesse du corps dans le plan incliné, est à la vitesse perpendiculaire au bout de ce temps, c'est-à-dire, comme la hauteur du plan est à sa longueur. »[43] On peut résumer ce résultat par la formule suivante dans la figure 49 ci-contre : $\frac{AD}{AB} = \frac{v_D}{v_B} = \frac{AB}{AC}$.



Cette figure 49 proposée par l'auteur nous semble caractéristique de ce qu'on peut appeler une figure-clé, simple et explicative, et sera de nouveau utilisée plus loin. Elle est constituée d'un triangle ABC rectangle en B et de la hauteur BD issue de B. Remarquons que le triangle rectangle est presque isocèle sur la gravure, alors qu'en réalité AB n'a aucune raison d'être égal à BC, donc D n'est pas le milieu de AC.

Pour démontrer le résultat intermédiaire, Madame du Châtelet met la propriété 8 du livre 6 des *Éléments* d'Euclide à contribution. Elle s'énonce ainsi : si dans un triangle rectangle, on mène une perpendiculaire de l'angle droit sur l'hypoténuse, les deux petits triangles ainsi obtenus sont semblables au triangle entier, et semblables entre eux. Les résultats précédents et la proposition 8 nous donnent le résultat intermédiaire :

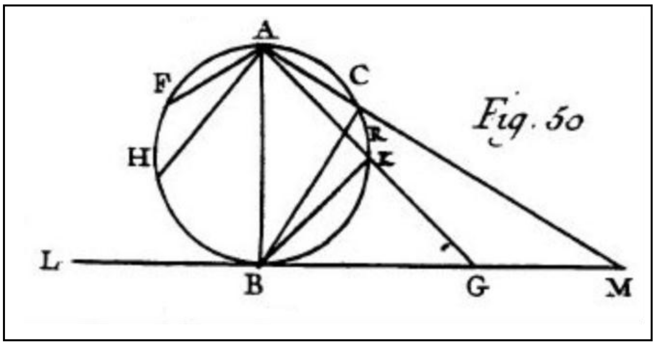
> *Le corps parcourra donc dans le plan incliné l'espace AD dans le même temps dans lequel il tomberait perpendiculairement de A en B puisque la ligne AD est à la ligne AB comme la hauteur du plan est à sa longueur, et il n'y a dans le plan AC que cet espace AD qui puisse être parcouru en*

[43] *ibid* p 345.

même temps que l'espace AB car il n'y a dans le plan incliné ABC que cet espace AD qui puisse être à l'espace AB comme AB est à AC (Euclide Liv 6 prop 8)[44] (fig 49)

Ce dernier résultat peut s'écrire : $t_{AB} = t_{AD}$.

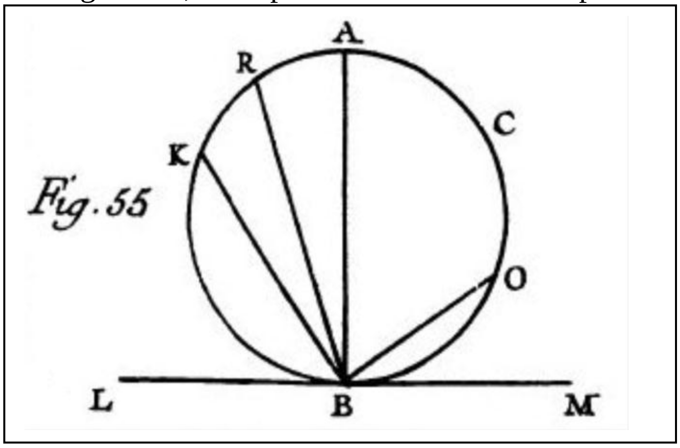
Afin d'arriver au résultat final, on applique cette dernière égalité à des corps tombant de points d'un cercle (figure 50). Un mobile mettra le même temps pour aller de A en B, de A en R, de A en K, de A en F, de A en H, de R en B, de K en B. La démonstration utilise la propriété 31 du livre 3 d'Euclide (dans un cercle l'angle placé dans (ou *qui intercepte*) un demi-cercle est droit) :



Ainsi, les lignes BK, BR, sont perpendiculaires aux plans inclinés AM, AG, & par conséquent les corps qui tomberaient du point A, arriveraient en même temps en R, en K et en B.

On prouvera de la même façon que le corps doit parcourir les cordes KB, RB, dans le même temps dans lequel il parcourrait le diamètre AB car on peut mener par le point A les cordes AF, AH égales et parallèles aux cordes RB, KB or ces cordes AF, AH seront parcourues dans le même temps que le diamètre AB. Donc les cordes RB, KB, qui leur sont égales et parallèles, seront aussi parcourues dans le même temps que ce diamètre AB. [45] *(fig 50)*

Appliquant ce dernier résultat à la figure 55, elle peut écrire : « les corps étant abandonnés à eux-mêmes, arriveront en même temps au point B soit qu'ils partent du point R ou du point K ou du point O ou du point A ou enfin d'un point quelconque de la circonférence ABC car chacune de ces cordes peut être considérée comme des parties de plusieurs plans inclinés, dont le

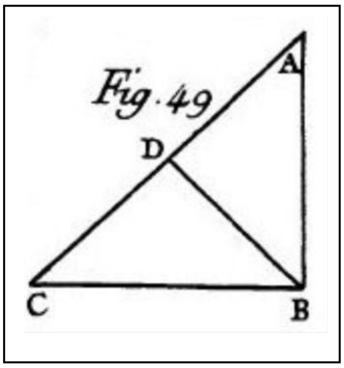


[44] *ibid* pp 345 et 346.
[45] *ibid* pp 346 et 347.

diamètre AB est la hauteur »[46]. (fig 55)

L'auteur fait appel au bon sens du lecteur pour justifier l'égalité des temps de parcours : les cordes sont d'autant plus inclinées qu'elles sont plus courtes, ainsi les variations de longueurs et de vitesses se compensent pour donner un temps égal de chute.

Madame du Châtelet utilise ensuite la même figure 49 que lors de la détermination des temps de chute, mais pour nous conduire maintenant à une loi des vitesses : la vitesse en B est égale à la vitesse en C après une descente depuis le point A : « Les vitesses acquises en B et en C sont donc égales, puisqu'elles sont l'une et l'autre à la vitesse acquise en D comme AC à AB. »[47] (fig 49)

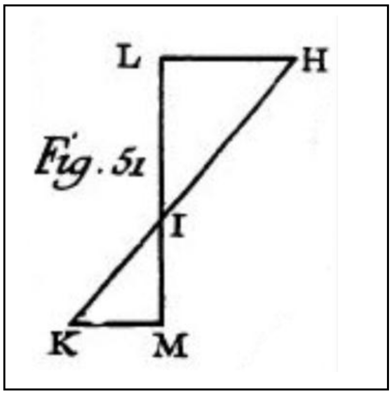


Cette démonstration est suivie d'un commentaire sur sa méthode ; elle nous dit que la preuve géométrique apportée ne fait que confirmer ce qui semblait presque aller de soi :

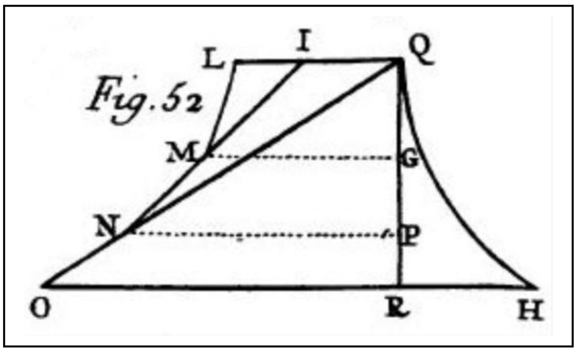
> *Cette proposition n'est pas du nombre de celles dans lesquelles la géométrie persuade l'esprit presque malgré lui ; car il est aisé de sentir que la force par laquelle le corps tend à descendre vers la terre, étant la seule qui le fasse descendre dans le plan incliné, quand cette force a eu tout son effet, elle doit avoir communiqué au corps la même vitesse, quel que soit le chemin par lequel il soit tombé : ainsi, le corps a acquis la même vitesse, lorsqu'il a atteint l'horizon, soit qu'il y soit parvenu par une ligne perpendiculaire, ou par un plan incliné, ou par plusieurs plans inclinés contigus, pourvu qu'il soit tombé de la même hauteur perpendiculaire. »*[48]

[46] *ibid* p 348.
[47] *ibid* p 349.
[48] *ibid* p 349.

Une petite mise au point pédagogique est faite à ce moment pour poser les résultats et permettre au lecteur de synthétiser ce qui a été obtenu :



Il suit de là, qu'un corps qui est tombé perpendiculairement de L en I a acquis la même vitesse que s'il était tombé de H en I ; ainsi, s'il continuait de tomber de I en K par le plan incliné IK son mouvement serait le même que s'il était tombé de H en K. Mais comme son mouvement est plus lent par le plan incliné IK que par le plan perpendiculaire IM un corps qui tomberait de L en I puis de I en K arriverait plus tard à l'horizon en K que s'il y était arrivé par le plan perpendiculaire LM quoique par l'un et par l'autre il ait acquis la même vitesse ; car il a employé cette vitesse à parcourir un espace plus long dans le premier cas que dans le second. [49] *(fig 51)*



Pour généraliser ensuite les résultats, on passe à la figure 52 permettant de comparer diverses chutes inclinées. La vitesse acquise est la même lors d'une chute libre de L en M, de I en M, de Q en G. On obtient le résultat suivant : « Ainsi, un corps qui tombe par plusieurs plans inclinés contigus comme LM, MN, NO, aura acquis, lorsqu'il sera parvenu à l'horizon la même vitesse, que s'il était tombé de la hauteur perpendiculaire de ces plans représentée par la ligne QR en supposant que dans les changements de direction en M et en N il n'y ait eu aucun frottement qui ait diminué la vitesse du corps. »[50] (fig 52)

[49] *ibid* pp 350 et 351..
[50] *ibid* pp 351 et 352.

La géométrie quantitative s’appuie sur des calculs. Dans un premier temps, seules les proportions sont à l’œuvre, avec des calculs arithmétiques simples. Petit à petit, l’algèbre va faire son apparition et être développée dans la physique du mouvement.

1.2.3 Arithmétique et algèbre

Un domaine arithmétique omniprésent dans la physique est celui des calculs avec des proportions. Nous avons évoqué plus haut l'utilisation des proportions par Aristote puis par les philosophes du Moyen âge, dans l'étude des déplacements. Nous retrouvons au 18^{e} siècle une présentation voisine de celle des Grecs, avec ce qu'on pourrait qualifier maintenant de lourdeur dans la formulation, mais qui s'explique aisément, comme nous l'avions écrit, par le statut des grandeurs utilisées. Seules deux grandeurs de même nature se divisaient dans les calculs. C'est ce que pratique Galilée dans les *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*. Il recherche les lois du mouvement rectiligne uniforme. Six théorèmes sont nécessaires pour fournir les relations entre les grandeurs utilisées. Rappelons que Galilée écrit A et B sont entre eux comme C et D pour signifier qu'il y a proportion $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$, et que E et F sont en raison inverse (ou renversée) de G et H pour signifier que $\frac{E}{F} = \frac{H}{G}$.

Les trois premiers théorèmes consacrés au mouvement rectiligne uniforme d'un mobile sont les suivants : pour une même vitesse, les temps de parcours sont entre eux comme les distances parcourues (théorème I) ; pour un même temps, les distances sont entre elles comme les vitesses (théorème II) ; pour un même espace franchi, les temps sont en raison inverse des vitesses (théorème III). Les théorèmes IV, V, VI concernent deux mobiles étudiés comparativement avec des conditions variables. Par exemple l'énoncé du théorème V est « Si deux mobiles sont mus d'un mouvement uniforme, mais avec des vitesses inégales et sur des espaces inégaux, alors le rapport des temps sera composé du rapport des espaces et du rapport inverse des vitesses. »[51]

On peut donc écrire pour deux mobiles qui parcourent respectivement les distances e et E avec des mouvements rectilignes uniformes de vitesses v et V, que leurs durées de parcours t et T seront telles que $\frac{t}{T} = \frac{e}{E} \times \frac{V}{v}$.

Nous verrons dans notre deuxième partie que la formulation dite moderne de la relation cinématique du mouvement uniforme $v = \frac{e}{t}$ (ou $t = \frac{e}{v}$ ou $e = v\ t$) apparaît au début du 18^{e} siècle, mais les auteurs prennent beaucoup de précautions avant de citer cette fameuse formule, et cela pendant toute la première moitié de ce 18^{e} siècle, comme on le voit dans les *Principes sur le mouvement et l'équilibre* de Trabaud paru en 1743. Il écrit que les vitesses des mobiles sont entre elles comme les rapports des espaces aux temps, en spécifiant que le rapport de l'espace au temps est le quotient qui provient de la division de l'espace par le temps ; cette dernière précision nous montre qu'il est nécessaire de donner tous ces détails à des lecteurs encore peu au fait de ces pratiques à cette époque. L'auteur ajoute même un commentaire pour justifier cette formulation : « Quoique la longueur du temps et la longueur de l'espace soient incomparables l'une à l'autre, si on les considère en elles-mêmes, puisque les parties du temps sont d'une nature différente de celle de l'espace, cela n'empêche point que le temps et l'espace étant conçus sous l'idée générale de quantité ne puissent être comparés l'un à l'autre, et que l'esprit ne découvre entre eux de vrais rapports. »[52]

La présentation de cette nouvelle écriture a été faite, mais elle n'empêche pas Trabaud de reprendre les propositions de la cinématique dans des énoncés identiques à ceux de Galilée (exemple : « Si les espaces parcourus sont égaux, les vitesses sont entre elles réciproquement comme les temps. »[53]). Il propose ensuite ce qui apparaît comme un raccourci de calcul :

---

[51] Galilée, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, traduction de Maurice Clavelin, PUF, 1995, Du mouvement local, p. 129.

[52] Trabaud, *Principes sur le mouvement et l'équilibre*, Desaint et Saillant, Paris, 1743, p 4.

[53] *Ibid*. p 5.

soient un corps A qui parcourt selon un mouvement uniforme un espace *E* avec une vitesse *V* pendant un temps *T*, et un corps B qui parcourt selon un autre mouvement uniforme un espace *e* avec une vitesse *v* pendant un temps *t*, on obtient, en utilisant la présentation de l'époque : $V . v :: \frac{E}{T} . \frac{e}{t}$ (qu'on peut lire V est à v comme $\frac{E}{T}$ est à $\frac{e}{t}$) donc $\frac{V e}{t} = \frac{vE}{T}$, d'où $V\,T\,e = v\,t\,E$. C'est ce dernier résultat qu'il appelle *formule ou expression générale* et qui représente le mouvement uniforme.

Il est ensuite conduit à écrire un ensemble de phrases du type « Les espaces sont entre eux en raison composée des vitesses et des temps. »[54] ou encore « Les temps sont en raison composée de la raison directe des espaces, et de la raison inverse des vitesses. »[55] , avant d'en arriver à la formule bien connue de nos jours $V = \frac{E}{T}$. Cette égalité nous permet, connaissant deux choses, de calculer la troisième ; on se trouve ainsi devant les trois types possibles de problèmes : « 1°. Si l'espace E et le temps T sont connus, on aura la vitesse V en divisant l'espace E par le temps T. 2°. Si la vitesse V est connue et le temps T, on aura l'espace E en multipliant la vitesse V par le temps T. 3°. Si la vitesse V est connue avec l'espace E, on aura le temps T, en divisant l'espace E par la vitesse V. »[56]

D'Alembert lui-même conserve des commentaires sur ce sujet jusque dans la deuxième édition de son *Traité de dynamique* publiée en 1758. L'espace et le temps étant de nature différente, on ne peut les diviser l'un par l'autre. Quand on dit que les vitesses sont comme les espaces divisés par les temps, …

> *… c'est une expression abrégée qui signifie que les vitesses sont comme les rapports des espaces à une même commune mesure, divisés par les rapports des temps à une même commune mesure ; c'est-à-dire que si on prend, par exemple, le pied pour la mesure des espaces, et la minute*

[54] *Ibid* p 6.
[55] *Ibid* p 6.
[56] *Ibid* p 6.

pour la mesure des temps, les vitesses de deux corps qui se meuvent uniformément sont entre elles comme les nombres de pieds parcourus divisés par les nombres de minutes employées à les parcourir, et non pas comme les pieds divisés par les minutes.[57]

Encore plus tard, en 1777, Cousin estime utile de commenter cette division de deux grandeurs de nature différente. Selon lui, quand on effectue une division, le diviseur ou le quotient doit être un *nombre abstrait* (donc sans unité). Mais si, quand on dit que la vitesse est proportionnelle à l'espace divisé par le temps, on signifie que « la vitesse est proportionnelle au quotient de la division de deux nombres abstraits, dont l'un est le rapport de l'espace à l'unité d'espace, et l'autre le rapport du temps à l'unité de temps, il n'y aura plus de difficulté. Enfin, on n'en trouvera aucune à voir dans une même équation des grandeurs de nature différente ; puisqu'effectivement ce ne sont pas ces grandeurs que l'on compare, mais le rapport de chacune à son unité de conversion. »[58] Sans être encore tout à fait à l'aise avec ce type d'opérations, et sans parler de grandeurs dérivées, on constate que les physiciens ont moins de réticence à effectuer des divisions sur des grandeurs de nature différente.

Toujours dans le domaine de l'arithmétique, on observe l'apparition des suites numériques dans les démonstrations de physique. Lors de l'étude de la cinématique, certains auteurs proposent l'utilisation des suites arithmétiques (on les nomme aussi progressions arithmétiques), comme l'abbé de Lacaille dans ses *Leçons élémentaires de mathématiques*. Il rappelle les résultats de Galilée pour un corps en chute libre : les espaces parcourus croissent suivant la progression des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, … c'est-à-dire que par exemple si un corps en chute libre parcourt 15 pieds la première seconde, il parcourt 45 pieds la deuxième seconde, 75 pieds la troisième seconde, et ainsi de suite. On demande comment trouver l'espace total parcouru en six secondes. On peut bien sûr poursuivre le calcul précédent et ajouter les valeurs obtenues, mais la présentation avec les suites est plus élégante. L'auteur

[57] d'Alembert, *Traité de dynamique*, Paris, David, nouvelle édition, 1758, note p 16.
[58] Cousin, *Leçons de calcul différentiel et de calcul intégral,* Paris, Jombert, 1777. Discours préliminaire, pages VI et VII.

utilise la formule donnant la somme *s* des termes d'une suite arithmétique de premier terme *a* = 15 et de raison *d* = 30.

> *Ce problème se réduit à trouver la somme d'une progression arithmétique dont le premier terme a = 15 pieds, dont la différence d = 30, et dont le nombre des termes n = 6.*
>
> *Je prends donc pour le résoudre la seconde formule des valeurs de s, et j'ai :*
>
> $$s = an + \frac{(dn - d)n}{2} = 90 + \frac{(180 - 30)6}{2} = 540$$
>
> *Ainsi le corps dont il s'agit aura parcouru 540 pieds après 6" de chute.*[59]

Un exercice s'appliquant à la même situation que celui qui vient d'être traité peut aussi être résolu par l'algèbre, autre chapitre des mathématiques qui va être de plus en plus employé dans la résolution des problèmes de physique. On le trouve dans la *Mécanique* d'Ozanam parue en 1720. Un corps en chute libre a mis cinq secondes pour descendre de 125 toises. Il s'agit de trouver de combien de toises il descend lors de chacune des secondes de la descente. On note *x* pour le nombre de toises à la première seconde ; comme les espaces croissent selon la progression des nombres impairs en temps égaux, l'espace parcouru la deuxième seconde sera *3x*, la troisième seconde *5x*, la quatrième seconde *7x*, et la cinquième seconde *9x*. Le total donne *25x* égaux à 125. On a donc à résoudre l'équation *25x* = 125, on obtient *x* = 5, « ce qui fait connaître qu'à la première seconde le mobile sera descendu de 5 toises, et que par conséquent il aura parcouru en descendant 15 toises pendant la deuxième seconde, à cause de 3*x*, et 25 toises pendant la troisième seconde, à cause de 5*x*, et 35 toises pendant la quatrième seconde, à cause de 7*x*, et enfin de 45 toises pendant la dernière et cinquième seconde, à cause de 9*x*. *Ce qu'il fallait faire*. »[60]

[59] de Lacaille, *Leçons élémentaires de mathématiques*, nouvelle édition par l'abbé Marie, Paris, Desaint, 1784, p 149.

[60] Ozanam, *La Méchanique*, Paris, Jombert, 1720, pp 89 et 90.

Ozanam ajoute un commentaire à sa résolution : c'est un problème si facile qu'on peut se dispenser de l'algèbre (sous-entendu : il faut réserver l'usage de l'algèbre aux problèmes difficiles), puisqu'il s'agit de partager 125 en cinq nombres respectivement proportionnels à 1, 3, 5, 7 et 9. L'emploi d'une méthode très connue et très utilisée à l'époque, la *Règle de compagnie,* est conseillé par Ozanam.

Avant de l'appliquer à notre question, nous pouvons montrer sur un exemple le fonctionnement de cette règle. Il est extrait des *Leçons élémentaires de mathématiques* de Lacaille. Deux négociants placent l'un 8000 livres, l'autre 4000 livres dans une société qui leur rapporte 1350 livres. Ils veulent partager leur gain *à raison de leurs mises*. Lacaille écrit que la mise totale de 12000 livres est au gain de 1350 livres, comme la mise de chaque négociant est au gain qu'il doit obtenir, ce qui conduit à la proportion suivante : « 12 000 : 1350 : : 8 000 : x »[61] (écrite aujourd'hui $\frac{12000}{1350} = \frac{8000}{x}$). On effectue des simplifications successives « 1200 : 135 : : 8 000 : x ; ou encore ; 400 : 45 : : 8 000 : x ; ou bien 80 : 9 : : 8 000 : x ; ou enfin, 1 : 9 : : 100 : x »[62] ce qui conduit à x = 900 livres. La différence à 1350 livres est alors le gain du second, et, souligne Lacaille, rien n'est plus facile que ce calcul.

Revenons à notre problème initial de chute libre. Il suffit d'appliquer la règle de compagnie au partage de 125 en cinq nombres respectivement proportionnels à 1, 3, 5, 7, 9. « Pour venir à la pratique, multipliez chacun de ces nombres 1, 3, 5, 7, 9, par le nombre donné 125, et divisez chacun des produits 125, 375, 625, 875, 1125, par la somme 25 des mêmes nombres 1, 3, 5, 7, 9, et les quotients 5, 15, 25, 35, 45, seront les espaces parcourus par le mobile dans la première, la seconde, la troisième, la quatrième, et la cinquième et dernière seconde de temps. »[63]

[61] Lacaille, *Leçons élémentaires de mathématiques*, nouvelle édition par M l'abbé Marie, Paris, Desaint, 1784, p 167 et 168.
[62] *Ibid* p 168.
[63] Ozanam, *La Méchanique*, Paris, Jombert, 1720, p 90.

Une des nouveautés dans les utilisations des mathématiques en physique au 18^{e} siècle est l'utilisation des coniques. Le cercle perd alors définitivement son statut privilégié, et la combinaison de la géométrie analytique (l'utilisation des coordonnées cartésiennes) avec les coniques va permettre de développer la cinématique théorique, et l'astronomie, avec maintenant la possibilité d'envisager des prévisions précises à l'aide des calculs.

1.2.4 Coniques

Après les découvertes au 17e siècle de la trajectoire elliptique des planètes par Kepler, et de la trajectoire parabolique des projectiles par Galilée, on va accentuer les études des coniques. Comme préambule à ses *Institutions Newtoniennes* de 1747, Sigorgne fait débuter son ouvrage par un *Traité des sections coniques*. Au long des 23 pages d'une écriture serrée, les propriétés et les théorèmes sont fournis ; ils utilisent la géométrie analytique dans le plan des figures, les équations des courbes ayant été établies préalablement. L'auteur présente les coniques par familles : la parabole, l'ellipse, puis l'hyperbole sont étudiées successivement et indépendamment. Sans contenu astronomique ou physique, le traité ne contient que des mathématiques, leur utilisation dans des applications viendra dans la partie physico-astronomique de l'ouvrage. Sigorgne souligne l'importance de cette étude, son traité des coniques ne contenant que « les propositions dont on a eu besoin dans les *Institutions* ».

La deuxième édition des *Institutions Newtoniennes*, fortement remaniée, parue en 1769, soit plus de vingt ans après la première, propose également un *Traité des Sections coniques*, mais beaucoup plus complet, 49 pages, soit plus du double de celui de 1747.

Le traitement est différent, on commence par définir l'ellipse à partir du cercle, on étudie ses propriétés, puis en éloignant les deux foyers à l'infini, l'auteur montre le passage à la parabole qu'on étudie à son tour. De même, on passe de l'ellipse à l'hyperbole dont on établit les propriétés. Cette présentation permet dans une deuxième partie d'obtenir les propriétés générales des sections coniques rapportées à leurs diamètres. L'auteur termine ce travail très complet par la présentation géométrique des sections du cône par un plan, ce qui permet de retrouver les trois coniques et leurs équations. Comme le traité de 1747, celui-ci ne contient que des mathématiques, leur utilisation pour la physique viendra dans le corps des *Institutions*.

Nous devons citer un manuel paru en 1750 pour compléter notre propos. *Le Traité des sections coniques et autres courbes anciennes* (pour ces dernières, il s'agit de la cissoïde, la conchoïde, la quadratrice, la spirale et la cycloïde), publié à Paris chez Quillau en 1750, est un ouvrage important qui étudie de façon très approfondie les coniques. Son auteur, La Chapelle, démontre à plusieurs reprises des propriétés, théorèmes ou corollaires en faisant référence à l'auteur des *Institutions Newtoniennes ;* il présente par exemple « quatre vérités nécessaires pour l'intelligence des Institutions newtoniennes de M. Sigorgne », aux pages 154 à 159, etc…

Il s'en explique dans sa préface : selon lui les *Institutions Newtoniennes* s'enseignent de plus en plus à l'Université, et il leur fournit un complément en démontrant certaines propriétés. Son approche est un peu différente de celle de Clairaut ; il a pour souci de passer continuellement de la théorie à la pratique : « Mon sujet s'est présenté à moi sous trois points de vue, qui me paraissent se donner mutuellement secours, la théorie des courbes, leur usage dans les Arts, l'histoire de leur origine et de leur progrès. La théorie en sera la lumière, l'usage le fruit, et l'histoire le délassement. » [64]

Le manuel contient plusieurs applications des sections coniques à la physique, le calcul de l'excavation des mines, la construction de porte-voix, de cornets acoustiques, de miroirs brûlants, et surtout une *théorie et pratique du jet des bombes* de trente-sept pages, qui

[64] La Chapelle, *Le Traité des sections coniques et autres courbes anciennes*, Paris, Quillau, 1750, préface p 5 et 6.

met en place ce qui est proposé dans la préface, c'est-à-dire qu'après l'étude complète des propriétés des paraboles, le jet des bombes est étudié complètement, avec une approche historique, et de nombreux exemples numériques et concrets. Il est fait appel au calcul littéral, avec intervention des proportions, aux coniques et à leurs propriétés, mais aussi à la trigonométrie et à la géométrie, pour fournir au lecteur une information parfaite.

Quelques années plus tard, l'abbé Jean Sauri publie des *Institutions mathématiques servant d'introduction à un cours de philosophie*, dans lequel on a l'occasion de voir détaillée l'utilisation des coniques pour l'étude de la trajectoire des projectiles. Le paragraphe consacré à cette étude intitulé « De quelques usages qu'on peut faire des sections coniques » conduit à l'expression analytique de la trajectoire parabolique. L'auteur dit qu'il lui faut d'abord établir trois principes qui seront nécessaires pour obtenir ses résultats. C'est sur le mot « établir » que le lecteur peut montrer quelque surprise, car il ne s'agit que d'une justification et non d'une démonstration.

Le premier principe énonce la proportionnalité des espaces et des carrés des temps lors d'un mouvement d'un corps soumis à la seule gravité. Pour l'auteur, c'est l'expérience qui nous a appris « qu'un corps qui tombe pendant un temps comme deux, décrit un espace quadruple de celui qu'il décrirait s'il tombait seulement pendant un temps comme un, et qu'il décrit un espace neuf fois plus grand s'il tombe pendant un temps triple, qu'en tombant pendant un temps comme un. »[65] Il n'y a donc pas de réelle démonstration.

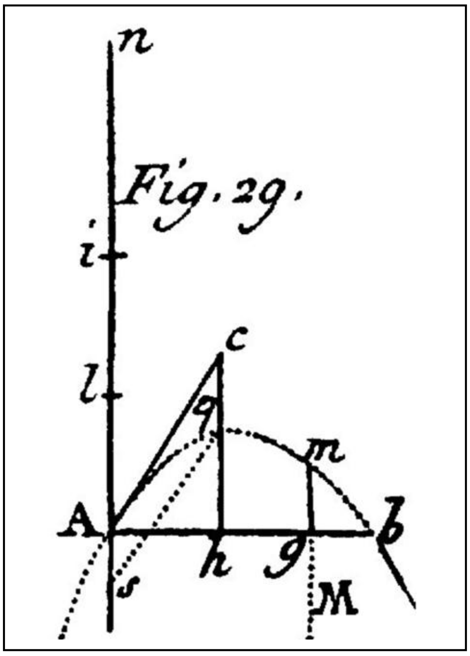
Le second principe est le suivant : la vitesse acquise par un corps en chute libre pendant un temps donné, lui permet de parcourir selon un mouvement uniforme un espace double du premier, pendant le temps suivant de même durée que le premier. La justification s'appuie sur le premier principe. Pendant un temps double, le mobile parcourt un espace

[65] Sauri, *Institutions mathématiques servant d'introduction à un cours de philosophie*, 4ème édition, chez Froullé, libraire à Paris, 1786, p 286.

quadruple de celui qu'il parcourait dans un seul temps. L'espace quadruple se divise en un pour le premier temps, il en reste trois pour le deuxième temps, un dû à la gravité, comme pour le premier temps, et donc deux grâce à la vitesse acquise à la fin du premier temps.

Le troisième principe concerne la proportionnalité des vitesses et des temps pendant le mouvement d'un corps soumis à la gravité. Les trois principes précédents permettent à l'auteur de déduire un corollaire. Si les espaces sont comme les carrés des temps, et les vitesses comme les temps, on en déduit que les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées des espaces.

Les trois principes et leur corollaire étant posés, on peut passer à l'étude de la trajectoire proprement dite. On suppose un corps A lancé selon la direction *Ac* (fig 29), avec une vitesse égale à celle qu'il obtiendrait en tombant le long de *l*A sous l'action de la gravité ; selon le second principe, dans le même temps que celui de la chute de A le long de *l*A, il parcourrait un espace double avec la vitesse acquise à la fin de sa chute, c'est-à-dire A*i* = 2A*l* selon un mouvement uniforme.



Supposons encore que le corps lancé dans la direction Ac parvienne en q, par l'action de la gravité, dans le temps qu'il serait parvenu en c, sans cette action, cq sera l'espace que la gravité lui aura fait parcourir dans ce temps-là ; donc, par le premier principe, cq sera à lA, comme le carré du temps employé à parcourir cq au carré du temps employé à parcourir lA.

De plus, le temps le long de Al, est le même, selon le second principe, que le temps du mouvement le long de Ai ; et, parce que cq est parcouru dans le temps que Ac le serait par un mouvement uniforme, le temps par cq peut être représenté par Ac, et le temps par lA peut être représenté par Ai [66] ; donc cq : Al ::

[66] En effet, puisque les espaces A*c*, A*i* sont parcourus avec une même vitesse, les temps employés à les parcourir doivent être d'autant plus grand que ces espaces sont plus grands, c'est-à-dire, que ces espaces doivent être dans le rapport des temps employés à les parcourir. Note de l'auteur.

$(Ac)^2$: $(Ai)^2$. De plus, faisant Al : Ai :: Ai : An, c'est-à-dire, prenant An quadruple de Al, on aura Al $\times$ An = $(Ai)^2$; or la proportion ci-dessus donne cq $\times$ $(Ai)^2$ = Al $\times$ $(Ac)^2$; donc, en substituant la valeur de $(Ai)^2$, l'on aura cq $\times$ Al $\times$ An = Al $\times$ $(Ac)^2$; et, divisant par Al, cq $\times$ An = $(Ac)^2$ = $(sq)^2$;

Le résultat obtenu peut être présenté plus simplement en utilisant les coordonnées des points de la courbe. L'ordonnée y est sq, l'abscisse x est $As = cq$, et nA est le paramètre p. Le résultat obtenu ci-dessus peut alors s'écrire $y^2 = px$, équation de la parabole, ce qui permet à Sauri de conclure que les corps lancés en l'air décrivent une parabole, à condition que l'on néglige la résistance de l'air. Il ajoute qu'on peut construire des tables à l'aide de cette formule, faisant intervenir la force de la poudre, l'inclinaison du mortier et le lieu où on désire frapper. Il termine par une deuxième formulation mouvement du projectile : « Soit = t le temps le long de cq, que l'on peut représenter par Ac, comme nous venons de le voir ; $cq = z$, Al = $\frac{nA}{4} = \frac{p}{4}$, on aura $cq \times$ An = pz, et $(Ac)^2 = t^2$; donc on aura l'équation $t^2 = pz$[67] » [68].

Après avoir passé en revue les interventions des techniques mathématiques qu'on peut qualifier de traditionnelles, même si pour certaines, comme l'algèbre ou les coniques, l'introduction dans la physique est relativement récente, nous allons nous pencher sur le grand événement de ce 18e siècle, la prise en compte du calcul basé sur les nombres infiniment petits.

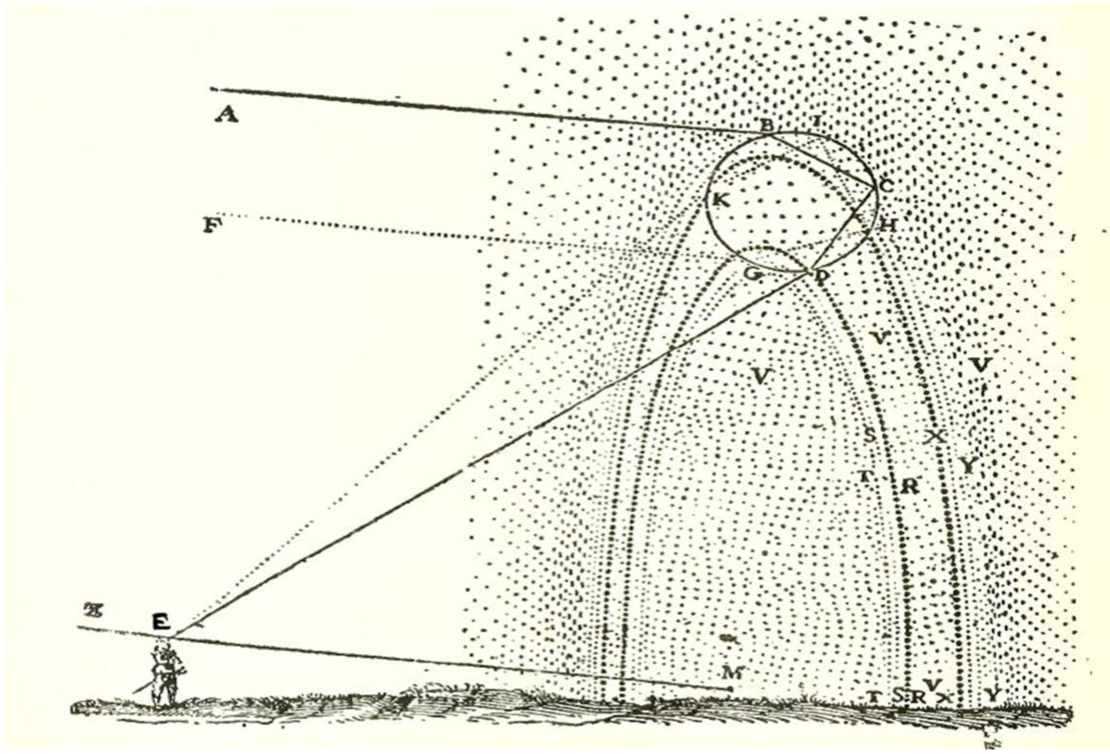
[67] C'est la même que nous venons de trouver, en changeant seulement y en t & x en z. Note de l'auteur.

[68] Sauri, *Institutions mathématiques servant d'introduction à un cours de philosophie*, 4ème édition, chez Froullé, libraire à Paris, 1786, p 288.

1.2.5 Calcul infinitésimal

Dans un certain nombre de cas, comme par exemple la résistance des matériaux étudiée par Galilée, des phénomènes physiques n'ont pas connu d'explication satisfaisante au 17^{e} siècle. Des concepts, comme la vitesse à un instant donné, ne peuvent trouver de définition précise (nous y reviendrons en détail dans notre deuxième partie). Il faut attendre la fin de ce siècle pour voir l'invention d'un nouveau type de calcul, dit infinitésimal, presque simultanément par Newton et Leibniz. Mais avant de les détailler, nous souhaitons aborder deux méthodes inédites de résolutions de problèmes restés sans explication, l'une par Descartes, l'autre par Galilée, par des moyens qui anticipent l'utilisation du calcul infinitésimal.

Un exemple très intéressant d'une tentative de justification mathématique d'un phénomène physique avant la naissance du calcul infinitésimal est celui de l'étude de l'arc-en-ciel. René Descartes, dans un chapitre des *Météores* daté de 1637, propose une recherche mathématique d'*extremum*, et, deuxième apport original, il met en place une modélisation expérimentale du phénomène de l'arc-en-ciel. Sa première observation concerne le fait que l'arc se produit à partir de gouttes d'eau éclairées par le soleil. Les gouttes étant sphériques, Descartes propose de réaliser un modèle de la goutte d'eau en utilisant un flacon sphérique rempli d'eau. La question qu'il se pose concerne le fait que les couleurs de l'arc-en-ciel n'apparaissent que sous certains angles. Il se propose alors de calculer l'angle entre le rayon incident et le rayon réfléchi par le flacon (et donc par la goutte d'eau) après deux réfractions et une réflexion à l'intérieur de celui-ci (rayon ABCDE sur la figure ci-dessous). Son calcul lui indique qu'il y a beaucoup plus de rayons émis sous un angle compris entre 41 et 42° que sous toute autre valeur. Et il y en a beaucoup plus qui viennent vers l'œil après deux réflexions et deux réfractions (rayon FGHIKE sur la figure) sous un angle de 51 à 52° que sous tout autre angle.

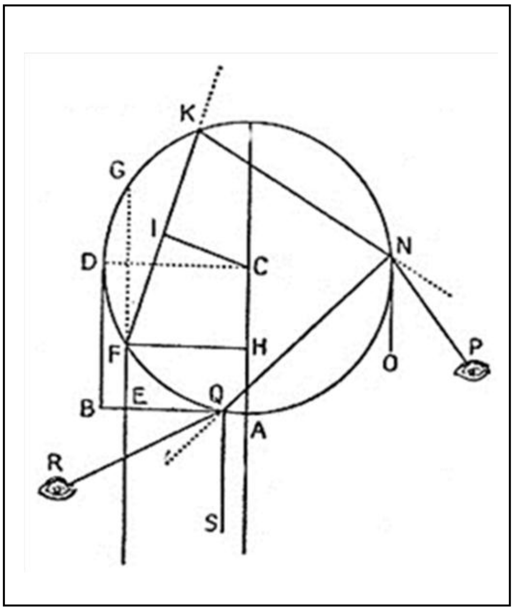


La vision des arcs-en-ciel intérieur et extérieur provient donc de notre réception : nous percevons comme de l'obscurité un lieu envoyant peu de lumière s'il est placé à côté d'un lieu très lumineux, « car, ne recevoir point de rayons de lumière en ses yeux, ou en recevoir notablement moins d'un objet que d'un autre qui lui est proche, c'est voir de l'ombre, …. »[69] En lisant ce texte on pense à la méthode qui consiste à négliger en calcul infinitésimal les termes d'ordre inférieur.

Les mesures étant effectuées, les calculs vont alors permettre de justifier le modèle proposé et conduire à des valeurs concordant avec les expériences. Descartes, qui a présenté ses résultats, propose de les justifier par l'exposition des calculs, à destination de ceux qui

[69] Descartes*, Œuvres,* publiées par Victor Cousin, tome cinquième, Paris, FG Levrault, 1824, discours dix-huitième. De l'arc-en-ciel. p 276.

connaissent les mathématiques. La fameuse loi des sinus pour la réfraction de la lumière passant de l'air dans l'eau, souvent appelée loi de Descartes, ou de Snell, ou de Snell-Descartes, selon les attributions de priorité, s'écrit aujourd'hui ainsi : $\frac{\sin i}{\sin r}$ = constante. Cette constante est fournie par Descartes dans le texte ci-dessous :



Soit AFD une goutte d'eau, dont je divise le demi-diamètre CD ou AB en autant de parties égales que je veux calculer de rayons, afin d'attribuer autant de lumière aux uns qu'aux autres. Puis je considère un de ces rayons en particulier, par exemple EF, qui, au lieu de passer tout droit vers G, se détourne vers K, et se réfléchit de K vers N, et de là va vers l'œil P; ou bien se réfléchit encore une fois de N vers Q, et de là se détourne vers l'œil R. Et ayant tiré CI à angles droits sur FK, je connais de ce qui a été dit en la Dioptrique, que AE ou HF et CI ont entre elles la proportion par laquelle la réfraction de l'eau se mesure. De façon que si HF contient 8 000 parties, telles que AB en contient 10 000, CI en contiendra environ de 5 984, parce que la réfraction de l'eau est tant soit peu plus grande que de trois à quatre, et pour le plus justement que j'aie pu la mesurer, elle est comme de 187 à 250.[70]

Descartes n'emploie pas les sinus des angles d'incidence et de réfraction dans sa formulation. Pour un rayon incident EF, il utilise une relation entre HF et CI. Or l'angle de réfraction r = CFI a pour sinus : $\frac{CI}{CF}$. Quant à l'angle d'incidence i issu du rayon EF, il est égal à l'angle CFG, d'angle complémentaire CFH. Le sinus de CFG est donc égal au cosinus de CFH, donc à $\frac{FH}{CF}$. Ce qui nous conduit à la relation $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\frac{FH}{CF}}{\frac{CI}{CF}} = \frac{FH}{CI}$, et nous ramène à ce que Descartes a écrit. Pour une valeur donnée à HF de 8000, avec un rayon CF = AB = 10000, on obtient CI = 5984, pour l'angle FCG (Descartes écrit *l'arc FG*) 73 degrés 44 minutes, et pour l'angle FCK (*arc FK*) 106 degrés 30 minutes. Il effectue ensuite une série de calculs : « Puis, ôtant le double de l'arc FK de l'arc FG ajouté à 180 degrés, j'ai 40,44 pour la quantité de

[70] Descartes, *Œuvres,* publiées par Victor Cousin, tome cinquième, Paris, FG Levrault, 1824, discours dix-huitième. De l'arc-en-ciel. p 277.

l'angle ONP, car je suppose ON parallèle à EF. Et ôtant ces 40,44 de FK, j'ai 65,46 pour l'angle SQR, car je pose aussi SQ parallèle à EF. »[71]

Ce calcul est réalisé de la même façon pour des rayons incidents parallèles à EF, qui divisent AB en dix parties, de 1000 en 1000, ce qui nous donne le tableau suivant :

LA LIGNE HF	LA LIGNE CI	L'ARC FG	L'ARC FK	L'ANGLE ONP	L'ANGLE SQR
1000	748	168.30	171.25	5.40	165.45
2000	1496	156.55	162.48	11.19	151.29
3000	2244	145. 4	154. 4	17.56	136. 8
4000	2992	132.50	145.10	22.30	122. 4
5000	3740	120.	136. 4	27.52	108.12
6000	4488	106.16	126.40	32.56	93.44
7000	5236	91. 8	116.51	37.26	79.25
8000	5984	73.44	106.30	40.44	65.46
9000	6732	51.41	95.22	40.57	54.25
10000	7480	0.	83.10	13.40	69.30

Descartes fait alors remarquer le fait qu'entre les valeurs de 8000 et 9000 pour HF, on observe un angle ONP stable autour de 40 degrés, il propose alors d'affiner ses calculs en fournissant un nouveau tableau pour les valeurs de HF allant de 100 en 100 depuis 8000 jusqu'à 9800.

71 Descartes*, Œuvres,* publiées par Victor Cousin, tome cinquième, Paris, FG Levrault, 1824, discours dix-huitième. De l'arc-en-ciel. P 277.

LA LIGNE HF	LA LIGNE CI	L'ARC FG	L'ARC FK	L'ANGLE ONP	L'ANGLE SQR
8000	5984	73.44	106.30	40.44	65.46
8100	6058	71.48	105.25	40.58	64.37
8200	6133	69.50	104.20	41.10	63.10
8300	6208	67.48	103.14	41.20	62.54
8400	6283	65.44	102. 9	41.26	61.43
8500	6358	63.34	101. 2	41.30	60.32
8600	6432	61.22	99.56	41.30	58.26
8700	6507	59. 4	98.48	41.28	57.20
8800	6582	56.42	97.40	41.22	56.18
8900	6657	54.16	96.32	41.12	55.20
9000	6732	51.41	95.22	40.57	54.25
9100	6806	49. 0	94.12	40.36	53.36
9200	6881	46. 8	93. 2	40. 4	52.58
9300	6956	43. 8	91.51	39.26	52.25
9400	7031	39.54	90.38	38.38	52. 0
9500	7106	36.24	89.26	37.32	51.54
9600	7180	32.30	88.12	36. 6	52. 6
9700	7255	28. 8	86.58	34.12	52.46
9800	7330	22.57	85.43	31.31	54.12

Et je vois ici que le plus grand angle ONP peut être de 41 degrés 30 minutes, et le plus petit SQR de 51,54 ; à quoi ajoutant ou ôtant environ 17 minutes pour le demi-diamètre du soleil, j'ai 41,47 pour le plus grand demi-diamètre de l'arc-en-ciel intérieur, et 51,37 pour le plus petit de l'extérieur. [72]

Le double travail du savant, modélisation de la goutte d'eau par un flacon de verre plein d'eau, suivi d'expérimentation sur cette dernière, puis de calculs effectués sur les réflexions et réfractions de la lumière, ont conduit le savant français à proposer l'existence d'un rayon privilégié qui sera celui observé. De nombreux auteurs ont repris au 18^{e} siècle ces travaux très novateurs de Descartes.

Nicolas Hartsoeker, biologiste et physicien hollandais, décrivant l'arc-en-ciel intérieur, écrit dans ses *Conjectures* de 1706 que si l'œil est placé selon un angle d'environ 42°, il « y reçoit une plus grande abondance de rayons de cette goutte après qu'ils y ont souffert deux réfractions et une réflexion entre deux, que s'il était placé en quelque autre endroit imaginable. »[73] Signalons ici qu'Hartsoeker, satisfait de ce type d'explications dans les

[72] Descartes, *Œuvres,* publiées par Victor Cousin, tome cinquième, Paris, FG Levrault, 1824, discours dix-huitième. De l'arc-en-ciel. p 279.
[73] Nicolas Hartsoeker, *Conjectures physiques*, Amsterdam, Desbordes, 1706, page 355.

sciences, estime qu'elles sont suffisantes, et rejette les mathématiques des infiniment petits, les jugeant peu utiles pour la physique.

En 1753, un ouvrage consacré à l'optique, *Le mouvement de la lumière,* de Trabaud, rend hommage au travail de Descartes en reprenant point par point ses arguments : « M Descartes a prouvé dans sa dioptrique et a fait comme toucher au doigt que l'arc-en-ciel procède de la manière dont les rayons se réfractent et se réfléchissent dans les gouttes de pluie, en sorte qu'il n'y a aucun lieu de douter que les choses ne se passent dans ce phénomène comme il les a décrites. » Le seul bémol apporté à ces louanges provient de l'explication par Descartes du phénomène des couleurs, qui est différente de celle que Newton a établie expérimentalement. Il ajoute que tout ce qui concerne la partie géométrique de son raisonnement, ainsi que la totalité de sa description de l'arc-en-ciel, est toujours reconnu par les savants d'aujourd'hui.

L'expérience de modélisation de la goutte de pluie par un ballon de verre empli d'eau est décrite en détails par Trabaud, avec les conséquences observées de l'apparition des couleurs uniquement sous certains angles, ainsi que la recherche de validation des résultats par le calcul utilisant les lois de réflexion et de réfraction. Trabaud n'entre pas, comme Descartes avait pu le faire, dans le détail des calculs, mais propose une justification de l'accumulation de plusieurs rayons au même angle, à partir de la connaissance fonctionnelle des *maxima* et des *minima* d'une grandeur, mais sans évoquer les infiniment petits qu'il devait pourtant bien connaître: « Car telle est la nature des quantités qui augmentent et qui ensuite diminuent, ou qui diminuent et augmentent ensuite, qu'autour de la plus grande et de la plus petite, il y en a plusieurs qui leur sont sensiblement égales. »[74]

[74] Trabaud, *Le mouvement de la lumière*, ou premiers principes d'optique, Paris, Durand et Pissot, 1753, pages 246.

Même Pemberton, militant du newtonianisme, doit reconnaître la valeur de l'explication cartésienne. Selon lui, la formation de l'arc-en-ciel était connue bien avant la découverte de la théorie des couleurs par Newton, « Le premier qui a démontré que l'arc-en-ciel était formé par la réflexion des rayons du soleil renvoyé par des gouttes de pluie en l'air, a été Antonio de Dominis. Descartes a expliqué ensuite la chose avec plus d'étendue, et plus clairement. »[75]

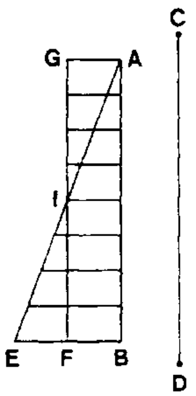
Enfin, pour en terminer avec cette étude, le *Traité d'optique* de Smith résume bien l'originalité de la découverte de Descartes, en utilisant la notion de rayons efficaces pour spécifier ceux qui, étant proches les uns des autres, vont renforcer leur effet, et par conséquent être ceux qui seront perçus, puisque les autres rayons plus dispersés, seront négligeable d'un point de vue lumineux, comme le seraient des termes infiniment petits.

> *Ces rayons qui sortent parallèles et de plus sont très proches l'un de l'autre, agissant par conséquent avec force sur l'œil, lorsqu'ils se rencontrent, sont nommés à cause de cela rayons efficaces. Ces rayons sont réfléchis au même point de la goutte, dans le premier arc-en-ciel, et sont parallèles après la première réflexion dans le second ; en sorte que pour trouver les rayons efficaces dans le premier arc-en-ciel, il ne s'agit que de trouver quels sont les rayons parallèles infiniment proches, qui après être entrés dans la goutte, se rencontrent au même point de sa concavité, et de là se réfléchissent vers l'œil ; et dans le second, quels sont ceux qui, après leur première réflexion, sont parallèles.*[76]

La méthode utilisée par Galilée pour l'étude du mouvement rectiligne uniformément accéléré, dans la lignée de celle d'Oresme vue précédemment, est très différente de celle de Descartes ; il utilise des agrégats de parallèles qui nous font penser aux indivisibles qui étaient

[75] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, livre III, chapitre V, p 480.
[76] Smith, *Traité d'optique*, traduit de l'anglais par Duval-le-Roy, Paris, 1767, note 939 p 581.

employés au temps de Galilée, mais qui n'ont pas eu de réelle postérité en physique. Le théorème 1 de la troisième journée des *Discours concernant deux sciences nouvelles* fournit une égalité de temps de parcours pour un mobile dans deux conditions différentes : dans la première il suit un mouvement rectiligne uniformément accéléré de vitesse initiale nulle, et dans la deuxième il suit un mouvement rectiligne uniforme avec une vitesse égale à la moitié de la vitesse finale (*le plus grand et dernier degré de vitesse*) du mouvement dans la première condition. Pour démontrer son théorème, Galilée fournit une figure. Sur celle-ci la ligne AB représente le temps, CD l'espace parcouru, le plus grand et dernier degré de vitesse est la ligne EB ; si on trace la ligne AE, toutes les parallèles à BE issues des points de la ligne AB représentent les degrés de vitesse croissants à partir de l'instant initial A.



Divisons BE en son milieu par le point F, et menons FG et AG respectivement parallèles à AB et FB ; on aura construit le parallélogramme AGFB égal au triangle AEB, et dont le côté GF coupe AE en son milieu I ; si ensuite les parallèles du triangle AEB sont prolongées jusqu'à GI, nous aurons l'agrégat de toutes les parallèles contenues dans le quadrilatère égal à l'agrégat des parallèles comprises dans le triangle AEB : en effet celles qui se trouvent dans le triangle IEF correspondent à celles que contient le triangle GIA, et celles qui sont dans le trapèze AIFB sont communes.[77]

Les parallèles à EB menées par tous les points de AB et comprises dans le triangle AEB représentent les degrés croissants de vitesse du mouvement accéléré. Les parallèles contenues dans le rectangle ABFG représentent les vitesses égales du mouvement uniforme. Constatant l'égalité des aires de AEB et de ABFG, et sachant que la distance est égale à la vitesse multipliée par le temps, on déduit, par une forme d'intégration, que la distance parcourue dans le mouvement accéléré (représentée par l'aire du triangle AEB) est égale à la distance parcourue dans le mouvement uniforme (représentée par l'aire du rectangle ABFG), à condition que la vitesse du mouvement uniforme soit égale à la moitié de la vitesse du mouvement accéléré.

[77] Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, Paris, PUF, 1995, troisième journée, p. 139.

Les deux techniques de résolution que nous venons de présenter seront naturellement rendues inutiles par l'utilisation du calcul différentiel, mais ont permis à un moment donné de répondre de manière satisfaisante à des questions de physique par des moyens qui s'approchent du calcul infinitésimal. C'est l'avènement de ce dernier qui va permettre les avancées les plus notables de la physique du 18e siècle. Deux savants vont s'en partager la paternité, Newton et Leibniz.

Inventeur du calcul des fluxions sur lequel nous reviendrons, Newton ne les utilise pas dans la présentation de sa théorie physique. Les *Principia mathematica* contiennent ce qu'on a appelé une géométrie différentielle, mais qui en réalité est plus que cela, puisqu'elle fait intervenir simultanément de la géométrie, des infiniment petits, mais aussi la cinématique, car pour démontrer ses résultats, Newton « fait bouger » ou déforme les objets mathématiques qu'il étudie. À partir de relations obtenues sur des figures par la géométrie d'Euclide, il fait tendre les dimensions des figures vers des valeurs infiniment petites et regarde ce que deviennent les relations du départ. Il parle alors de proportions ou raisons dernières ou ultimes, et de quantités *évanouissantes*.

Avant d'étudier les forces centripètes qui sont à la base de sa mécanique, Newton propose onze lemmes qui lui permettront de démontrer mathématiquement les lois qu'il veut établir. Le premier lemme introduit la méthode mise en œuvre : on va chercher à égaler des figures : « Les quantités et les raisons des quantités qui tendent continuellement à devenir égales pendant un temps fini, et qui avant la fin de ce temps approchent tellement de l'égalité, que leur différence est plus petite qu'aucune différence donnée, deviennent à la fin égales. »[78] Les lemmes deux à cinq permettent des approximations de figures curvilignes par des figures

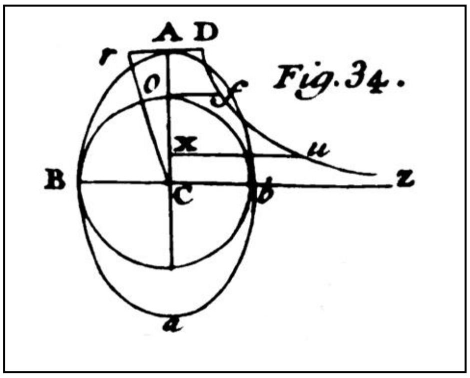
[78] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduit en français par la marquise Du Châtelet, Paris, Desaint et Saillant, 1759, tome premier, p 37.

curvilignes. Les lemmes six à onze fournissent des relations entre des éléments géométriques au voisinage d'un point d'une courbe. Le lemme six, par exemple, est le suivant : « Si un arc de cercle quelconque ACB donné de position, est soutenu par la corde AB, et qu'au point A placé dans le milieu de sa courbure continue, il soit touché par une droite AD prolongée des deux côtés, et que les points A et B s'approchent l'un de l'autre jusqu'à ce qu'ils coïncident ; l'angle BAD, compris sous la tangente et la corde diminuera à l'infini, et s'évanouira à la fin. »[79] Ce résultat permet à l'auteur d'énoncer le lemme sept qui dit que *la dernière raison* qu'ont entre elles l'arc, la corde et la tangente, est la raison d'égalité. Le lemme dix fournit une relation faisant intervenir une force. Pour Newton une force est un objet mathématique : « cette façon de considérer la force centripète est purement mathématique, et je ne prétends point en donner la cause physique »[80] Si une force cause un mouvement, les espaces parcourus sont en raison doublée des temps (c'est-à-dire proportionnels aux carrés des temps).

C'est cette géométrie différentielle que Newton utilise dans ses *Principia mathematica*, et non pas la théorie des fluxions qu'il a développée précédemment. Cette géométrie lui permet d'établir toutes les lois de la mécanique classique encore utilisées de nos jours. La théorie des fluxions, bien que liée à des concepts issus de la physique (vitesse ou fluxion, variation de vitesse, grandeur engendrée par le mouvement ou fluente) n'aura donc pas d'application immédiate en physique. C'est une des raisons qui permettent de comprendre que c'est une théorie concurrente qui sera utilisée pour le développement du calcul infinitésimal en physique. Cette théorie est celle issue des travaux de Leibniz, on l'appelle souvent calcul différentiel et intégral, par opposition au calcul des fluxions. La méthode de Leibniz, inspirée de la géométrie, ne s'appuie pas sur la physique, mais elle connaîtra une diffusion assez rapide dans la fin du 17e siècle, grâce en particulier au marquis de l'Hospital, et sera, comme nous le verrons dans notre deuxième partie, appliquée à la cinématique et à la dynamique par Varignon dès 1700.

[79] *Ibid* p 40.
[80] *Ibid*. p 6.

Pour comprendre comment fonctionne en physique le calcul de Leibniz, nous pouvons le montrer sur un exemple tiré d'un ouvrage de Sigorgne. Dans ses *Institutions newtoniennes* de 1747, Sigorgne fait usage des calculs différentiel et intégral. Mais il suppose un lecteur non formé à ces techniques et il fournit des éléments permettant une compréhension de sa démonstration. Il s'agit ici de rechercher le rapport des axes, ou la quantité de l'aplatissement de la Terre considérée comme un sphéroïde. Dans la figure 34 ci-dessous la Terre est ABab. On déduira les valeurs de l'aplatissement à partir de la pesanteur, en supposant que celle-ci est dirigée vers le centre, et qu'elle est proportionnelle à une puissance quelconque n de la distance à ce centre. AD, of, xu, expriment les pesanteurs des points A, o, x. La pesanteur totale du rayon CA sera à celle d'une partie quelconque oA de ce rayon comme l'aire ACzD à l'aire correspondante AofD (celle-ci étant égale à l'aire du triangle ACr). Il déduit de la formule obtenue pour xu : $\frac{px^n}{a^n}$, la valeur de l'aire xCzu : $\frac{px^{n+1}}{\overline{n+1}\times a^n}$. La méthode utilisée fait appel au calcul différentiel et intégral, et Newton se propose dans une note de bas de page de montrer comment on obtient ce résultat.



Ceux qui n'ont point de principe sur le calcul différentiel et intégral, pourront concevoir par cette remarque comment il se fait que xu étant = $\frac{px^n}{a^n}$*, l'aire xCzu =* $\frac{px^{n+1}}{\overline{n+1}\times a^n}$*. Si l'on conçoit que les deux côtés d'un carré xx croissent continuellement d'une quantité infiniment petite exprimée par dx, chaque côté deviendra x + dx, et le carré dans cet état d'accroissement sera xx + 2xdx + ddxx ; donc 2xdx + ddxx, ou parce que ddxx est un infiniment petit du second genre qu'on peut négliger, 2xdx est la quantité dont le carré xx s'accroît à chaque moment, et cette quantité se nomme la différentielle de xx.*[81]

Sigorgne donne alors la règle permettant de trouver la différentielle de x^2 : il suffit de multiplier x par son exposant qui est 2, puis diminuer cet exposant d'une unité, ce qui donne 2x, et on multiplie ce résultat par la caractéristique dx, ce qui nous donne la différentielle 2xdx. En utilisant cette méthode, les différentielles de x^3, x^4 etc. sont respectivement $3x^2dx$,

[81] Sigorgne, *Institutions newtoniennes*, Paris, Quillau, 1747, Remarque de bas de page, pp 256.

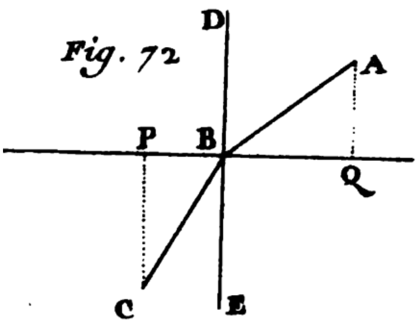
$4x^3dx$. Comme $2xdx$ est la quantité dont x^2 s'accroît continuellement, une somme infinie de ces $2xdx$ donne x^2. Effectuer ce calcul s'appelle intégrer. Cette opération étant l'inverse de la première, on comprend bien comment l'effectuer, enlever dx, puis augmenter l'exposant d'une unité, et enfin diviser le coefficient dont x est affecté par cet exposant ainsi augmenté. « D'où il suit que puisque $xu = \frac{px^n}{a^n}$ est la différentielle de l'aire xCzu, on aura cette aire en intégrant $\frac{px^n}{a^n}$ par les règles prescrites, ce qui donnera $\frac{px^{n+1}}{n+1 \times a^n}$. On n'a point opéré sur p ni sur a^n, parce que ce sont des grandeurs constantes qui n'ont point de différentielles. L'aire ACzD sera pour la même raison $\frac{pa^{n+1}}{n+1 \times a^n} = \frac{pa}{n+1}$.»[82]

Fluxions newtoniennes et calcul leibnizien se veulent des réponses aux questions non résolues depuis des décennies concernant les tangentes aux courbes. La méthode dite inverse des tangentes permet de construire une courbe à partir des propriétés de ses tangentes. La quasi-simultanéité des solutions à ce problème apportées par Newton et Leibniz a entraîné une polémique bien connue, et il s'en est suivi une querelle de paternité. Maximilien Marie, dans les tomes six et sept de sa volumineuse *Histoire des sciences mathématiques et physiques*, a fourni des éléments nombreux permettant de se faire une idée précise sur ce débat. Il écrit que nous pourrions croire que Newton n'était pas en possession de sa théorie des fluxions quand il a écrit en 1687 les *Principia mathematica,* tant les différences sont grandes entre les deux méthodes. En réalité il pense que le physicien anglais voulait tenir cachée sa méthode des fluxions. Des lettres de 1676 annoncent cette découverte « Cependant pour ne pas paraître avoir annoncé plus de choses que je n'en pouvais faire, j'ai la solution du problème inverse des tangentes et d'autres encore plus difficiles, et pour les résoudre, je me suis servi de deux méthodes, […] il me paraît bon de les consigner l'une et l'autre dès maintenant, par lettres transposées …… » [83] Par lettres transposées, Newton entend une anagramme qui traduit sa méthode utilisant fluxions et fluentes.

[82] Sigorgne, *Institutions newtoniennes*, Paris, Quillau, 1747, Remarque de bas de page, pp 257, 258.
[83] Marie, Maximilien, *Histoire des sciences mathématiques et physiques*, tome 6, Paris, Gauthier-Villars, 1885, lettre de Newton p153.

Or, en 1676, Leibniz lui aussi a écrit des lettres montrant qu'il est en possession de sa méthode de calcul. Il ajoute qu'il pense que ce qu'a voulu cacher Newton en ce qui concerne les tangentes est proche de ce que lui-même a trouvé.

Marie ajoute que Newton écrit dans la première édition des *Principia mathematica,* dans le scholium du second lemme du second livre, que Leibniz lui a communiqué une méthode approchant de la sienne. Il a fait retirer cette remarque de la seconde édition des *Principia mathematica*. Il est difficile d'avoir une idée plus précise sur cette polémique, on peut seulement dire que Leibniz et Newton ont certainement trouvé indépendamment la méthode à peu près en même temps. Mais le débat durable entre Newton et Leibniz n'a pas eu de grande incidence sur l'impact du calcul différentiel sur la physique. Nous verrons dans notre deuxième partie que la publication d'un ouvrage par l'Hospital a été rapidement suivie de l'utilisation de ce calcul par Varignon, et ce qui en a découlé. Dès les années 1730 on en voit des éléments dans quelques ouvrages de mathématiques contenant des applications à la physique, comme par exemple la traduction en 1735 d'un manuel de mathématiques, dont la vocation est de servir de suite à l'ouvrage célèbre *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes* écrit par le marquis de l'Hôpital en 1696, mais avec un complément consacré à l'étude du calcul intégral ; l'ouvrage, intitulé *Analyse des infiniment petits comprenant le calcul intégral dans toute son étendue*, étudie, parmi plusieurs applications à la physique, la démonstration de la loi de la réfraction de la lumière. Il fait intervenir pour cela le calcul différentiel, mais le titre (*Trouver la loi de la réfraction, admettant ce principe, que la nature suit dans ses opérations les voies les plus simples et les plus courtes*.) montre que, pour obtenir son résultat, il utilise le principe de Fermat, qui demande de minimiser une grandeur. Comme Fermat, il minimise le temps parcouru, ce qu'il énonce par « utiliser les voies les plus courtes » : (nous reviendrons plus loin sur ce principe très important de la physique). Il pose que le rapport de la vitesse de la lumière de A à B à la vitesse de la lumière de B à C est noté par $\frac{m}{n}$ (figure 72). Le temps nécessaire pour aller de A à B est à celui pour aller de B à C comme $n \times AB$ est à $m \times BC$, on trace les perpendiculaires AQ et CP à la ligne de séparation



des milieux, on pose AQ = a, CP = b, PQ = c, PB = x, ce qui donne BQ = c – x, BC = $\sqrt{bb+xx}$, et AB = $\sqrt{aa+cc-2cx+xx}$.

Le temps total nécessaire pour parcourir AB + BC est m $\sqrt{bb+xx}$ + n $\sqrt{aa+cc-2cx+xx}$, qui doit être un *minimum*. Ainsi sa différentielle sera $\frac{mx\,dx}{\sqrt{bb+xx}} + \frac{nx\,dx}{\sqrt{aa+cc-2cx+xx}} = 0$; donc :

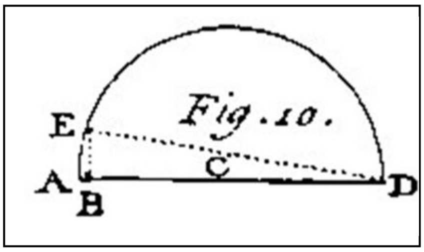
$\frac{mx}{\sqrt{bb+xx}} = \frac{n\times c-x}{\sqrt{aa+cc-2cx+xx}}$, ou encore $\frac{m\times PB}{BC} = \frac{n\times BQ}{AB}$. Si on prend AB = BC, on obtient :

m : n : : BQ : PB.

Stone peut donc retrouver la loi de réfraction :

> *D'où il suit que si AB ou BC est pris pour le rayon, BQ sera le sinus de l'angle A, et PB, le sinus de l'angle C ; c'est-à-dire, parce que AQ et PC, sont parallèles à DE ; PB est le sinus de l'angle de réfraction et BQ le sinus de l'angle d'incidence. Il suit de là que le sinus de l'angle d'incidence, est au sinus de l'angle de réfraction dans un rapport constant ; par exemple, dans celui de la vitesse, de la lumière avant la réfraction, à la vitesse durant cette réfraction.*[84]

Le calcul différentiel fait donc lentement son apparition, mais de façon de plus en plus régulière, dans les ouvrages de physique ou d'astronomie au 18e siècle. Sigorgne, dans ses *Institutions newtoniennes* de 1747, souhaite démontrer que la pesanteur de la lune vers la terre est la même que « celle qui fait tomber ici les corps vers le centre de la terre, diminuée en raison du carré de la distance de la lune au centre de la terre. »[85]Il commence par proposer le lemme suivant : « Le sinus verse[86] AB d'un arc infiniment petit AE (figure 10), est comme le carré de cet arc AE divisé par le diamètre AD du cercle. Car à cause que AE est infiniment



[84] Stone, *Analyse des infiniment petits comprenant le calcul intégral dans toute son étendue*, traduction Rondet, Paris, Gandouin et Giffart, 1735, problème 8, page 145.
[85] Institutions newtoniennes, Sigorgne, Paris, Quillau, 1747, p 81.
[86] Le sinus verse d'un angle a est égal à 1 – cos a.

petit, DEA est un triangle rectangle en E, et EB une perpendiculaire menée de l'angle droit sur l'hypoténuse AD ; donc (propriété du triangle rectangle) AB . AE : : AE . AD, et par conséquent $AB = \frac{AE^2}{AD}$. »[87]

Parmi les présentations originales de cette époque, nous pouvons citer une utilisation d'une forme de calcul infinitésimal sans différentielle qui apparaît en 1764 dans l'ouvrage de mécanique de Lacaille, avec l'utilisation du symbole ∞ représentant l'infini ; elle concerne le théorème bien connu et déjà traité ici de la comparaison entre un mouvement accéléré et un mouvement uniforme : dans un mouvement uniformément accéléré de vitesse initiale nulle, l'espace *e* parcouru pendant un temps *t*, n'est que la moitié de l'espace que parcourrait uniformément dans le même temps *t*, un corps qui aurait une vitesse *u* égale à celle acquise à la fin du mouvement accéléré. La démonstration est la suivante :

> *Partagez le temps t en une infinité d'instants égaux, et puisque u exprime la vitesse acquise à la fin du temps t, les degrés de vitesse pendant chacun de ces instants seront exprimés par cette progression arithmétique :* $\frac{1u}{\infty} . \frac{2u}{\infty} . \frac{3u}{\infty} . \frac{4u}{\infty}$ *dont le dernier terme est* $\frac{\infty u}{\infty}$*. Or pendant chaque instant égal et infiniment petit, le mouvement étant uniforme, chaque espace parcouru est comme la vitesse. Donc chaque terme de cette progression est proportionnel à chaque espace parcouru pendant chaque instant, et la somme de tous ces termes, représente l'espace total e parcouru pendant la durée t du mouvement. Mais la somme des termes de cette progression est égale au produit de la somme* $\frac{1u}{\infty} + u$ *des extrêmes, multipliée par la moitié du nombre des termes, c'est-à-dire, par la moitié du nombre des instants, ou par* $\frac{t}{2}$*. Donc e =* $\left(\frac{u}{\infty} + u\right) \times \frac{t}{2} = \frac{ut}{2\infty} + \frac{ut}{2}$*. Donc, à cause du terme infiniment petit* $\frac{ut}{2\infty}$*, on a* $e = \frac{ut}{2}$*.*[88]

[87] *Ibid* p 81.
[88] Lacaille, *Leçons élémentaires de mécanique*, nouvelle édition, Guérin, Paris, 1764, pp 29 et 30.

Tous les physiciens du 18^{e} siècle ne sont pas en accord avec l'utilisation du calcul différentiel, nous l'avons déjà évoqué, nous rencontrerons par exemple un de ses plus farouches opposants, Castel, dans le paragraphe suivant consacré aux Tourbillons cartésiens. Mais le débat sur le problème de l'infini, important pour les philosophes et les mathématiciens, n'aura finalement que peu d'incidences sur la physique, parce que, comme nous le verrons plus loin, le calcul différentiel et intégral permettra une avancée notoire dans la découverte de nouvelles propriétés et dans l'élaboration des théories. Varignon par exemple fait fonctionner le calcul pour établir les formules de cinématique et de dynamique et occulte le débat sur l'existence des infiniment petits. Nous trouvons néanmoins quelques personnes qui ne souhaitent pas la présence du calcul infinitésimal dans la physique. Dans son *Traité de paix entre Descartes et Newton,* le Père Paulian, de la Compagnie de Jésus, professeur de physique au collège d'Avignon, s'oppose à une utilisation du calcul infinitésimal comme l'a fait Newton, non par refus de ce type de calcul, mais parce qu'il l'estime superflu, puisque les propriétés ont été démontrées presque exclusivement à l'aide de la géométrie. Il cite les onze lemmes « que le philosophe anglais paraît regarder comme l'âme de son livre des Principes. »[89] Sans blâmer la méthode, il assure qu'on peut sans l'aide de celle-ci, retrouver les résultats essentiels.

[89] Paulian, *Traité de paix entre Descartes et Newton*, Girard, Avignon, 1763, tome deux, p 285.

1.3 Le rôle des mathématiques dans la lutte des cartésiens contre les newtoniens au 18ème siècle

Après les travaux de Kepler et la découverte des lois globales régissant le mouvement planétaire dans le système solaire, il reste si peu d'opposants à l'héliocentrisme qu'on peut considérer que l'unanimité est faite parmi les savants en ce début du 18^{e} siècle. Tous sont coperniciens. Les lois de Kepler, au nombre de trois, sont les suivantes :

Première loi : les orbites des planètes sont des ellipses dont le soleil occupe l'un des foyers.

Deuxième loi : la vitesse des planètes varie de façon à balayer des aires égales dans des temps égaux.

Troisième loi : le carré du rapport des périodes de deux planètes est égal au cube du rapport des demi-grands axes de leurs orbites.

Elles régissent le fonctionnement du système solaire et vont petit à petit être validées par différentes observations et mesures ; les cartésiens et les newtoniens ne débattent pas sur la validité de ces lois à la fin du 17^{e} siècle, mais vont s'opposer sur un autre plan. La première moitié du siècle suivant voit un affrontement entre les tenants des thèses de Descartes s'appuyant sur les tourbillons agissant par contact, et les disciples de Newton qui défendent l'existence réelle ou supposée d'une force s'exerçant à distance. Nous avons montré précédemment que les bases sur lesquelles s'appuie la théorie des tourbillons sont issues d’une série de propositions qui semblent réalistes à Descartes, et qui lui permettent de déduire un certain nombre de propriétés, essentiellement qualitatives, assez voisines des observations réalisées à son époque.

Newton publie en 1687 ses *Principia mathematica*, qui sont traduits en français par *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, dont nous avons présenté l’appareil mathématique plus haut. L’auteur y présente ses idées sur la structure du monde, les notions, les actions et les relations qui interviennent pour rendre compte de ses conceptions sur la physique. Il la fonde sur l’attraction universelle qu’il prend la précaution de tenir pour une pure grandeur mathématique, utile pour les calculs, mais n’ayant pas nécessairement une réalité physique. En réalité une partie importante du traité est destinée à rejeter la théorie cartésienne. Pour cela Newton s'appuie sur la critique des tourbillons, dont les propriétés prévisibles sont d’après lui contraires aux expériences, et il va proposer de les remplacer en utilisant une force attractive entre les corps, ces deux démarches étant en fait imbriquées dans les *Principia mathematica*.

La méthode mise en œuvre consiste à mettre le principe des tourbillons en contradiction avec les lois de Kepler. Pour cela il démontre, dans la proposition LII, théorème 40 du livre II, que si une sphère tourne uniformément dans un fluide, et que le fluide tourne uniformément en raison de l’impulsion donnée par le solide, « les temps périodiques des parties du fluide seront comme les carrés de leur distance au centre de la sphère. »[90] Ce résultat est contraire à la troisième loi de Kepler, et il poursuit dans la proposition LIII, théorème 41 du même livre, en montrant qu'un corps solide ne peut avoir une trajectoire fermée au sein d'un tourbillon que s'il a même densité que lui : « Les corps, qui sont emportés par des tourbillons et dont les orbites rentrent en elles-mêmes, sont de même densité que ces tourbillons, et se meuvent selon la même loi que leurs parties, quant à la vitesse et à la

[90] Newton, Isaac, (1642-1727), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687, traduction de feue la Marquise du Chastellet, Paris, 1756, réédition Blanchard, 1966, tome premier, p. 416.

direction. »[91] Ce théorème est suivi d'une scholie qui déclare que les planètes ne peuvent pas être transportées par des tourbillons de matière. Il revient sur la trajectoire des planètes, ellipse dont le soleil est un foyer, et qui doivent respecter la loi des aires. Or il constate qu'avec cette théorie, les parties des tourbillons ne peuvent pas tourner comme la loi le prédit. Il décrit le phénomène sur un exemple :

> *Si AD, BE, CF désignent trois orbes décrits autour du Soleil S, (Fig. 57) dont le cercle le plus extérieur CF est concentrique au Soleil et dont A, B sont les aphélies des deux orbes intérieurs et D, E, leurs périhélies. Alors, le corps qui tourne dans l'orbe CF, en décrivant par le rayon qui le joint au Soleil des aires proportionnelles au temps, déterminées par des rayons allant au Soleil, se mouvra d'un mouvement uniforme. Mais, le corps qui tourne dans l'orbe BE se mouvra plus lentement dans l'aphélie B et plus rapidement dans le périhélie E, selon les lois astronomiques ; alors que, selon les lois mécaniques, la matière du tourbillon doit pourtant se mouvoir plus rapidement dans l'espace étroit compris entre A et C que dans l'espace large compris entre D et F : soit plus rapidement à l'aphélie qu'au périhélie. Or, ces deux thèses sont contradictoires.*[92]

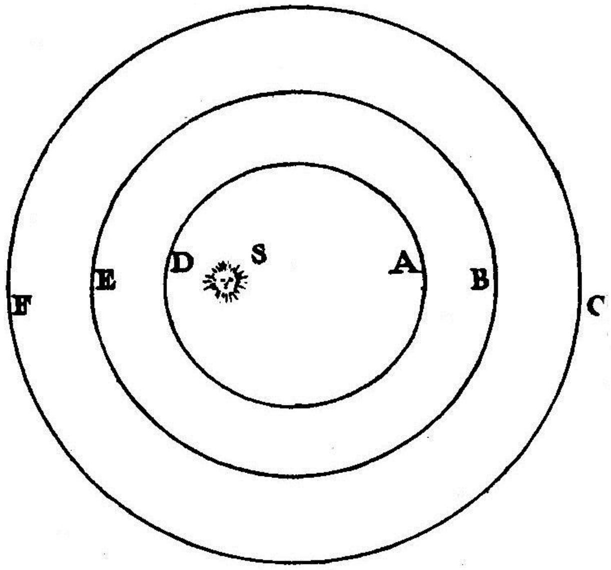


Fig. 57.

Il développe alors l'exemple des planètes Mars et Vénus, pour lesquelles il donne un certain nombre de résultats et de valeurs numériques, et il est conduit à conclure que les tourbillons *répugnent* aux phénomènes astronomiques, et ne permettent pas de les expliquer.

[91] *Ibid* p. 424.

[92] Newton, *De Philosophiae naturalis principia mathematica*, traduction nouvelle, postface et bibliographie établies par Marie-Françoise Biarnais, Christian-Bourgois, 1985, scholie de la propositon LIII.

Dire que les mouvements peuvent s'exécuter sans tourbillons dans des espaces libres revient à considérer qu'on n'a pas besoin du plein pour expliquer les phénomènes de la nature ; le monde de Newton ne s'oppose pas à l'idée d'un espace libre, donc du vide. Le scholie général du Livre III des *Principia mathematica* qui apparaît à partir de la deuxième édition de 1713 fournit une objection supplémentaire ; il signale l'incompatibilité des conséquences des deux lois de Kepler dans un tourbillon : « L'hypothèse des tourbillons est sujette à beaucoup de difficultés. Car afin que chaque planète puisse décrire autour du soleil des aires proportionnelles au temps, il faudrait que les temps périodiques des parties de leur tourbillon fussent en raison doublée de leurs distances au soleil. Afin que les temps périodiques des planètes soient en raison sesquiplée[93] de leurs distances au soleil, il faudrait que les temps périodiques des parties de leurs tourbillons fussent en raison sesquiplée de leurs distances à cet astre. »[94]

Enfin, les comètes sont l'occasion d'une difficulté supplémentaire : « Les comètes ont des mouvements fort réguliers, elles suivent dans leurs révolutions les mêmes lois que les planètes ; et leur cours ne peut s'expliquer par des tourbillons. Car les comètes sont transportées par des mouvements très excentriques dans toutes les parties du ciel, ce qui ne peut s'exécuter si on ne renonce aux tourbillons. »[95] Il est juste d'ajouter que Descartes n'avait pas eu connaissance de son vivant du sens inverse des trajectoires de planètes et de comètes, et qu'il n'avait pas de raison de constater une éventuelle contradiction entre sa théorie et les observations qui pouvaient la contredire.

Les premières observations et mesures militent en faveur des idées du savant anglais. L'expédition en Laponie en 1736 - 1737 d'une mission confiée par l'Académie des sciences à un groupe composé entre autres de Maupertuis, Clairaut et Celsius revient avec des résultats vérifiant l'aplatissement de la terre aux pôles, comme l'avait prévu Newton. Les cartésiens

[93] Signifie selon une puissance 3/2.
[94] *Ibid*. tome deux, p. 174.
[95] *Ibid*. p. 174.

vont devoir organiser une réflexion devant ces résultats, et se remettre en cause. Contrairement aux allégations de Voltaire qui appuie les idées newtoniennes, les cartésiens ne restent pas figés dans leurs certitudes, leurs nombreux travaux viennent le confirmer. Même Voltaire est obligé de reconnaître leur travail, même s'il le fait en se moquant. Il considère dans une lettre de 1739 adressée à Maupertuis qu'il est normal que les physiciens aient cherché à concilier la théorie des tourbillons avec les thèses de Newton et les lois de Kepler, mais il tourne en ridicule leurs efforts par une accumulation de termes et de descriptions techniques qui donnent l'impression de travaux fantaisistes ; il cite pêle-mêle Descartes, Huygens, Perrault, Bufinger, Leibniz, Malebranche, Castel :

> *À la bonne heure que le célèbre Huygens ait tenté de substituer aux tourbillons inadmissibles de Descartes d'autres tourbillons qui ne pressent plus perpendiculairement à l'axe, qui aient des directions en tous sens (chose pourtant assez inconcevable) ; que Perrault ait imaginé un tourbillon du septentrion au midi qui viendrait croiser un tourbillon circulaire d'orient en occident ; que M. Bulfinger hasarde et dise de bonne foi qu'il hasarde quatre tourbillons opposés deux à deux ; que Leibnitz ait été réduit à inventer une circulation harmonique ; que Malebranche ait imaginé de petits tourbillons mous qui composent l'univers qu'il lui a plu de créer ; que le P. Castel soit créateur d'un autre monde rempli de petits tourbillons à roues endentées les unes dans les autres.*[96]

Il insiste sur les travaux de Privat de Molières, que nous reprendrons dans les pages suivantes, en particulier sur sa description de l'univers constitué de grands et de petits tourbillons ; Voltaire écrit ironiquement que Privat « applique à son hypothèse de très belles proportions géométriques avec toute la sagacité possible : ces travaux servent au moins à étendre l'esprit et à donner des vues nouvelles. »[97] Il compare ces travaux à la recherche inutile de la pierre philosophale qui a néanmoins permis de faire progresser les techniques. Il termine en écrivant que Newton avait découvert un or inconnu ; les physiciens ont recherché la semence de cet or, et « il n'y a pas apparence qu'ils la trouvent jamais. »

---

[96] Voltaire, *Œuvres complètes*, Paris, P. Dupont, Libraire-éditeur, 1825, *Physique*, Lettre de M. de Voltaire à M. de Maupertuis sur les éléments de la philosophie de Newton, 1739, p 361.
[97] *Ibid*. p 362.

Les allusions de Voltaire aux travaux des cartésiens montrent qu'il y a réellement une volonté chez eux de répondre aux remarques newtoniennes, et nombre d'entre eux vont s'atteler à la tâche. Parmi toutes les réactions, sans nous préoccuper de la chronologie, nous pouvons en retenir deux qui fournissent les deux principales attitudes constatées. La première, celle de Privat de Molières, consiste à chercher à adapter la théorie des tourbillons aux résultats vérifiés de Newton et de Kepler en satisfaisant à ces résultats de manière approchée ; la deuxième, de Castel, se caractérise par un rejet de la partie mathématisée de l'œuvre de Newton.

Commençons par les travaux de Privat de Molières. Sa première intervention importante dans les *Mémoires* de l'Académie des Sciences est effectuée le 29 mai 1728 et consiste en un exposé très technique de vingt-trois pages s'appuyant sur la géométrie classique et sur les propriétés des forces centrifuges, qui, depuis Huygens, sont bien connues. Mais son approche reste encore "traditionnelle" : il s'agit de montrer que les tourbillons peuvent répondre aux difficultés mises en avant dans les critiques, et en particulier à celle formulée dans la proposition 52 du livre II des *Principia* de Newton que nous avons analysée précédemment.

La première proposition de l'article qui en compte neuf est précédée de dix lemmes ayant pour objectif de présenter les propriétés des forces centrifuges agissant sur des objets qui effectuent des mouvements circulaires. Privat s'en tient à des mathématiques élémentaires ; il illustre ses raisonnements par des exemples numériques qui lui permettent d'inférer ses résultats, comme dans le lemme 8 qui vise à établir une relation de proportionnalité entre la force centrifuge et la distance au centre du mouvement, à vitesse égale : « Si deux corps égaux A, B, décrivent des circonférences de cercle inégales avec une vitesse égale, leurs forces centrifuges F, f, seront réciproquement comme leurs distances D, d, au centre I de leurs mouvements. Ainsi F . f :: d . D. »[98]

La poursuite de sa réflexion selon le même mode de raisonnement le conduit dans le lemme 9 à établir la relation entre la force et la vitesse à même distance, pour enfin combiner les deux résultats précédents dans le lemme 10, qui énonce la formule dans toute sa généralité : « Les forces centrifuges F, f de deux corps A, B, qui circulent à quelque distance D, d que ce soit du centre I, sont entre elles comme les carrés V V, v v, de leurs vitesses V, v, divisées par leurs distances D, d. Ainsi F . f : : $\frac{VV}{D} . \frac{vv}{d}$. »[99]

La démonstration s'effectue en deux étapes. Dans le but d'organiser progressivement son discours, en partant d'un cas simple, Privat considère tout d'abord un tourbillon cylindrique dont l'axe soit égal au diamètre de sa base. Ce choix lui permettra de passer plus facilement au tourbillon sphérique. Dans un tel tourbillon cylindrique rempli de "globules égaux", Privat démontre en utilisant les propriétés des forces centrifuges que les globules d'un même cercle centré sur l'axe du cylindre ont des vitesses égales, et tournent en des temps proportionnels à leur distance à cet axe. Ces globules sont en équilibre, aucun ne se rapproche ni ne s'éloigne de l'axe.

Il poursuit son raisonnement dans un tourbillon sphérique, lieu des contradictions pointées par Newton dans sa proposition 52, qui démontrait que la loi de Kepler exprimant la relation entre distance et temps périodique n'y est pas vérifiée. La démonstration de Newton prouve que la formule de Kepler ne se vérifie pas quand la distance considérée est la distance entre n'importe quel globule du tourbillon sphérique et le centre de la sphère. L'abbé de

[98] Privat de Molières, *Mémoires de l'Académie royale des Sciences*, Paris, 29 mai 1728, p 249.
[99] *Ibid*. p 250.

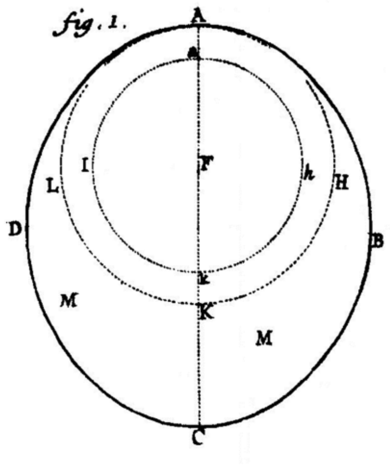
Molières ne peut contester ce fait, mais l'utilisation des résultats obtenus dans le cylindre pour des calculs dans la sphère montre que pour des globules placés dans le plan de l'équateur du tourbillon sphérique, la loi de Kepler est vérifiée, et que plus les globules s'éloignent de ce plan, moins la loi est vérifiée. La validité de la loi exige donc des globules se trouvant à proximité du plan de l'équateur.

Dans l'article présentant ce mémoire, Fontenelle, secrétaire de l'Académie, trouve ce résultat très acceptable pour les planètes du système solaire : « Les planètes du tourbillon solaire ne circulent pas dans un même plan : mais il s'en faut peu, et comme elles sont toutes naturellement portées à l'endroit du plus grand mouvement, qui est l'équateur du tourbillon, elles sont toutes à peu près dans ce même plan, et ne peuvent pas s'éloigner sensiblement de la règle de Kepler. »[100]

Pour montrer toute sa satisfaction et sa volonté de poursuivre le combat, Fontenelle ajoute en conclusion qu'il n'est donc pas nécessaire d'utiliser l'attraction, difficile à concevoir, alors que des forces centrifuges avérées donnent des résultats satisfaisants. Le vide est aussi inutile, puisque les forces centrifuges étudiées ici s'exercent dans le plein. « Le système général de Descartes mérite que non seulement la nation française, mais toute la nation des philosophes, soit disposée favorablement à le conserver. Les principes en sont plus clairs, et portent avec eux plus de lumière. »[101]

[100] Fontenelle, *Sur les mouvements en tourbillon*, Histoire de l'Académie royale des Sciences, Paris, 1728, p. 103.
[101] *Ibid*.

Privat de Molières récidive dès l'année suivante par une nouvelle intervention à l'Académie des Sciences le 25 mai 1729. Le problème auquel il s'attaque concerne la trajectoire elliptique des planètes, tandis que sa démonstration de 1728 s'appuyait sur un tourbillon sphérique et donc des trajectoires circulaires. Dans la présentation simplifiée qu'il propose, et que nous suivrons, Fontenelle reprend l'objection principale des newtoniens. Pour



éclairer ce résumé, nous joignons la *fig. 1* fournie avec le mémoire de Privat (le résumé de Fontenelle n'en fournit pas). La partie nommée "inférieure" par Fontenelle est celle qui est en haut de la fig. 1 de Privat ; on observe en bas de cette figure le vide important entre le cercle et l'ellipse qui est indiqué par Fontenelle dans la "partie supérieure de l'ellipse". Les tourbillons, s'ils existent, sont les fluides d'une figure elliptique, constituée de couches circulant autour d'un des foyers de l'ellipse, avec des vitesses différentes qui sont entre elles, selon Kepler, inversement proportionnelles aux racines carrées de leurs distances aux foyers.

> *Si l'on conçoit un cercle décrit du foyer comme centre, sur un rayon qui soit la distance de ce foyer au sommet de l'ellipse le plus proche, il est certain que tous les globules de chaque couche circulaire circuleront en même temps, mais que ceux d'une couche comparés à ceux d'une autre circuleront avec des vitesses différentes selon la règle de Kepler. Ce cercle supposé, qui touchera l'ellipse par sa partie la plus proche du foyer, ou inférieure, ne peut que laisser beaucoup de vide dans la partie supérieure, où il ne s'étendra point ; et comme les globules de cette partie supérieure sont en beaucoup plus grand nombre que ceux de la partie inférieure, il est impossible qu'ils passent tous en même temps dans cette inférieure, ainsi qu'ils y sont obligés par la circulation, à moins qu'ils n'y passent avec une vitesse plus grande que celle qu'auraient eue les Globules des couches circulaires.*[102]

[102] Fontenelle, *Sur les tourbillons célestes*, Histoire de l'Académie des Sciences, 1729, pp. 87 & 88.

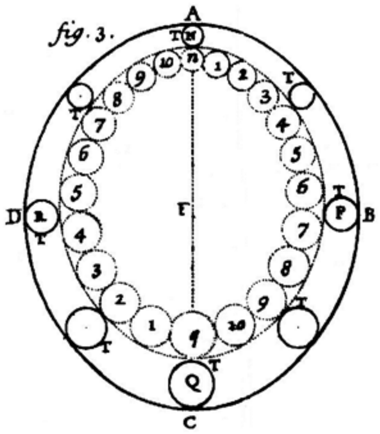
La vitesse dans les couches circulaires suit à peu près, comme nous l’avons vu, la loi de Kepler, mais ce n’est plus le cas dans les couches elliptiques ou la vitesse est plus grande ; on se retrouve donc devant une contradiction inacceptable aussi bien par les cartésiens que par les autres scientifiques.

Comme cela a été souligné plus haut, la plupart des travaux précédents des cartésiens, y compris ceux de Privat jusqu'en 1728, n'ont pas apporté de modification de fond aux idées fournies au début par Descartes. Malebranche fut un de ceux qui se sont écartés de cette règle avec l'idée de ses petits tourbillons qui ont remplacé les globules durs de Descartes pour adapter son discours aux observations expérimentales. L'abbé de Molières dans un nouveau Mémoire de 1729 va à son tour faire évoluer la présentation des tourbillons et prendre en compte ceux du Père Malebranche, son maître, mais en allant encore plus loin que ce que ce dernier avait proposé ; il pense nécessaire d’admettre, à l’image de ce qu’on a fait avec les infiniment petits en mathématiques, une divisibilité dans la matière.

Il avance alors son idée de petits tourbillons de taille de plus en plus réduite, auxquels il attribue des *genres* différents ; ceux du premier genre, correspondant à ceux du Père Malebranche, sont eux-mêmes composés d’autres tourbillons *incomparablement* plus petits, les tourbillons du deuxième genre, dont le rôle est de remplir non seulement les espaces occupés par les premiers, mais aussi les espaces laissés entre ceux-ci.

Cette décomposition peut se poursuivre aussi loin que nécessaire (tourbillons de troisième genre, etc…), ce qui permettra de lever les objections évoquées au début sans faire appel à des figures trop complexes, comme l'avait préconisé Descartes : « De telle sorte que ce ne sera que lorsqu'un problème mécanique que je me serai formé sur l'inspection de quelque phénomène de la Nature, ne pourra être résolu par le moyen des Tourbillons du premier genre et du milieu qu'ils composent, que j'aurai recours aux Tourbillons du second genre, et au milieu qu'ils forment, et ainsi de suite. »[103]

Avec ses nouveaux tourbillons Privat peut répondre aux objections des newtoniens. Les globules de Descartes n'étaient pas susceptibles de dilatation ou de contraction, les petits tourbillons de Malebranche-Privat ont des dimensions variables qui vont leur permettre de



s'adapter à chaque situation. Comme nous l'avons fait précédemment, nous associons la fig. 3 de l'article de Privat au commentaire concis, et dépouillé de tout appareil mathématique, de Fontenelle, en rappelant que ce qu'il nomme la partie inférieure du grand tourbillon se trouve en haut de la figure. Selon Fontenelle, un tourbillon à cause de la force centrifuge tend à s'agrandir, et si deux tourbillons de forces inégales se touchent, le plus fort tend à s'agrandir et le plus faible à diminuer sa taille ; « D'un autre côté il y a plus de force centrifuge dans la partie inférieure du grand Tourbillon Elliptique que dans la supérieure, et cela selon les degrés de la vitesse, toujours proportionnée aux distances du foyer, par rapport auquel se fait la circulation. Si l'on conçoit donc qu'un petit Tourbillon passe de la partie inférieure du grand dans la supérieure, il passe d'un lieu où il y a plus de force centrifuge dans un lieu où il y en a moins, il rencontre toujours d'autres petits Tourbillons qui en ont moins que lui, et par conséquent il s'agrandit à leurs dépens, jusqu'à ce qu'enfin s'étant agrandi autant qu'il est possible, il perde tout ce qu'il avait acquis en repassant de la partie supérieure de l'ellipse dans l'inférieure. »[104]

[103] M. l'Abbé de Molieres, *Problème physico-mathematique, dont la solution tend à servir de Réponse à une des Objections de M. Newton contre la possibilité des tourbillons calesses* (sic), Mémoires de l'Académie des Sciences, 1729, p. 243.
[104] Fontenelle, *Sur les tourbillons célestes*, Histoire de l'Académie des Sciences, 1729, p. 89.

Pour compléter sa démonstration, Privat répond par avance à une difficulté, qui est que *les mouvements contraires se détruisent*, ce qui entraînerait un ralentissement du grand tourbillon ; il s'appuie pour cela sur Varignon qui a montré en 1704, en utilisant le calcul différentiel, qu'un corps qui décrit une courbe ne perd aucune partie finie de sa vitesse, propriété qui s'applique à un grand tourbillon.

Nous trouvons à nouveau la trace d'une intervention de l'abbé de Molières à l'Académie dans les *Mémoires* pour 1731, à travers un article de Fontenelle intitulé *Sur la résistance de l'éther au mouvement des corps*. Le secrétaire perpétuel de l'Académie rappelle une critique de Newton : si un corps sphérique se meut dans un fluide d'une densité égale à la sienne, il ne peut y parcourir trois fois la longueur de son diamètre, sans avoir perdu la moitié de sa vitesse initiale. Pour les cartésiens un volume d'air et un même volume d'or contiennent la même quantité de matière, le calcul de Newton devrait s'appliquer. Chacun sait bien que l'expérience contredit cette prévision, l'idée cartésienne de matière est donc mise en cause. Fontenelle propose alors l'idée de Privat, qui est d'associer à l'éther une absence de résistance sensible au mouvement des planètes, ce qui lève la difficulté.

Le 24 mars 1733, Privat présente à l'Académie un mémoire qui est une synthèse de ses recherches précédentes : *Les lois astronomiques des vitesses des planètes dans leurs orbes, expliquées mécaniquement dans le système du plein*. Il rappelle les deux relations de Kepler, puis la démonstration par Newton de l'incompatibilité de ces deux lois dans un tourbillon : une planète du système solaire qui suit une loi ne peut suivre l'autre. Il annonce qu'il refuse de se soumettre et qu'il « ose espérer, au contraire, de démontrer ici, par tout le calcul de M. Newton, que, bien loin qu'il y ait dans le tourbillon une telle incompatibilité entre ces deux lois, l'une est une suite nécessaire et mécanique de l'autre. »[105] On peut voir dans cette annonce une réponse aux critiques de Maupertuis dont le *Discours sur la figure des astres* a été publié en 1732, et également le cahier des charges de son nouveau projet : il s'agit

[105] M. l'abbé de Molieres, *Les loix astronomiques des vistesses des planetes dans leurs orbes, expliquées méchaniquement dans le Systeme du Plein*, Mémoires de l'Académie des Sciences, 1733, p. 301.

d'inclure les calculs de Newton dans la théorie des tourbillons afin de mettre cette théorie en accord avec les résultats expérimentaux. Le travail a été amorcé depuis 1728, et Privat va le rappeler en traitant successivement deux cas dans son exposé.

Le premier cas concerne un tourbillon sphérique, qui subit donc des contraintes identiques et symétriques de la part des tourbillons qui l'entourent. Il suffit, comme nous l'avons vu, de se limiter à des points se trouvant dans le plan de l'équateur pour que les contradictions soient levées : « Ainsi, comme dans le système de Jupiter, les satellites, selon M. Newton même, décrivent des circonférences de cercles concentriques à cet astre comprises dans le plan de son équateur, et qu'elles ont durant tout leur cours une égale vitesse ; si le système de Jupiter est un Tourbillon également pressé de toute part, et par conséquent sphérique, il n'y aura là aucune incompatibilité nécessaire entre les deux lois de Kepler.[106]

Si un tourbillon sphérique est un peu moins comprimé d'un côté, il va se déformer et prendre une forme presque elliptique, comme le tourbillon solaire ; c'est ce tourbillon elliptique qui est l'objet de l'étude du deuxième cas. Or, nous dit Privat, « J'ai démontré dans le mémoire de 1728, que les forces centrifuges de tous les points d'un tourbillon sphérique sont entre elles en raison inverse des carrés de leurs distances au centre F. Et il est clair que dans un tourbillon elliptique, qui diffèrera peu du sphérique, il s'en faudra peu que ces forces ne soient dans le même rapport. »[107] Privat convient avec tous les scientifiques que les deux lois de Kepler sont compatibles dans le système de Newton, et il ajoute : « S'il y a quelque impossibilité pour l'accord de ces deux lois dans le système des tourbillons, elle ne peut venir que du côté des causes physiques, et non d'une raison purement géométrique. »[108]

[106] *Ibid* p. 303.
[107] *Ibid* p. 309.
[108] *Ibid* p. 305.

Cette dernière remarque est importante, car la méthode mise sur pied par Privat veut unifier les théories de Newton et de Descartes, avec les aménagements qu'il a apportés. La conséquence en est que ce qui est démontré géométriquement par Newton reste valable pour la théorie des tourbillons, il s'estime donc inattaquable sur ces points. Seule peut être discutée l'existence physique des tourbillons, mais elle ne lui semble pas plus contestable que l'attraction, cette force centripète occulte qui ne s'appuie pas sur le mécanisme : « La résistance que les tourbillons environnants apportent à la force centrifuge des points de ce tourbillon-ci, qui croît et décroît en raison inverse du carré de la distance, doit produire en eux les mêmes effets, et être par conséquent substituée à la force centripète dont M. Newton a tiré les mêmes conclusions. »[109]

Privat va terminer son étude par le reproche qu'il fait à Newton d'avoir formulé des lois trop précises, alors qu'un système approché rend bien mieux compte des observations :

> *Il arrivera que si ce n'est qu'à peu-près que les points du Tourbillon aient cette force qui croît et décroît en raison inverse du carré de la distance, les aires que ces points décriront ne seront aussi qu'à peu-près proportionnelles aux temps ; ce qui sera encore plus conforme aux observations astronomiques qui donnent ces à peu-près, et non ces précisions géométriques auxquelles on voudrait réduire le phénomène ; de sorte qu'il n'arrivera de là rien autre chose, sinon que les forces mécaniques du Tourbillon nous fourniront avec plus de précision les lois astronomiques telles qu'elles sont en effet, que ne peuvent faire les forces purement métaphysiques de M. Newton, qui les donnent dans une trop grande précision géométrique.*[110]

C'est là tout ce que souhaitait Fontenelle, qui conclut sa présentation du mémoire de Privat par des mots qui expriment toute sa satisfaction. « M. l'Abbé de Molières conserve donc toute la belle théorie de M. Newton, seulement il la rend en quelque sorte moins newtonienne, en la dégageant de l'attraction, et en la transportant dans le plein. Ce plein où

[109] *Ibid* p. 310.
[110] *Ibid* p. 311.

elle n'est pas née, lui étant rendu, elle n'a plus besoin de l'attraction, et ce n'est pas là un malheur pour elle. »[111]

Privat de Molières reprend dans ses *Leçons de physique* toute sa théorie des tourbillons aménagés, accompagnée de ses commentaires sur sa compatibilité avec la théorie newtonienne, dont l'approximation lui semble un gage de qualité. Les échanges qu'il aura avec Sigorgne le newtonien seront assez durs, et se termineront avec le décès de Privat qui n'aura pas de réel successeur agissant avec sa démarche. Toute autre sera en effet la méthode employée par Castel pour contester les travaux de Newton, à qui il reproche de faire intervenir des mathématiques qui ne s'appliquent pas de manière satisfaisante aux problèmes physiques étudiés..

Le Père jésuite Castel publie en 1743 *Le vrai système de physique générale de M. Isaac Newton, exposé et analysé en parallèle avec celui de Descartes ; à la portée du commun des physiciens*. C'est un ouvrage d'un peu plus de 500 pages dans lequel Castel utilise deux méthodes : la première consiste à rendre assez fidèlement compte du contenu des *Principia mathematica* de Newton, sans déformer les propos du savant anglais, mais sans les alourdir d'un contenu mathématique important, afin de s'adresser, comme le titre l'indique, « au commun des physiciens », et la deuxième consiste à rechercher dans les démonstrations de celui-ci, toutes les ambiguïtés et les difficultés liées aux mathématiques. Nous en présenterons plus loin des exemples, mais la lecture du *Discours Préliminaire* nous éclaire sur les objectifs de l'auteur.

[111] Fontenelle, *Sur la conciliation des deux regles astronomiques de Kepler dans le Sisteme des Tourbillons*, Histoire de l'Académie des Sciences, 1733, p. 95.

Il établit d'abord le constat de réussite de Newton ; depuis vingt ans les physiciens ont beaucoup œuvré, souvent en sa faveur. « On a plutôt fait avec ce redoutable géomètre, de lui rendre les armes, et de se déclarer son très humble disciple. Cela fait honneur, donne un air de géométrie et de profondeur, et n'engage à rien. »[112] Mais il reproche à ses opposants d'avoir baissé les bras et ne pas s'être suffisamment battus.

Lui, Castel, pour pouvoir contester les attractionnistes, s'est imposé la tâche de lire leur maître, et de maîtriser les contenus de sa théorie, donc l'astronomie, la mécanique, et en particulier des mathématiques qu'il emploie.

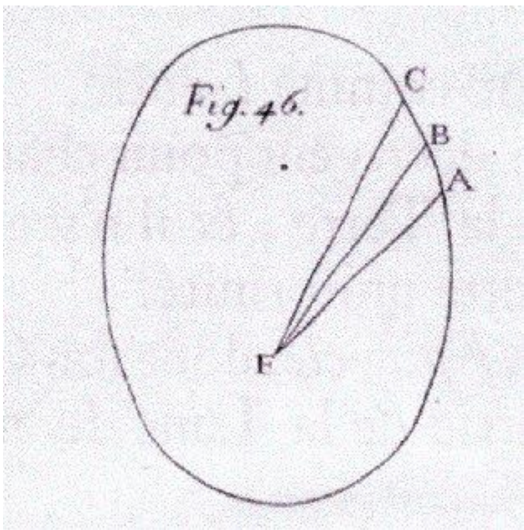
Plus loin il dévoile le fond de sa pensée, au sujet d'une physique simple, proche de la nature et s'appuyant sur les observations. Cette science est donc à la portée du plus grand nombre, chacun est un peu physicien, à condition d'être attentif, et capable d'un raisonnement naturel. Mais, ajoute-t-il, ce n'est précisément pas le cas de celle de Newton : « Sa physique est bien éloignée d'être à la portée des physiciens. Je n'avance rien sans preuve. L'attraction, la gravitation, l'action à distance, dont on compose le fonds du système newtonien, ne sont qu'un jargon, dont Newton proteste en vingt endroits, qu'il n'emploie les termes que pour la commodité du discours, en mathématicien, en géomètre, sans prétendre y attacher aucune vraie expression, aucune vraie idée primitive de physique raisonnée et systématique. »[113] Le dernier reproche concerne les mathématiques utilisées par Newton : difficiles à comprendre car souvent escamotées. Il s'agit bien entendu de s'opposer à l'utilisation d'un calcul basé sur la géométrie de l'infini, en particulier la méthode des premières et dernières raisons : « Ce n'est pas la géométrie que Newton énonce, c'est celle qu'il suppose, qui est difficile à entendre ; soit parce qu'elle est fort élevée, soit parce qu'il la suppose, le plus souvent

[112] Castel, *Le vrai système de physique générale de M. Isaac Newton, exposé et analysé en parallèle avec celui de Descartes ; à la portée du commun des physiciens*, Paris, Simon, 1743, p 3.
[113] *Ibid*. p 6 et 7.

purement, par voie de fait, et sans en articuler un mot, sans avertir qu'il la suppose, sans indiquer sa supposition. »[114]

L'ouvrage de Castel est constitué de quatre-vingt-cinq problèmes, nous nous attachons ici à en montrer l'esprit par quelques traits qui nous semblent caractéristiques. Dans le cinquantième problème consacré à *l'Exposition du système de l'uniformité des Aires célestes* (que nous connaissons aujourd'hui sous l'intitulé de *Loi des aires*), le Père Jésuite rend hommage à Kepler pour ses *subtiles* découvertes astronomiques, mais dénonce sa mauvaise explication physique, liée à des attractions et des vertus occultes. Cette explication physique n'aurait pas dû avoir de pérennité, si Newton ne les avait pas récupérées. Mais là où Kepler avait annoncé cette attraction sous ce nom, Newton a dénaturé la physique képlérienne en la « travestissant » d'un habillage géométrique qui ne change rien au problème de fond.

Castel insiste sur la grande valeur du travail intellectuel de Kepler, et sur les difficultés matérielles qu'il a dû surmonter lors de ses calculs. Il a eu l'intelligence d'imaginer une loi de mouvement des planètes, et à force de difficiles opérations, a pu montrer leur adéquation avec les observations :



Il observa qu'une planète, mue dans une ellipse (Fig. 46) autour du foyer F, allait plus lentement de B en C que de A en B, à mesure qu'elle s'éloignait davantage de son Centre F de mouvement. En conséquence sans doute, il soupçonna que l'aire ou le triangle elliptique CFB plus long que BFA, mais moins large, pouvait lui être égal, les deux arcs CB, BA étant parcourus en temps égaux.

Ce qu'il soupçonna en homme de génie, il le vérifia en habile homme.

[114] *Ibid*. p 8.

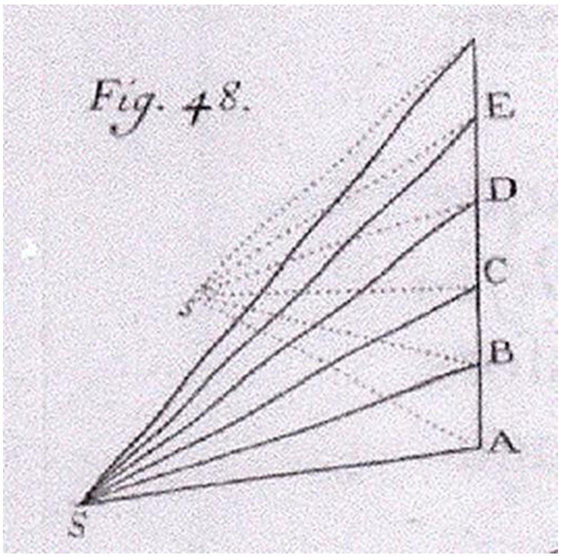
[…]

Quoi qu'il en soit de la manière, Kepler trouva qu'en temps égaux, les aires elliptiques décrites par une planète, étaient égales ou uniformes. La découverte est belle, étant très profonde, et étant de nature à ne pouvoir pas n'être point raisonnée.[115]

D'après l'auteur du *Vrai Système* le travail de Newton est d'un tout autre ordre : après l'astronomie et la physique proposées par Kepler, il a décidé de passer aux mathématiques pour en faire la base et le fonds de son système *physico-géométrique*. Et dans le cinquante et unième problème intitulé *Érection de cette uniformité des aires célestes en système géométrique*, Castel détaille ce qui pour lui est le fondement même des idées newtoniennes, à savoir l'utilisation d'un appareil mathématique sophistiqué : « Voici le chef-d'œuvre et toute la clef du système newtonien. Ce qui n'était qu'une observation, un phénomène chez Kepler, devient une assertion purement géométrique chez Newton. »[116] il ajoute encore dans le cinquante-deuxième problème, *Confusion des centres, par l'uniformité des aires* : « On a beau faire, Newton est toujours bien haut monté, puisque dès le premier pas il faut être si géomètre, et géomètre mécanicien. Newton est un peu comme ceux qui font de tout un secret & un mystère, et jusques au bonjour disent tout à l'oreille. »[117] Cette mathématisation newtonienne nous éloigne de la philosophie naturelle, nous la rend difficile à comprendre, alors qu'elle l'est déjà assez par les secrets de la nature. Il poursuit dans le cinquante-troisième problème, *Si l'uniformité des aires, démontre géométriquement le centre précis d'un mouvement*, pour dénoncer la *duplicité* du savant anglais et montrer que les mathématiques qu'il utilise sont elles-mêmes contestables. Il écrit qu'*à force de démontrer tout*, Newton *ne démontre rien*, et il insiste sur le fait que la physique ne se démontre que par la physique (sous-entendu, pas par les mathématiques).

115 *Ibid*. pp 331 et 332.
116 *Ibid*. p 333.
117 *Ibid*. p 339.

Après toute une série de réfutation de l'utilisation des mathématiques dans la physique, Castel va montrer la vanité de vouloir tout démontrer, ce qui peut conduire à des résultats aisément contestables. Ainsi, dans le cinquante-cinquième problème, *Si l'uniformité des aires est l'indice infaillible d'une force centripète ?* Castel reprend en détail une démonstration ; il la décrit puis argumente pour la contrer. Selon Newton, l'égalité des aires est l'indice certain de l'existence d'un centre et d'une force centripète. Or, dit Castel, cela est faux. « Il y a mille et une infinités de points autour desquels les aires sont essentiellement uniformes, sans que ces points puissent porter le vrai nom de centres. »[118] Il décrit donc le problème qui lui permet de contester les mathématiques de Newton.



On considère une droite ABCDE (Fig. 48), parcourue par un mouvement uniforme. AB, BC, CD, DE sont égaux, donc parcourus en des temps égaux. Un tel mouvement rectiligne n'a rien assurément de centripète.

D'un point quelconque S on trace SA, SB, SC, SD, SE, etc.

Ces lignes forment des aires égales, des triangles égaux SAB, SBC, SCD, etc. Si on raisonne comme Newton, on conclura de cette égalité d'aires que S est un centre de mouvement, objet d'une force centripète. Comme on peut déplacer S n'importe où, on peut conclure que ce mouvement a une infinité de centres.

Castel ajoute : « De sorte qu'à force d'en avoir, il est uniquement vrai de dire qu'il n'en a point du tout, comme en effet il n'en a point. »[119] Il ne conteste pas que Newton utilise cette propriété dans le cas de mouvements courbes, et non pas rectilignes, mais insiste sur le caractère équivoque de ce centre.

---

118 *Ibid*. p 350.
119 *Ibid*. p 352.

Il poursuit ses accusations dans les problèmes suivants, pour attaquer par exemple le calcul infinitésimal : « De l'infini au fini le progrès est facile pour un géomètre. Si les aires infiniment petites sont égales, a dit Newton, les aires finies qui en sont la somme, sont donc égales aussi. »[120]

Par ce travail de sape Castel a voulu se faire le porte-parole de tous les amateurs éclairés qui s'intéressaient à la science, dont faisaient partie de nombreux membres des Académies de province. Ceux-ci, contrairement à Castel, n'avaient souvent pas un bagage mathématique suffisant pour comprendre les travaux des successeurs de Newton, et n'acceptaient pas l'idée que la nature puisse être expliquée autrement qu'avec des mots et des figures de géométrie élémentaire. C'est dire s'ils rejetaient l'utilisation du calcul différentiel et intégral dans la physique, qu'ils ressentaient comme une manière de les écarter de la compréhension du monde. Castel écrit page 369 de son *Vrai système de physique générale* : « Newton croit tout fait en physique, lorsqu'il a représenté la nature, les phénomènes, les observations, par des figures, et par des calculs.» Il va jusqu'à prédire l'anéantissement de la vraie physique. La suite prouvera que Castel avait vu juste en parlant d'anéantissement ; il ne s'agissait pas de celui de la physique mais des physiciens amateurs qui laisseront la place à des professionnels des mathématiques dès la deuxième moitié du 18e siècle.

Un trait caractéristique de ces défenses des cartésiens est leur individualisme, que Voltaire avait souligné dans ses remarques ironiques présentées plus haut. Les attaques des « anti-attraction » se font en ordre dispersé alors que les newtoniens font front contre l' « establishment » cartésien. On a même un personnage important comme Jean Bernoulli qui défend les tourbillons en utilisant le calcul différentiel de Leibniz pour éliminer les contradictions montrées par Newton dans ses *Principia mathematica*. Par opposition les newtoniens font bloc et répètent les mêmes arguments, que ce soit contre le plein, contre les

---

[120] *Ibid*. p 362.

tourbillons, ou les hypothèses de Descartes. Ils insistent également sur la compatibilité de l'idée d'attraction avec les observations.

1.4 Conséquences de la mathématisation de la physique

Comme nous avons pu le constater, la place des mathématiques dans la physique devient prépondérante, principalement après les travaux de Newton et de ses successeurs. Les débats restent vifs, comme nous allons le voir, mais le mouvement est réel, et ses conséquences porteront sur deux plans : sur la méthode d'abord, et les statuts respectifs de l'expérience et de la théorie mathématisée, sur les personnes ensuite. On assiste en effet petit à petit à un rejet des non-mathématiciens des discussions concernant la physique, nous en verrons un exemple dans notre troisième partie à l'issue d'un débat entre Clairaut et Buffon. La communauté scientifique est lentement mais profondément modifiée au 18^{e} siècle. Au 17^{e} siècle ce sont souvent des amateurs qui s'intéressent aux mathématiques et à la physique (comme Fermat ou Pascal), au siècle suivant on voit l'éclosion de professionnels, dont la seule activité est l'étude scientifique, et qui sont rémunérés pour leur travail. On a écrit que n'importe qui peut lire la physique de Descartes ou de Rohault, pas celle de d'Alembert ou de Sigorgne, l'appareil mathématique utilisé par ces derniers en est certainement la cause principale.

Une cause supplémentaire de cet affrontement au sujet de l'introduction des mathématiques dans la physique est la complexité croissante des domaines d'études. D'Alembert en 1747 écrit des *Réflexions sur la cause générale des vents,* il y met en évidence la complexité des situations qui rendent problématique une explication satisfaisante. Quand on veut déterminer, dit-il, la vitesse d'un vent et sa direction en chaque point de la terre, on se rend compte qu'on ne peut l'obtenir que par un calcul exact. Or, pour conduire ces calculs, il faut connaître les principes mis en jeu, la loi suivant laquelle la chaleur agit sur l'air, et la dilatation qu'elle produit dans les parties de l'air. Ces dernières considérations nous montrent qu'on ne peut donc prendre en compte ni l'influence de la chaleur solaire (il n'est pas possible de la calculer précisément), ni l'influence des variations de température dues à l'élévation des nuages. Le seul mouvement qu'on puisse espérer calculer, c'est celui de l'air causé par la seule attraction du soleil et de la lune. C'est à cette tâche que d'Alembert s'est attelé. Mais ce problème une fois résolu, on serait encore bien loin de connaître la circulation des vents dans l'atmosphère. « Une théorie complète sur la matière que nous traitons, est peut-être l'ouvrage de plusieurs siècles ; et la question dont il s'agit, est le premier pas que l'on doive faire pour y parvenir. De nouvelles connaissances nous mettront en état d'en faire de nouveaux. Tâchons donc d'ouvrir, autant qu'il sera en nous, l'entrée d'une route peu frayée jusqu'ici, et que nous ne devons pas espérer de voir si tôt aplanie entièrement. »[121]

Les rejets de cette complexité croissante sont assez fréquents, par exemple le Père Paulian, professeur de physique au Collège d'Avignon, de la Compagnie de Jésus, évoque, dans le tome I du *Traité de paix entre Descartes et Newton,* cette présence des mathématiques dans la physique. Il pense que les philosophes newtoniens n'ont pas lu les livres de Newton, il est même prêt à parier *à cent contre un* qu'ils n'ont même pas pensé à les ouvrir. Paulian déclare ensuite que l'utilisation de l'algèbre (« vos xx, vos a + b dont vous faîtes tant de cas ») aboutit à obscurcir les idées les plus simples et les plus claires.

Pour montrer cette dérive qu'il dénonce, il fait appel à son expérience personnelle et à sa connaissance de la théorie des vents, et use de l'ironie pour se moquer de d'Alembert (qu'il nomme M. d'***) :

> *J'en ai fait l'expérience. Je connais très bien la nature des vents, et sur cette matière je suis sûr d'amuser à merveille mon monde ; je dois ma science à la lecture que j'ai faite des leçons de physique de Privat de Molières et des entretiens de Regnault. Je ne sais par quel malheur je tombai l'autre jour sur le Traité des Vents de M. d'***, dont on assure que vos savants font grand cas. Deux pages que*

[121] D'Alembert, *Réflexions sur la cause générale des vents*, Paris, David, 1747, introduction p VII.

j'en lus, me firent presque oublier tout ce que savais auparavant. Il faut avouer que cet auteur est admirable ; il a formé le dessein de soumettre aux règles immuables de l'algèbre le plus irrégulier de tous les météores.[122]

Nous devons citer un autre opposant aux physico-mathématiciens, célèbre, proche de d'Alembert, avec qui il a partagé la responsabilité de l'édition de l'Encyclopédie (il y a écrit un nombre incalculable d'articles). Il s'agit de Denis Diderot. Il exprime sa position dans les *Pensées sur l'interprétation de la nature* de 1754. Nous pouvons en extraire trois éléments importants avancés par l'auteur. En premier, il faut constater que les calculs mathématiques rigoureux se trouvent pris en défaut quand on les confronte avec les résultats mesurés. Diderot écrit que c'est à la philosophie expérimentale de rectifier les calculs de la géométrie. Mais, ajoute-t-il, plutôt que de corriger les calculs erronés par l'expérience, ne serait-il pas plus simple de se contenter des résultats de cette dernière ? Il rapporte que les chimistes, les physiciens et les naturalistes, qui se livrent à l'art expérimental, disent tous : « À quoi servent toutes ces profondes théories des corps célestes, tous ces énormes calculs de l'astronomie rationnelle, s'ils ne dispensent point Bradley ou Le Monnier d'observer le ciel ? »[123] Sur ce point on retrouve les arguments avancés par Bacon, accompagnés en plus d'une critique de l'utilisation de ce qu'il nomme les mathématiques *transcendantes* (il vise ici le calcul infinitésimal).

La deuxième partie de son argumentation le conduit à pronostiquer la disparition des mathématiciens : « J'oserais presque assurer qu'avant qu'il soit cent ans, on ne comptera pas trois grands géomètres en Europe. »[124] Il va jusqu'à comparer les travaux des grands mathématiciens actuels aux pyramides d'Égypte, car comme nous le faisons avec elles, les hommes regarderont plus tard les ouvrages des grands mathématiciens comme des œuvres « réveillant en nous une idée effrayante de la puissance et des ressources des hommes qui les

[122] Paulian, *Traité de paix entre Descartes et Newton*, Avignon, Girard, 1763, p 28.
[123] Diderot, *Pensées sur l'interprétation de la nature*, Texte établi par J Assézat, Paris, Garnier, 1875-1877, paragraphe 3.
[124] *Ibid* paragraphe 4.

ont élevées. »[125] Cette idée d'extinction du monde mathématique a perduré jusqu'à notre époque puisqu'on peut encore lire régulièrement des commentaires provenant de personnes ignorant la richesse de la recherche en mathématiques, tel que celui-ci : « Les mathématiques sont en train de se dévaluer de manière quasi inéluctable. Désormais, il y a des machines pour faire les calculs.»[126]

Enfin, Diderot évoque le moment de la constitution d'une science nouvelle : un nombre très important de personnes participent alors à sa mise en place, des amateurs comme des professionnels, jusqu'à ce que cette science atteigne sa maturité. Ensuite « il ne reste à la science que des mercenaires à qui elle donne du pain, et que quelques hommes de génie qu'elle continue d'illustrer longtemps encore après que le prestige est dissipé et que les yeux se sont ouverts sur l'inutilité de leurs travaux. On regarde toujours ces travaux comme des tours de force qui font honneur à l'humanité. Voilà l'abrégé historique de la géométrie, et celui de toutes les sciences qui cesseront d'instruire ou de plaire ; je n'en excepte pas même l'histoire de la nature. »[127]

C'est sur cette vision assez négative qu'il termine son intervention sur les interactions entre mathématiques et physique. Il ne propose qu'une solution assez radicale, celle de supprimer l'utilisation des mathématiques, alors que l'idée selon laquelle la science doit être accessible à un large cercle de gens, assez commune au 18e siècle, ne passe pas obligatoirement pour d'autres auteurs par cette suppression, puisque, pour le plus grand nombre, les mathématiques jouent un rôle important. En 1690, alors qu'il essaie d'expliquer la gravitation par des moyens purement mécaniques, Varignon note également que traiter la physique par la géométrie la rend inintelligible, c'est ce qui se passe pour sa théorie mécanique de la gravitation. La seule chose qu'il se propose de faire pour aider le lecteur est

---

[125] *Ibid* paragraphe 4.
[126] Claude Allègre, Interview au journal France-soir, 29-11-99.
[127] Diderot, *Pensées sur l'interprétation de la nature*, Texte établi par J Assézat, Garnier, 1875-1877, paragraphe 5.

de donner un plan général de son traité trop mathématisé, sans le détail de ses démonstrations, et c'est ce qu'il fait dans le *Discours sur la pesanteur* en introduction à ses *Nouvelles conjectures sur la pesanteur*.

Ces derniers commentaires nous amènent à évoquer brièvement les ouvrages de vulgarisation, qui par définition ne doivent contenir aucun bagage mathématique. Deux ouvrages sont particulièrement emblématiques de la période, tous deux à destination des *Dames*, ces dernières ayant pour la plupart à cette époque peu de connaissances scientifiques et mathématiques. Le premier, *Le newtonianisme pour les dames*, d'Algarotti, contient beaucoup de références littéraires et poétiques, il contient une préface dédiée à Fontenelle (« Par vos *Entretiens sur la pluralité des mondes*, vous m'avez donné le modèle ») dans laquelle il s'explique sur la place qu'il accorde dans son livre aux mathématiques : « Les lignes et les figures sont entièrement bannies de cet ouvrage, parce qu'elles lui auraient donné un air trop sérieux et trop savant, qui ferait peur aux personnes qu'on ne peut instruire, si l'on n'a soin de les amuser. »[128]

Cette crainte devant les mathématiques, arides et trop sérieuses, et surtout qui font peur, se retrouve dans le deuxième ouvrage, l'*Astronomie des Dames* de Lalande qui, dès les premières pages, prévient le lecteur qu'il ne contient qu'un tableau général de l'astronomie, et qu'on a évité toute géométrie et tout calcul. Il aurait peut-être fallu essayer de présenter quelques notions mathématiques. Mais « l'appareil en aurait semblé trop effrayant pour le plus grand nombre des personnes à qui notre ouvrage est destiné. »[129]

Il ajoute plus loin qu'il lui importe d'attirer, non d'effrayer, à l'abord des sciences.

---

[128] Algarotti, *Le Newtonianisme pour les dames*, traduit par du Perron de Castera, 2ème édition, Paris, Montalant, 1738, tome 1, préface pp XII et XIII.
[129] Lalande, *Astronomie des dames*, Paris, René, 1841, préface historique, p 1. (1ère édition 1785)

Si on revient maintenant à la physique qui se fait ou à celle qui s'enseigne, on a une présentation de l'évolution de la place des mathématiques dans la physique dans des commentaires de Condorcet publiés dans ses *Essais d'analyse*. Selon lui, avant Descartes, géométrie et algèbre étaient des sciences séparées. Il a su les réunir pour leur faire faire des progrès, « il tenta même avec succès de les appliquer à la connaissance de la nature. Newton le suivit de près, perfectionna l'analyse et la géométrie, inventa les nouveaux calculs ; et, saisissant le vrai principe qui lie le calcul à la mécanique, et la mécanique à l'explication des phénomènes, créa pour ainsi dire une nouvelle science. »[130] Les mathématiques, qui par leur côté abstrait, rebutaient beaucoup de gens, profitèrent de ces travaux et « les applications heureuses de l'analyse, plutôt que des découvertes analytiques » permirent d'obtenir des résultats significatifs.

Cette nuance apportée par Condorcet sur l'intervention de l'analyse en physique l'amène à dire que le mode de fonctionnement consistant à utiliser les applications de l'analyse lui semble à revoir. Il écrit qu'il est plus naturel de développer d'abord l'analyse de manière approfondie, avant de l'utiliser, plutôt que de partir du problème physique et de concevoir un outil mathématique uniquement adapté au problème. Selon lui, c'est ainsi que les découvertes analytiques de Newton en ont précédé l'application, et, écrit-il, « c'est aussi la route que j'ai suivie, en dirigeant d'abord mes efforts vers les difficultés du calcul intégral pris en lui-même, sans songer encore à en faire quelque application. J'ai cherché ensuite à faire quelque application de mes principes …. »[131] Cette remarque de Condorcet, peut-être juste, doit néanmoins attirer un commentaire ; il ne semble pas que Newton ait fonctionné selon ce que préconise Condorcet. Il a effectivement découvert les fluxions bien avant d'avoir rédigé les *Principia mathematica*, mais il ne les a pas utilisées dans cet ouvrage, puisque, comme nous l'avons rappelé, il a conçu exclusivement pour celui-ci une géométrie

[130] Condorcet, *Essais d'analyse*, Paris, Didot, 1768, tome premier, partie 1, préface, pp XXV et XXVI.
[131] *Ibid* p XXVI.

infinitésimale utilisant la cinématique, méthode nouvelle, uniquement destinée à sa mécanique, et qui n'aura pas de postérité dans un autre domaine de la science.

Parmi les diffuseurs de connaissances scientifiques, nous pouvons donner le témoignage de deux auteurs emblématiques du 18e siècle. Le premier, Dominique-François Rivard, philosophe et mathématicien, a été enseignant de nombreuses années, et a publié plusieurs ouvrages pédagogiques. Ses *Éléments de mathématiques* ont été longtemps diffusés avec un nombre important de rééditions. Il a aussi rédigé un abrégé de ces *Éléments*, dans lequel il s'exprime sur notre sujet. Personne ne peut nier, écrit-il, que les mathématiques ne soient nécessaires pour traiter la physique avec exactitude. On peut dire la même chose pour l'astronomie. Elle est, de toutes les sciences, celle qui attire le plus, et nous entraîne à chercher les causes des phénomènes remarquables observés dans le ciel : les éclipses de soleil et de lune, la diversité des saisons, l'inégalité des jours, le mouvement des astres. « C'est l'astronomie qui nous développe les raisons de toutes ces apparences merveilleuses par les principes des mathématiques, et surtout de la géométrie. »[132]

Notre second auteur est Bernard de Fontenelle, célèbre à plus d'un titre, membre de l'Académie française et de l'Académie des sciences, qui a vécu cent ans (de 1657 à 1757), et a donc participé à l'aventure scientifique du 17e et du 18e siècle. Pratiquement quarante ans secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, il a laissé des comptes rendus très documentés et précieux sur les travaux et les découvertes scientifiques de son temps. Ses *Entretiens sur la pluralité des mondes* de 1686, dans lesquels il présente à un lectorat non scientifique la conception du monde de Descartes, lui ont valu un grand succès d'édition. Il a écrit une *Préface sur l'utilité de la Physique et des Mathématiques, et sur les travaux de l'Académie des sciences* dans laquelle nous avons retenu ses commentaires sur le rôle important joué selon lui par les mathématiques dans la recherche scientifique.

---

[132] Rivard, *abrégé des éléments de mathématiques*,7éme édition, Saillant, Paris, 1767, préface p IX.

Dans son plaidoyer en faveur de mathématiques, Fontenelle s'intéresse à l'opposition que beaucoup ont tendance à créer entre des mathématiques « utiles » et des mathématiques « inutiles ». Seraient utiles celles qui ont « un rapport immédiat et sensible aux arts. » Les autres ne seraient que « vaine théorie ». Or, écrit Fontenelle, cette idée est fausse. « L'art de la navigation, par exemple, tient nécessairement à l'astronomie et jamais l'astronomie ne peut être poussée trop loin pour l'intérêt de la navigation. L'astronomie a un besoin indispensable de l'optique à cause des lunettes de longue vue, et l'une et l'autre, ainsi que toutes les parties des mathématiques, sont fondées sur la géométrie, et pour aller jusqu'au bout, sur l'algèbre même. »[133] Il ajoute que des parties de géométrie pure ou d'algèbre, qui ne s'appliquent pas directement à des choses utiles, peuvent conduire à d'autres qui s'y appliquent. Il fournit un exemple : savoir que, dans une parabole, la sous-tangente est double de l'abscisse correspondante, semble sans intérêt ; mais, dans les faits, cette propriété est utile pour démontrer des résultats permettant de mieux régler les instruments utilisés pour tirer les bombes.

Il poursuit son raisonnement en citant des connaissances mathématiques qui n'ont jamais conduit à quelque chose d'utile : on ne sait pas si on ne leur trouvera pas une utilité plus tard. Il cite le cas de la cycloïde, pure spéculation quand elle a été étudiée et qu'on a recherché ses propriétés. Ce n'est que plus tard qu'on a trouvé qu'elle permettait d'améliorer grandement la précision des pendules.

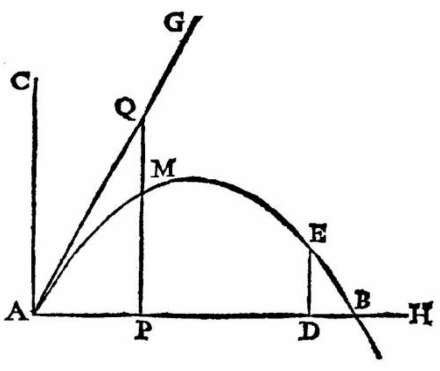
Sa conclusion est qu'il faut amasser les découvertes « au hasard de ce qui en arrivera, ce n'est pas risquer beaucoup. »[134] Les découvertes mathématiques pourront être classées, on aura celles qui sont directement utiles, celles qui attendront avant qu'on leur trouve un usage,

---

[133] Fontenelle, *Préface sur l'utilité de la Physique et des Mathématiques*, in Histoire du renouvellement de l'Académie royale des sciences en 1699, Paris, Boudot, 1708, p 10.
[134] *Ibid* p 16.

celles « qui prises séparément seront stériles et ne cesseront de l'être que quand on s'avisera de les rapprocher. Enfin au pis-aller, il y en aura qui seront éternellement inutiles. »[135]

La majorité des ouvrages de physique publiés au milieu du 18e siècle font une place très importante aux mathématiques dans leur contenu, qui n'a plus rien à voir avec celui du *Traité de physique* de Rohault, par exemple, qui était encore édité et utilisé dans la première moitié de ce siècle. Pour mettre en évidence le niveau atteint par la mathématisation de la physique, on peut étudier un court document extrait des *Mémoires* de l'Académie des Sciences pour l'année 1731. L'auteur en est Pierre de Maupertuis, scientifique réputé, membre de l'Académie française et de l'Académie des sciences, promoteur de l'œuvre de Newton en France, grand expérimentateur (il dirigea l'expédition chargé de mesurer en 1736 un arc de méridien en Laponie), philosophe, mathématicien, physicien, naturaliste et astronome, théoricien du principe de moindre action dont nous reparlerons dans notre troisième partie. Il propose de démontrer en une page tout ce que contiennent de gros traités sur la balistique, d'une manière plus directe et « plus commode pour l'exécution ». Ce texte fait appel à toutes les formes de mathématiques rencontrées dans notre première partie, y compris la différentiation. Beaucoup d'informations sont concentrées en ces quelques lignes, qui sont organisées en cinq paragraphes. Le texte complet est donné dans l'Annexe 1, mais nous allons en détailler les grandes lignes.



Maupertuis utilise dans le paragraphe I une présentation semblable à celle que nous avons vue dans notre chapitre 1.2.4. La vitesse initiale du projectile est définie par la vitesse acquise par une chute libre de C jusqu'en A (à qui on donne par définition la valeur $\sqrt{a}$), le temps est matérialisé par la droite AQ (t = AQ). On note QM = z. La bombe est lancée dans la direction AG,

[135] Ibid pp 16 et 17.

on obtient la relation $t.2z :: \sqrt{a} . \sqrt{z}$, ou $tt = 4az$. Maupertuis souhaite exprimer ce dernier résultat dans le système de coordonnées cartésiennes encore utilisé aujourd'hui. On pose AP = x, PM = y, et tangente de l'angle PAQ = n. La relation obtenue dans ce système de coordonnées est : $(nn + 1)\, xx = 4nax - 4ay$. Les proportions, l'analyse, et la trigonométrie ont été utilisés ici.

Suivent alors quatre paragraphes (II à V) permettant de répondre aux grandes questions de la balistique. Le paragraphe II permet de connaître les conditions nécessaires (inclinaison du canon) pour atteindre un point E donné avec une charge de poudre donnée (celle-ci fournit une valeur donnée de la vitesse initiale à la bombe). On pose AD = b et ED = c. Quand x = b, alors y = c. À l'aide de l'algèbre (résolution d'une équation), on arrive à deux positions possibles du canon données par la tangente de l'angle de tir $n = \frac{2a}{b} \pm \frac{1}{b}\sqrt{(4aa - 4ac - bb)}$, avec une condition nécessaire à respecter pour l'angle de tir (corollaire 1). Deux corollaires suivent, permettant de donner les formules quand E est au-dessus ou au-dessous de l'horizontale.

Le paragraphe III permet de calculer la charge (donc la vitesse initiale à donner à la bombe) nécessaire pour envoyer cette bombe en un point donné E avec une direction donnée. Le paragraphe IV permet de déterminer la direction du plus long trajet possible. Cette valeur devant être un maximum, il suffit de différencier la fonction correspondante, et de rendre la différence obtenue égale à zéro. Le résultat prévisible est que le trajet sera maximum pour une inclinaison de 45°.

Le cinquième et dernier paragraphe nous permet de calculer quelle est la plus petite charge qui puisse atteindre un point E donné. Il est donc nécessaire de calculer la valeur de a.

Une seconde différentiation est réalisée, et après quelques calculs algébriques on obtient $a = \frac{1}{2}c + \frac{1}{2}\sqrt{(bb + cc)}$

L'usage des mathématiques dans la physique, dont nous avons montré la lente évolution vers une généralisation qui sera effective à la fin du 18^{e} siècle, va permettre d'effectuer des prévisions et de fournir des explications, que quelqu'un comme d'Alembert est le premier à reconnaitre, mais en émettant quelques réserves sur lesquelles nous terminerons notre propos. Il écrit dans le *Discours préliminaire* de l'Encyclopédie qu'on constate parfois des abus dans cette application de l'algèbre à la physique. Les hypothèses utilisées sont parfois très éloignées de la réalité de la nature. « On a voulu réduire en calcul jusqu'à l'art de guérir ; et le corps humain, cette machine si compliquée, a été traité par nos médecins algébristes comme le serait la machine la plus simple ou la plus facile à décomposer. »[136] On voit également des auteurs résoudre « d'un trait de plume » des problèmes complexes d'hydraulique, qui demanderaient normalement une vie de travail aux plus grands mathématiciens. Il termine par une profession de foi sur la manière dont les physiciens doivent travailler :

> *Pour nous, plus sages ou plus timides, contentons-nous d'envisager la plupart de ces calculs et de ces suppositions vagues comme des jeux d'esprit auxquels la nature n'est pas obligée de se soumettre ; et concluons que la seule et vraie manière de philosopher en physique consiste ou dans l'application de l'analyse mathématique aux expériences, ou dans l'observation seule, éclairée par l'esprit de méthode, aidée quelquefois par des conjectures lorsqu'elles peuvent fournir des vues, mais sévèrement dégagée de toute hypothèse arbitraire.*[137]

[136] D'Alembert, *Discours préliminaire* de l'Encyclopédie, Paris, Briasson, David, Le Breton, Durand à Paris, 1751, p 57.
[137] *Ibid* p 57.

Partie 2 : Les questions épistémologiques

L'étude proposée dans la première partie a été l'occasion d'observer des débats de fond concernant l'intervention des mathématiques dans la physique, où la métaphysique a une place importante, à partir d'idées avancées pour la plupart au 17^e siècle ou même avant. Dans cette seconde partie nous allons nous pencher sur la structuration de cette nouvelle science qu'est la physique, dorénavant mathématisée comme nous l'avons montré ; cette structuration ne se fait pas en un jour, le 18^e siècle est parcouru de débats la plupart du temps mouvementés, les nombreux écrits publiés en témoignent.

En effet, afin de mettre en place un système cohérent explicatif de la nature, il faut se doter d'une méthode fiable, qui permette à la fois de ne pas s'égarer dans des impasses et de s'appuyer sur des concepts reconnus par tous. Nous verrons que des avancées notoires ont eu lieu, mais aussi que certains débats initiés à cette période ne se sont pas éteints avec le siècle. On perçoit de plus en plus la nécessité que cette méthode devra s'appuyer sur des notions précises, et utiliser des mots compris par tous.

2.1. Les concepts et leur utilisation

2.1.1 Les définitions

Les ouvrages de physique et d'astronomie nous permettent particulièrement de constater cette volonté quasi unanime de recherche d'une précision de plus en plus grande dans l'expression. Condillac dans son *Traité des Systèmes* exprime bien cette volonté : « Voulez-vous apprendre les sciences avec facilité ? Commencez par apprendre votre langue. »[138]

Définir les mots de la physique est une préoccupation, utiliser un langage approprié devient prioritaire, et surtout permet d'éviter bien des erreurs, comme le souligne Pemberton dans son ouvrage sur Newton. Il présente dans l'introduction de son manuel les principes énoncés par Francis Bacon dans son *Novum Organum*, dont les aphorismes 59 et 60 concernent notre propos : « Une troisième source de notions fausses, […] est la coutume d'employer des termes vagues dans le discours ordinaire, ce qui a produit une infinité de disputes de mots dans les discussions philosophiques. »[139]

---

[138] Condillac, *Œuvres complètes*, tome II, *Traité des systèmes*, Houel Paris, Levrault Strasbourg, 1798, p 406.
[139] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Introduction page 10.

Pour exemple de terme dont le sens n'est pas le même pour tous, Pemberton choisit le mot *attraction*, à l'origine de nombreuses disputes et sur lequel nous reviendrons. Il fait également référence à Locke qui dans l'*Entendement Humain* met en garde sur les mêmes thèmes. En effet dans cet ouvrage on peut relever que Locke souligne que l'imperfection des mots provient de l'ambiguïté de leur signification. L'objet de notre vigilance devra donc concerner les mots utilisés en physique, et particulièrement ceux des grandeurs qui sont décrites dans le *dictionnaire raisonné de physique* de Brisson à l'article *Mathématiques*. Selon ce dictionnaire les mathématiques ont pour objet les rapports de grandeurs. On entend par grandeur « tout ce qui est susceptible du plus et du moins, c'est-à-dire tout ce qui peut être augmenté ou diminué »[140]. Tout ce qui contient des parties est une grandeur. La liste des grandeurs comporte les longueurs, les surfaces, les volumes, mais aussi le « mouvement » (on reviendra plus loin sur ce que ce terme peut plus précisément signifier), la vitesse, le temps, le poids, etc…

Dans le cas de l'étude du mouvement on aura à considérer six « choses » d'après d'Antoni, ce sont « l'espace parcouru, la direction, le temps, la vitesse, les causes qui produisent ou altèrent le mouvement, et la force du corps en mouvement. Ce sont ces six choses, qui forment tout l'objet de la dynamique. »[141]

Parmi les termes cités nous nous intéresserons d'abord à la vitesse. C'est peu de dire qu'on a longtemps rencontré des difficultés à définir et à calculer une grandeur qui paraît simple de prime abord, et dont chacun croit avoir une idée précise. Avant le dix-huitième siècle la vitesse n'est pas définie mais elle intervient dans les calculs. Comme nous l'avons vu dans notre première partie, Galilée utilise la vitesse dans ses relations cinématiques ; lors du

[140] Brisson, *Dictionnaire raisonné de physique*, seconde édition, tome 6, Paris, Librairie économique, an VIII.
[141] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin*, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777. P229.

mouvement rectiligne uniforme, celle-ci intervient dans des relations où on l'exprime comme proportionnelle à l'espace parcouru et inversement proportionnelle au temps du parcours.

Dans le mouvement uniforme Galilée assimile la vitesse à une grandeur intensive. Il utilise indifféremment moment ou degré de vitesse. « L'intensification de la vitesse est proportionnelle à l'extension du temps. […] Un mouvement est également ou uniformément accéléré quand, partant du repos, il reçoit en des temps égaux des moments égaux de vitesse. »[142]

Un peu plus tard, pour expliquer la force centrifuge, Huygens utilise la vitesse dans ses calculs : « Prop 2. Lorsque des mobiles égaux tournent dans les mêmes ou d'égales circonférences ou roues avec des vitesses différentes mais l'une et l'autre d'un mouvement uniforme, la force centrifuge du plus rapide sera à celle du plus lent dans un rapport égal à celui du carré des vitesses. »[143]

Dans ses *Principia mathematica* de 1687 Newton ne donne pas non plus de définition de la vitesse, mais celle-ci fait son apparition dans la définition de la quantité de mouvement, donnée égale au produit de m par v (deuxième définition du livre I).

[142] Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, première édition 1638, traduction Maurice Clavelin, PUF, Paris, 1995, p 131.

[143] Huygens, *œuvres complètes*, La Haye, Martinus Nijhoff, 1895, volume 16, p 268

Nous nous trouvons donc en cette fin du 17e siècle devant cette difficulté, une vitesse fréquemment utilisée dans les travaux des savants, mais dont la définition n'est pas vraiment précisée. Il faut attendre le 18e siècle et une avancée dans les études mathématiques sur les grandeurs, comme nous l'avons montré dans le paragraphe 1.2.3, pour qu'on accepte enfin, avec beaucoup de précautions et de justifications au début, de calculer le rapport de grandeurs de natures différentes, et de définir la vitesse à partir de l'espace et du temps, ce qui constitue un raccourci acceptable pour d'Alembert dans l'*Encyclopédie* qui écrit que la vitesse « est le rapport de l'espace qu'il parcourt, et du temps dans lequel il se meut. »

D'Alembert revient aussi dans le même article *vitesse* sur les réticences à diviser des grandeurs de natures différentes ; nous l'avions déjà signalé dans notre première partie, comme une suite de l'usage des proportions dans les calculs ; soit s l'espace, t le temps, s/t la vitesse lors d'un mouvement uniforme. La critique possible concerne la division de deux quantités hétérogènes, l'espace et le temps, ce qui entraîne pour le lecteur une idée peu claire de s/t ; « à cela il faut répondre que cette expression de la vitesse ne signifie autre chose, sinon que les vitesses de deux corps sont toujours entre elles comme les quotients des espaces divisés par les temps, pourvu que l'on représente les espaces et les temps par des nombres abstraits qui aient entre eux le même rapport que ces espaces et que ces temps. »[144]

Notre auteur présente la même idée dans le *Traité de dynamique*, en soulignant que la formule utilisée consiste en une abréviation d'écriture, tout à fait acceptable. Il écrit que lors d'un mouvement uniforme, la vitesse est comme l'espace divisé par le temps. La vitesse est une notion relative, on doit donc la comparer à la vitesse d'un autre corps : « Ainsi cette manière de parler si commune chez les mécaniciens, que la vitesse est égale à la distance divisée par le temps, n'est qu'une expression abrégée pour dire que les vitesses de deux corps

[144] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article *vitesse*.

qui se meuvent uniformément, sont entre elles comme les espaces que ces corps parcourent, divisés par les temps qu'ils emploient à les parcourir. »[145]

Ce texte de d'Alembert oppose une vitesse absolue et une vitesse relative, ce qui laisse entendre qu'une classification de plusieurs types de vitesses existe, le dictionnaire de Brisson déjà cité en est le reflet. Il énonce six types différents de vitesses, qu'on peut regrouper en deux familles, l'une liée à leur variation (accélérée, retardée et uniforme), l'autre liée à la relation entre des mobiles (absolue, relative, respective). Selon Brisson, la vitesse est la propriété qu'a un mobile de parcourir un certain espace en un certain temps. Plus l'espace est grand, et le temps court, et plus la vitesse est importante. Ces commentaires lui permettent de conclure que la vitesse est le rapport entre l'espace et le temps.

Cette distinction entre vitesses absolue, respective et relative est explicitée dans la suite du même article vitesse. La vitesse absolue est celle d'un corps considéré sans rapport avec la vitesse d'un autre corps. La vitesse relative est celle d'un corps comparée à celle d'un autre corps. Quant à la vitesse respective, elle est la vitesse « avec laquelle l'espace qui sépare deux corps est parcouru, ou par l'un des deux entièrement, ou en partie par l'un et en partie par l'autre ; c'est-à-dire soit que l'un des deux corps reste au repos, tandis que l'autre parcourt l'espace entier ; soit qu'ils se meuvent tous deux, dans le même sens ou en sens contraires, avec une vitesse égale ou inégale. »[146]

Les propos de Brisson sont accompagnés d'un exemple numérique :

[145] d'Alembert, *Traité de dynamique*, Paris, David, nouvelle édition, 1758, p 16.
[146] Brisson, *Dictionnaire raisonné de physique,* seconde édition, tome 6, Paris, Librairie économique, an VIII.

De sorte que si deux corps A et B distants de 4 m, se joignent en une seconde, la vitesse respective de ces deux corps est toujours la même, soit que A seul parcoure l'espace entier, soit que B venant à lui, il le rencontre, par exemple au troisième mètre ; soit que, B allant dans le même sens que A, B parcoure, par exemple, 3 mètres pendant que A en parcourt 7, etc., pourvu que, dans tous les cas, les deux corps se joignent en une seconde exactement. La vitesse respective est donc de 4 mètres par seconde.[147]

Les termes de relatif ou respectif nous renvoient également à la conception cartésienne du mouvement, et Gamaches évoque cette relativité du mouvement en faisant référence à Descartes : le mouvement est « l'éloignement d'un corps du voisinage de ceux qui le touchent immédiatement, et qu'on regarde comme en repos. »[148]

Dans l'*Encyclopédie* qui est un ouvrage « grand public », et où d'Alembert propose des contenus beaucoup moins mathématisés que dans son *Traité de dynamique*, il reprend avec quelques nuances les termes de vitesse absolue, relative et respective (ces deux derniers termes étant pour lui interchangeables, alors que Brisson les distingue dans son *Dictionnaire*) ; la vitesse absolue reste le rapport de l'espace parcouru et du temps de parcours ; relevons ce que dit d'Alembert dans l'Encyclopédie pour la vitesse respective :

La vitesse avec laquelle deux corps s'éloignent ou s'approchent l'un de l'autre, est leur vitesse relative, ou respective, soit que chacun de ces corps soit en mouvement, soit qu'il n'y en ait qu'un seul. Quoiqu'un corps soit en repos, on peut le regarder comme ayant une vitesse relative par rapport à un autre corps supposé en mouvement ; si deux corps, en une seconde, se trouvent plus proches qu'ils n'étaient de deux pieds, leur vitesse respective sera double de celle qu'auraient deux corps qui n'auraient fait dans le même temps qu'un pied l'un vers l'autre, le mouvement étant supposé uniforme.[149]

---

[147] Brisson, *Dictionnaire raisonné de physique*, seconde édition, tome 6, Paris, Librairie économique, an VIII.
[148] De Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740. P 25.
[149] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article vitesse.

Ces définitions lui permettent de conclure que si la vitesse absolue est une grandeur positive, la vitesse respective représente « une comparaison que l'esprit fait de deux corps selon qu'ils s'approchent ou s'éloignent plus l'un de l'autre. »

La question absolu-relatif se retrouvera dans la troisième partie dans laquelle nous traiterons de l'espace. Pour la classification des mouvements en uniforme, retardé et accéléré, l'Encyclopédie propose des définitions comparant les relations entre les accroissements de vitesses et les temps, mais sans citer ce qui pour nous est la grandeur accélération : « Mouvement accéléré ; c'est celui qui reçoit continuellement de nouveaux accroissements de vitesse ; il est dit uniformément accéléré quand ces accroissements de vitesses sont égaux en temps égaux. Mouvement retardé ; c'est celui dont la vitesse diminue continuellement ; il est dit uniformément retardé, lorsque la vitesse décroît proportionnellement aux temps. »[150]

L'objectif de clarté et de précision semble donc atteint, au moins pour les mouvements uniformes, puisque pour les mouvements accélérés ou retardés nous n'avons présenté qu'une relation concernant les accroissements de vitesse, pratiquement comme ce qu'avait trouvé Galilée. La difficulté de définir la vitesse dans le cas d'un mouvement non rectiligne uniforme a pourtant été levée en quelques années juste avant et juste après 1700 à l'aide du calcul différentiel par Varignon, nous le montrerons dans le paragraphe 2.1.3, mais ce travail n'apparaîtra dans la plupart des manuels qu'à partir de la deuxième moitié du 18e siècle.

Ce premier exemple concernant la vitesse a mis en évidence le travail fourni en ce début de 18e siècle, mais d'autres grandeurs physiques vont voir subsister une certaine

[150] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article *mouvement*.

imprécision. C'est le cas de ce que Newton a nommé quantité de mouvement. Pemberton nous rappelle la distinction entre vitesse et mouvement (ou quantité de mouvement) : « Quand il s'agit de corps en mouvement, il faut distinguer soigneusement ces deux choses l'une de l'autre : leur vitesse, qui est mesurée par l'espace qu'ils parcourent durant une certaine portion de temps déterminée, et la quantité de leur mouvement, ou la force avec laquelle ils heurtent contre un obstacle. Cette force […] est en raison composée de la quantité de matière dans le corps, et de la vitesse. »[151]

Par *raison composée* Pemberton signifie que la quantité de mouvement est le produit de la masse (quantité de matière) et de la vitesse. Nous relevons dans cette définition précise le terme de force associé à la quantité de mouvement, et dans un complément à sa définition, Pemberton cite un deuxième mot non défini, il s'agit de la puissance (ces deux dernières remarques seront développées plus loin dans ce paragraphe) : « C'est là le sens particulier que les philosophes attachent au mot de mouvement, et dans ce sens la même puissance engendre toujours la même quantité de mouvement. »[152]

Les mots puissance, force, mouvement apparaissent donc ensemble dans le texte de Pemberton. Dans l'*Encyclopédie* la définition est plus précise, même si une ambiguïté subsiste dans le lien entre l'utilisation des mots quantité de mouvement et force motrice. Il caractérise la quantité de mouvement dans un instant infiniment petit comme proportionnelle à la masse et à la vitesse.

> *Le mouvement imprimé à un corps quelconque, peut être conçu divisé en autant de parties que ce corps contient de parties de matière propre, et la force motrice appartient à chacune de ces parties, qui participent également au mouvement de ce corps en raison directe de leur grandeur. Ainsi le*

[151] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Liv I chap I p 54.
[152] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Liv I ch I p 55.

mouvement du tout est le résultat de toutes les parties, et par conséquent le mouvement est double dans un corps dont la masse est double de celle d'un autre, lorsque ces corps se meuvent avec la même vitesse.[153]

Excepté pour les petites divergences relevées, les termes de vitesse et de quantité de mouvement ne font plus vraiment débat au milieu du 18e siècle, ce qui est loin d'être le cas pour la troisième grandeur que nous souhaitons présenter, la force. Il ne s'agit pas d'un problème à son sujet, mais de plusieurs, la définition tout d'abord, mais ensuite les types de forces existantes, et enfin le statut de cette grandeur physique qui pour certains savants s'avère plus une gêne qu'un avantage pour expliquer les phénomènes.

La notion de force est utilisée depuis très longtemps, mais avec des sens divers et différents du sens actuel. Nous pouvons retenir particulièrement celui-ci : lors de la mise en mouvement d'un objet, la cause efficiente de ce mouvement lui imprime ce que Buridan (14e siècle) appelle *impetus*, qu'on peut assimiler à une énergie, une quantité de mouvement ou une force (ces concepts n'ayant alors bien entendu pas d'existence), cet *impetus* devant subsister au moins quelque temps dans l'objet même quand la cause n'agit plus.

Léonard de Vinci à la fin du 15e siècle montre une réflexion sur le sujet à travers deux définitions significatives de l'approche des sciences à son époque ; selon lui, c'est « une vertu spirituelle, une puissance invisible, qui sous l'accident d'une violence extérieure est causée par le mouvement, et placée et infuse dans les corps qui sont, par leur nature, en repos : elle leur donne une vie active d'une merveilleuse puissance. »[154] Il ajoute un peu plus loin que

[153] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article mouvement.
[154] Léonard de Vinci, *Textes choisis,* traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, 169 p 91.

c’est une « puissance spirituelle, incorporelle, invisible » qui est causée par une « violence accidentelle »[155].

On reçoit aujourd’hui ces deux définitions avec un sentiment partagé. Dans un premier temps le langage utilisé (*vertu spirituelle, puissance invisible*) renvoie à ce qui sera critiqué deux siècles plus tard comme relevant des causes occultes des Aristotéliciens. Nous rappellerons ici qu’Aristote parlait du principe (en tant que cause efficiente) du mouvement (ou du changement) qu’il nommait puissance. Pour quelqu’un comme Léonard, la force agit sur les objets comme l’âme agit sur le corps, elle donne du mouvement à l’objet inanimé. Mais une seconde lecture nous permet d’y voir une relation entre une action (appelée *vertu* ou *puissance*) et la mise en mouvement des objets, la relation étant associée à une durée.

Notons pour le moment l’utilisation de plusieurs termes pour signifier une force, on en rencontrera beaucoup au cours des siècles, en latin d’abord avec *impetus*, *vis*, *potentia*, *momentus*, et en français avec *vertu*, *puissance*, comme les utilise Léonard, et aussi *action*, *effort*, *pression*.

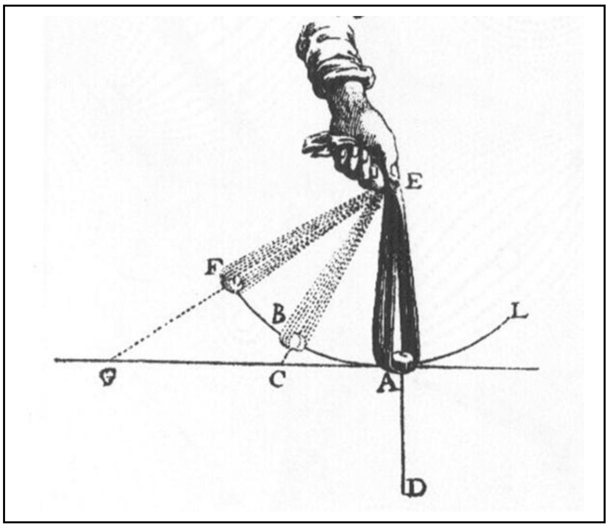
L’arrivée de Descartes au 17e siècle dans cette réflexion va beaucoup faire avancer la connaissance sur ce domaine. S’appuyant sur le mécanisme, il ne peut concevoir d’action que par contact, et va proposer la décomposition du mouvement circulaire en deux mouvements, un mouvement rectiligne suivant la tangente au cercle (mouvement inertiel), et un mouvement suivant la perpendiculaire issue du point de tangence (force centrifuge, qui ne prendra ce nom que plus tard avec Huygens). Le mouvement circulaire n’est donc plus, comme il l’était encore avec Copernic et Galilée, un mouvement naturel. Le mouvement naturel pour Descartes, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, est le mouvement rectiligne uniforme.

---

155 *Ibid*.

Dans *le Monde* ou *Traité de la Lumière,* la décomposition en deux mouvements est présentée de manière très simple, à l'aide de l'exemple de la pierre dans la fronde : « … Quand on fait tourner une pierre dans une fronde, non seulement elle va tout droit aussitôt qu'elle en est sortie ; mais de plus, pendant tout le temps qu'elle y est, elle presse le milieu de la fronde, et fait tendre la corde. »[156]

Il reprend de manière plus détaillée cet exemple dans les *Principes de philosophie*, allant jusqu'à faire percevoir la force par ses effets :



Lorsque la pierre A tourne dans la fronde EA suivant le cercle ABF, en l'instant qu'elle est au point A, elle est déterminée à se mouvoir vers quelque côté, à savoir vers C, suivant la ligne droite AC, si on suppose que c'est celle-là qui touche le cercle. Mais on ne saurait feindre qu'elle soit déterminée à se mouvoir circulairement, parce qu'encore qu'elle soit venue d'L vers A.

[…] Tout corps qui est mû en rond, tend sans cesse à s'éloigner du cercle qu'il décrit. Et nous le pouvons même sentir de la main, pendant que nous faisons tourner cette pierre dans cette fronde ; car elle tire et fait tendre la corde pour s'éloigner directement de notre main.[157]

[156] Descartes, *Le Monde ou traité de la lumière*, Œuvres publiées par Adam et Tannery, XI, Paris, Vrin, 1996, p 44.

[157] Descartes, *Principes de la philosophie*, Œuvres publiées par Adam et Tannery, IX 2, Paris, Vrin, 1989, deuxième partie, p 86.

Descartes utilise le mot force dans le paragraphe 43 de la seconde partie des *Principes de philosophie*. Le titre de ce paragraphe est : *En quoi consiste la force de chaque corps pour agir ou pour résister*. Les critères d'évaluation de la quantité de la force mise en jeu qu'il énonce sont multiples, il écrit que cette quantité dépend de la grandeur du corps, de la superficie selon laquelle ce corps est séparé d'un autre, et de la vitesse du mouvement, ce qui semble plus proche de la description d'une énergie ou d'une quantité de mouvement que d'une force au sens moderne.

Dans la troisième partie des *Principes de la philosophie,* Descartes revient sur la mise en mouvement d'un corps. Tout d'abord, ce qui nous renvoie à la lecture des définitions de la force par Léonard, il se défend de donner un pouvoir particulier aux objets inanimés. Il n'entend pas attribuer une pensée à ces objets, ils possèdent simplement une disposition à se mouvoir. Ce travail ne reste pas purement qualitatif, puisque Descartes présente ensuite une indication plus précise de l'évaluation de cette force à partir de ses effets : « Nous voyons aussi que la pierre qui est dans une fronde, fait tendre la corde d'autant plus fort qu'on la fait tourner plus vite ; et parce que ce qui fait tendre cette corde, n'est autre chose que la force dont la pierre fait effort pour s'éloigner du centre autour duquel elle est mue, nous pouvons connaître par cette tension quelle est la quantité de cet effort. »[158]

Pour Descartes les mêmes lois s'appliquent sur terre et dans le monde supralunaire. Les explications fournies pour la pierre dans la fronde sont, et c'est un pas très grand qui est ici franchi, reprises dans le cas des astres, comètes ou planètes, se déplaçant en rond dans leur tourbillon. Dans tous les cas, la force mise en œuvre agit d'un corps sur un autre pour modifier son déplacement rectiligne naturel, ce qui entraîne un mouvement courbe. Il ne faut pas attendre longtemps pour voir avec Huygens l'étude complète de la force qu'il va appeler centrifuge et dont il va déterminer les propriétés mathématiques en exprimant cette fois quantitativement la force centrifuge dans *De vi centrifuga*, tout d'abord par la propriété II déjà

[158] Descartes, *Principes de la philosophie*, Œuvres publiées par Adam et Tannery, IX 2, Paris, Vrin, 1989, paragraphe 56, p 133.

rencontrée : « Lorsque des mobiles égaux tournent dans les mêmes ou d'égales circonférences ou roues avec des vitesses différentes mais l'un et l'autre d'un mouvement uniforme, la force centrifuge du plus rapide sera à celle du plus lent dans un rapport égal à celui des carrés des vitesses. »[159], puis par la propriété III : « Lorsque deux mobiles égaux se meuvent avec la même vitesse suivant des circonférences inégales, leurs forces centrifuges seront inversement proportionnelles aux diamètres. »[160]

Vers 1670 dans le *De gravitatione* Newton donne comme définition de la force « le principe causal du mouvement et du repos. »[161] Nous assistons ensuite à une importante innovation dans les *Principia mathematica* de Newton ; il définit une première force, la force d'inertie (*vis insita*) que nous étudierons dans le paragraphe suivant, consacré à l'inertie, puis la force qu'il appelle imprimée, dans la définition IV : « La force imprimée (*vis impressa*) est l'action par laquelle l'état du corps est changé, soit que cet état soit le repos, ou le mouvement uniforme en ligne droite. Cette force consiste uniquement dans l'action et elle ne subsiste plus dans le corps dès que l'action vient à cesser. »[162]

Il ajoute que cette dernière force peut avoir plusieurs origines, un choc, une pression ou une action d'un centre, qu'il appelle force centripète. Cette dernière idée est une réponse aux cartésiens et à Huygens proposant une force centrifuge qui reste une action par contact. Pour le savant anglais, la force centripète peut être une action à distance. Newton présente alors sa théorie des forces centrales, avec toutes les précautions nécessaires selon lui pour éviter les reproches qu'il pressent concernant le statut occulte qu'on ne manquera pas d'accorder à ces forces issues d'un centre.

[159] Huygens, *œuvres complètes*, La Haye, Martinus Nijhoff, tome XVI, p 268.
[160] Huygens, *œuvres complètes*, La Haye, Martinus Nijhoff, tome XVI, p 271.
[161] Newton, *De la gravitation* suivi du mouvement des corps, Paris, Tel, Gallimard, 1995, p 142.
[162] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduit en français par la marquise Du Châtelet, Paris, Desaint et Saillant, 1759, tome premier, p 2.

L’opposition à Newton, décrite dans notre première partie, persiste longtemps au 18e siècle. Un ouvrage de Forbin consacré aux forces centrales paru en 1774 ne rejette pas a priori leur existence mais refuse la possibilité de leur variation en fonction de la distance. Il annonce qu’en examinant avec attention et impartialité les idées de Newton sur les forces centrales, on constate que ce sont celles d’*un très mauvais philosophe mises en œuvre par un grand géomètre*.

> *C’est à quoi M. Newton, un peu approfondi, sera toujours réduit. Les idées de cet homme célèbre sur les forces centrales, sont qu’un même centre exerce différents degrés d’action, tantôt sur un même corps, tantôt sur différents corps, suivant leurs différents degrés de proximité de ce centre. Quand le corps est plus près du centre, l’action du corps sur le centre augmente ; quand il est plus loin, cette action diminue, en sorte que ce centre déploie tantôt plus, tantôt moins d’action sur le corps en temps égal.*[163]

Or cette idée est métaphysiquement et philosophiquement fausse. Elle ne peut donc pas être géométriquement vraie.

> *Mais comme il n’est pas possible de concevoir dans une force, la propriété d’accroître, de soi, sa propre action, et de se rendre plus grande qu’elle n’était ; ou de lui supposer la faculté de retenir par devers elle une partie de cette même action pour en transmettre, en temps égal, tantôt plus, tantôt moins au corps auquel elle serait appliquée, et que de telles propriétés ne peuvent jamais être attribuées à aucune force de l’espèce de celles dont il s’agit ici. Il s’ensuit que ces forces de M. Newton, dont l’action sur un même corps varierait en temps égal, en raison de quelque fonction de la distance de ces corps au centre de tendance, ne peuvent être que fausses et absurdes, quoique la loi d’une tendance au centre, en raison de cette même fonction de la distance, pût être vraie.*[164]

[163] Forbin (Gaspard de), *Éléments des forces centrales*, Paris, Desaint, 1774, p 22 et 23.
[164] Forbin (Gaspard de), *Éléments des forces centrales*, Paris, Desaint, 1774, p 30.

Les imprécisions de vocabulaire relevées dans la fin du 17e siècle vont s'amenuiser dans le siècle suivant, comme nous le montre une définition d'un ouvrage largement diffusé d'Ozanam : « La *puissance* est tout ce qui peut mouvoir un corps pesant, et c'est à cause de cela qu'on l'appelle aussi *force mouvante*. Ainsi la pesanteur ou le poids est une puissance par rapport au corps pesant qu'elle peut mouvoir, et cette puissance s'appelle *puissance inanimée*, à la différence de celle qui est *animée*, comme la puissance d'un animal. »[165]

Il ne faut pas trop s'attacher au mot *puissance*, relevé dans ce cours d'Ozanam, qui est toujours utilisé comme synonyme de *force* dans la dernière partie du 18e siècle, comme on le lit dans les *Institutions physico-mathématiques* d'Antoni : « On nomme puissance ou force les causes étrangères au corps, capables de produire, d'altérer ou de détruire le mouvement ; on les dit mouvantes, quand elles produisent le mouvement, ou tendent à le produire, et on les nomme forces résistantes ou retardatrices, ou simplement résistances, quand elles diminuent ou détruisent tout à fait le mouvement. »[166]. On retrouve également l'utilisation du mot *puissance* chez Pemberton.

Une volonté d'unification et de catégorisation se fait donc jour au milieu du 18e siècle, comme en témoignent par exemple les définitions des différents types de forces proposées par Dufieu ; la force centrale tend à éloigner ou à rapprocher un mobile du centre de son mouvement, elle se subdivise en deux types, la force centrifuge qui tend à éloigner le mobile de son centre, et la force centripète qui tire ou pousse le corps vers le centre. Il ajoute la force motrice qui est « une force quelconque, ou plusieurs ensemble, qui concourent à vaincre un obstacle, ou à soutenir son effort. » [167]

[165] Ozanam, La Méchanique, tirée du cours de mathématique de M Ozanam, Paris, Jombert, 1720, p 7.

[166] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 224 et 225.

[167] Jean Ferapie Dufieu, *Manuel physique*, ou manière courte et facile d'expliquer les phénomènes de la nature, Lyon, Regnault, seconde édition, 1760, p 47.

Quand Leonhard Euler traite de cette grandeur, c'est dans l'*Essai d'une démonstration métaphysique du principe général de l'équilibre,* pour fournir une définition très précise, allant jusqu'à décrire les caractéristiques intensité (quantité) et direction /sens, la force devenant ce qu'on nomme aujourd'hui une grandeur vectorielle ; il rappelle en premier les définitions devenues habituelles, avant de donner les caractéristiques de la force : « Dans chaque force il y a deux choses à considérer, la quantité et la direction : par la quantité on comprend combien une force est plus grande ou plus petite qu'une autre, et la direction nous donne à connaître en quel sens chaque force agit sur les corps pour en troubler l'état. »[168]

Parmi les opposants aux thèses scientifiques de Newton, Gottfried Wilhelm Leibniz mérite un traitement particulier de notre part. Partisan du mécanisme et des tourbillons, on aurait pu s'attendre à voir en lui un défenseur inconditionnel du cartésianisme ; or il n'en est rien, et les cartésiens pas plus que les newtoniens n'ont pu éviter les critiques fortes avancées contre les uns ou les autres. Notons simplement que, s'il est resté proches des idées de Descartes sur des points importants, comme ceux que nous venons de citer, il n'en a pas moins apporté de nombreux correctifs aux thèses de ce dernier. Il va fonder ce qu'il a nommé la *dynamique* en changeant le contenu de la physique cartésienne, en apportant des modifications essentielles à la loi des chocs proposée par Descartes dans ses *Principes de philosophie*, en proposant une loi de conservation différente (la querelle des forces vives sur laquelle nous reviendrons occupe un partie importante des débats au 18e siècle), et surtout en proposant un préalable métaphysique différent de celui du philosophe français.

Dans le débat sur la définition de la force, Leibniz a peu pesé. Sa position sur le sujet le détermine à défendre exclusivement les actions de contact, et à rejeter sans appel l'action à distance newtonienne, même proposée mathématiquement. De plus son approche de la science du mouvement est assez différente de celle de ses prédécesseurs, mais aussi de celle de ses contemporains, de par sa volonté de fonder toutes ses propositions par une

[168] Euler, *Mémoires de l'Académie de Sciences de Berlin*, 7, 1753, p 246.

métaphysique qu'il va élaborer, qui sera peu reprise par ses successeurs, et que nous évoquerons dans notre troisième partie. Excepté dans le cas par exemple de la force centrifuge définie et étudiée par Huygens, qu'il accepte, Leibniz emploie le mot force dans un sens différent du sens newtonien. Il utilise par exemple les termes de forces mortes et forces vives, qui se rapprochent plutôt de nos énergies potentielles et cinétiques que de ce qu'on met actuellement derrière le mot force. Un extrait du *Discours de métaphysique* écrit en 1685 ou 1686 nous éclaire sur cette dernière remarque : « Il faut autant de force pour élever un corps A d'une livre à la hauteur CD de quatre toises, que d'élever un corps B de quatre livres à la hauteur EF d'une toise. »[169] La force répondant à la propriété énoncée dans le texte est ce qu'on qualifie aujourd'hui d'énergie mécanique.

Concernant Leibniz, il est de plus utile de signaler qu'il a beaucoup écrit, mais peu publié ses points de vue scientifiques, ce qui fait que ses contemporains n'ont pas eu accès à tous ses écrits. Le *Discours de métaphysique,* dont un extrait vient d'être donné, a été publié au milieu du 19e siècle. Des idées ont été transmises, mais avec parcimonie, et il était difficile aux savants contemporains de Leibniz d'avoir une idée complète de ses réflexions scientifiques. En France les contenus de ses idées philosophiques ont été publiés, mais excepté par Madame du Châtelet dans ses *Principes de physique* dont nous reparlerons, et la querelle des forces vives, la partie scientifique du leibnizianisme n'a pas eu une diffusion importante dans la première moitié du 18e siècle.

Un autre savant mérite une attention particulière sur ce sujet. Acceptant les résultats obtenus par Newton, mais d'une grande rigueur scientifique, d'Alembert montre une grande réticence à utiliser la force newtonienne, essentiellement pour deux raisons. La première est qu'il souhaite éviter d'utiliser cette grandeur qui lui semble obscure et métaphysique, et la seconde que sa conviction est qu'il faut appréhender la mécanique (qu'après Leibniz il nomme *dynamique*) à partir des effets observés et non à partir de causes difficiles à cerner. Il

[169] Leibniz, *Discours de métaphysique*, édition établie par Michel Fichant, Paris, Folio Essais, 2004, p 179.

justifie en plusieurs occasions cette position, par exemple dans l'Encyclopédie, à l'article force :

> *Quand on parle de la force des corps en mouvement, ou l'on n'attache point d'idée nette au mot que l'on prononce, ou l'on ne peut entendre par là en général que la propriété qu'ont les corps qui se meuvent, de vaincre les obstacles qu'ils rencontrent, ou de leur résister. Ce n'est donc ni par l'espace qu'un corps parcourt uniformément, ni par le temps qu'il emploie à le parcourir, ni enfin par la considération simple, unique, et abstraite de sa masse et de sa vitesse, qu'on doit estimer immédiatement la force ; c'est uniquement par les obstacles qu'un corps rencontre, et par la résistance que lui font ces obstacles.*[170]

Il poursuit par l'illustration du risque d'erreur dans l'utilisation de l'intensité de la force qui est devenue pour certains (il accuse ici sans les nommer les newtoniens) une propriété inhérente aux corps considérés : « Plus l'obstacle qu'un corps peut vaincre, ou auquel il peut résister, est considérable, plus on peut dire que sa *force* est grande ; pourvu que sans vouloir représenter par ce mot un prétendu être qui réside dans le corps, on ne s'en serve que comme d'une manière abrégée d'exprimer un fait ; à-peu-près comme on dit, qu'un corps a deux fois autant de vitesse qu'un autre, au lieu de dire qu'il parcourt en temps égal deux fois autant d'espace, sans prétendre pour cela que ce mot de *vitesse* représente un être inhérent au corps. »[171]

Si on ne souhaite s'attacher qu'aux effets de la force, on doit étudier les obstacles que l'objet en mouvement doit vaincre. D'Alembert décrit trois types d'obstacles, ceux qui anéantissent l'objet, ceux qui le conduisent à l'équilibre, et ceux qui le ralentissent. Détailler les différents obstacles ramène l'auteur à un débat sur la grandeur qui doit se conserver, la quantité de mouvement ou la force vive, selon l'approche choisie. Nous nous retrouvons alors

[170] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article force.
[171] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article force.

devant un nouveau dilemme, la quantité de mouvement se conservant si pour l'effet de la force on utilise la somme des résistances des obstacles, et la force vive restant constante si l'on mesure la force par la quantité absolue des obstacles.

Cette réflexion conduit d'Alembert à ne souhaiter une utilisation de la force qu'à partir de ses effets, et à rejeter un débat selon lui inutile : « … néanmoins, comme nous n'avons d'idée précise et distincte du mot de *force*, qu'en restreignant ce terme à exprimer un effet, je crois qu'on doit laisser chacun le maître de se décider comme il voudra là-dessus ; et toute la question ne peut plus consister que dans une discussion métaphysique très futile, ou dans une dispute de mots plus indigne encore d'occuper des philosophes. »[172]

Dans son Traité de dynamique, D'Alembert remplace les trois lois de Newton par les trois principes de la mécanique, dans lesquelles la force n'intervient pas (le terme force apparaît à l'occasion de l'explication du principe de l'inertie, mais pas dans le sens d'une force newtonienne, nous le verrons plus loin). Ajoutons pour terminer que cette réticence à utiliser la force apparaît souvent dans ses écrits, par exemple dans l'Encyclopédie, où il donne la définition suivante de la force motrice, à la suite de l'article *force* que nous avons détaillé plus haut : « Force motrice, est la cause qui meut un corps. Après tout ce que nous avons dit dans cet *article* sur la notion du mot *force*, il est évident que la *force motrice* ne peut se définir que par son effet, c'est-à-dire par le mouvement qu'elle produit. »[173]

---

[172] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article force.

[173] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article force.

Condillac a une approche semblable à celle de d'Alembert devant la difficulté à appréhender ce concept, en réaffirmant que nous ne pouvons pas connaître la force, nous observons des effets, ou alors il ne s'agit que d'un terme qualifiant un phénomène observé :

> *Il est très-important d'observer, autant qu'il est possible, tous les effets que le mouvement peut produire dans l'étendue, et de remarquer surtout les variétés qu'il éprouve lorsqu'il passe d'un corps à un autre. Mais; afin qu'il ne se glisse dans les expériences ni erreurs, ni détails superflus, il ne faut arrêter la vue que sur ce qui offre des idées nettes. Il ne faut donc pas entreprendre de déterminer ce qu'on appelle la force d'un corps, c'est là le nom d'une chose dont nous n'avons point d'idée. Les sens en donnent une du mouvement, nous jugeons de sa vitesse, nous en mesurons les degrés relatifs en considérant l'espace parcouru dans un certain temps marqué, que faut-il davantage ? Quelle lumière pourrait être répandue sur nos observations par les vains efforts que nous ferions pour connaître cette force que nous regardons comme le principe du mouvement ?*[174]

Il ajoute que le seul cas où le mot *force* puisse être employé, c'est par exemple la force du cheval qui tire un char, mais alors le mot n'indique pas le principe du mouvement, mais un phénomène.

Après d'Alembert et Condillac, nous trouvons Condorcet qui, lui, refuse le débat sur le terme de force, et répond en mathématicien. L'existence de la force n'a pas à être débattue, on l'utilise pour les calculs, pour exprimer des relations, et c'est tout. Il rejoint ainsi Newton pour dire que l'utilisation des forces permet de trouver les lois de la physique sans rechercher une explication concrète.

> *Lorsque, dans un système de corps, leur état varie, soit à raison du temps, soit à raison de leur position, de leur figure, etc., on appelle force la cause de cette variation. Ce terme obscur en métaphysique, n'ôte rien à l'évidence et à la clarté des mathématiques ; parce que, prenant un effet quelconque pour l'unité, et la force correspondante aussi pour l'unité, l'expression de toute autre force*

[174] Condillac, *Œuvres complètes*, tome II, Traité des systèmes, Houel Paris, Levrault Strasbourg, 1798, p 386.

n'est plus qu'un rapport, une simple quantité mathématique : et la force s'égale alors à l'effet qu'elle aurait produit, si rien ne s'y était opposé. Il paraît au premier coup d'œil, que la connaissance des forces ne nous peut rien apprendre au-delà de celle des lois des phénomènes, et que c'est à leur recherche qu'il faut uniquement s'appliquer.[175]

Nous verrons plus loin que l'évolution observée en cette deuxième moitié du 18e siècle avec les prises de position de d'Alembert et Condillac connaîtra son apogée avec la position de Lagrange dans la *Mécanique analytique*.

Le terme de force a beau être contesté, critiqué, il ne reste pas moins très présent dans la plupart des ouvrages de physique, en particulier pour exprimer les lois de Newton. À partir de sa définition d'une force, et parmi les trois axiomes ou lois du mouvement qu'il énonce au tout début des *Principia mathematica*, il a donné sa deuxième loi qu'on écrit actuellement F = ma, F étant la force, m la masse, et a l'accélération. Il écrit « Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.» Le mot changement utilisé ici doit nous inciter à la prudence. Il ne s'agit donc pas chez le savant anglais d'une loi de type F = ma, le changement de mouvement pouvant plutôt s'écrire comme une variation de (mv), mv représentant le mouvement. Nous allons voir que l'énoncé de cette loi, comme chez Newton, est loin d'être transcrite par ses successeurs comme on le fait de nos jours.

Dans l'ouvrage du newtonien Pemberton, on trouve trois formulations de cette loi en des endroits différents de son livre. La première énonce la proportionnalité entre la force et un « changement d'état » peu explicite. D'après lui, la seconde loi du mouvement consiste à dire que le changement de l'état d'un corps est toujours proportionnel à la force imprimée.

[175] Condorcet, *Essai d'analyse*, ou sur le système du monde, tome premier, Didot, Paris, 1768, p 5.

La deuxième formulation manque également de clarté, Pemberton parlant d'une vitesse et non d'une accélération, puis des degrés de vitesse comme le faisait Galilée.

> *La seconde loi du mouvement porte, que la vitesse avec laquelle un corps est mu par l'action de quelque puissance, est proportionnelle à cette puissance, à laquelle la grandeur du corps, qu'elle peut mettre en mouvement avec une vitesse donnée, sert de mesure. De sorte que le sens de cette loi est, que si un corps était mis en mouvement avec un degré de vitesse suffisant pour lui faire parcourir une étendue de mille verges en une heure, la puissance qui pourrait donner la même vitesse à un corps double du premier, donnerait au premier corps une vitesse qui lui ferait parcourir en une heure deux mille verges. Mais par un corps double d'un autre, je n'entends pas un corps dont le volume soit double, mais qui contienne une double quantité de matière solide.*[176]

La troisième formulation cite le mouvement pour la quantité de mouvement, et la puissance pour la force, comme on l'a déjà signalé : « […] le changement du mouvement sera proportionnel à la puissance appliquée. »[177]

Ces présentations successives montrent que, bien que comme pour l'expression de la vitesse dans un mouvement rectiligne uniformément accéléré, la relation ait été obtenue par Varignon (nous y reviendrons dans le paragraphe 2.1.3), les auteurs de livres de physique ne sont toujours pas à l'aise avec les expressions analytiques des grandeurs physiques.

Toujours précis, d'Alembert essaie également d'éviter les conflits inutiles, dus d'après lui souvent à de simples différences d'appréciation des mots ou des définitions. Il signale par exemple dans l'Encyclopédie une divergence qui ne lui semble pas présenter d'intérêt : « On

[176] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755. Liv I ch I p 44.
[177] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Liv I ch I p 48.

lit dans certains ouvrages que la *force centrifuge* est *égale* au carré de la vitesse divisé par le rayon, et dans d'autres qu'elle est égale au carré de la vitesse divisé par le diamètre : cette différence d'expressions ne doit point surprendre ; car le mot *égale* ne signifie ici que *proportionnelle ».*[178]

Des trois lois de la mécanique de Newton, la dernière est celle qui posera le moins de problème, on la nomme à l'époque loi de l'action et de la réaction, en y rattachant une notion chronologique entre les deux forces, suggérant qu'un des deux corps est à l'origine de l'interaction. On nomme aujourd'hui ce principe *principe des actions mutuelles*, puisque les deux forces agissent de façon simultanée et en « coresponsabilité ». La présentation classique de la loi de l'action et de la réaction se trouve, entre autres auteurs, chez Pemberton : « La troisième et dernière de ces lois du mouvement est, que quand un corps agit sur un autre corps, l'action de ce corps sur l'autre est égale à la réaction du dernier corps sur le premier. »[179] Euler a proposé une réflexion sur cette troisième loi, concernant la pénétrabilité des corps qui se choquent ; si deux corps sont susceptibles de se pénétrer là où ils se touchent, les forces de résistance à la pénétration sur l'un et l'autre corps sont égales entre elles et directement opposées.

> *XXXI - Cette égalité des forces, d'où dépend le grand principe de l'égalité entre action et réaction, est une suite nécessaire de la nature de la pénétration. Car, s'il était possible que le corps A pénétrât le corps B, le corps A serait précisément autant pénétré par le corps B ; donc, puisque le danger que ces corps se pénètrent est égal de part et d'autre, il faut aussi que ces deux corps emploient des forces égales pour résister à la pénétration. Ainsi, autant que le corps B est sollicité par le corps A, précisément celui-ci sera autant sollicité par celui-là, l'un et l'autre déployant exactement autant de force qu'il faut pour prévenir la pénétration. Or ces deux corps agissant l'un sur l'autre par une force quelconque, se trouveront dans le même état, que s'ils étaient comprimés ensemble par la même force.*[180]

[178] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article force.

[179] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Livre I, chap I, p 38.

[180] Euler, *Recherches sur l'origine des forces*, in Mémoires de l'Académie de Sciences de Berlin, 6, 1752, pp 422.

Pour clore cette partie concernant les grandeurs utilisées en physique, leur définition et leur utilisation, il est utile de revenir sur un thème central dans les théories proposées à cette époque, et que nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises, celui de la gravitation. Le moment important de l'apport de Newton en mécanique concerne sa théorie de la gravitation, s'appuyant sur une force à distance faisant l'objet de nombreux débats au 18e siècle. Or cette idée de force à distance n'est pas neuve, des savants comme Gilbert et ceux qu'on a appelés les *aimantistes*, en référence aux phénomènes magnétiques qu'ils décrivaient, puis Kepler ont proposé des explications de ce type.

William Gilbert, médecin et physicien vivant au 16e siècle, a écrit un ouvrage intitulé *de magnete*, dans lequel il échafaude une théorie de l'attraction par les aimants ; il assimile la terre à un gigantesque aimant, ce qui lui permet de rapprocher l'attraction magnétique et l'attraction terrestre :

> *Le mouvement simple et droit vers le bas considéré par les Péripatéticiens, le mouvement du grave, est un mouvement de réunion des parties disjointes qui, à cause de la matière qui les forme, se dirigent en lignes droites vers le corps de la Terre, ces lignes menant au centre par le plus court chemin. Les mouvements des parties magnétiques isolées de la Terre sont, outre le mouvement qui les réunit au tout, les mouvements qui les unissent entre elles, et ceux qui les font tourner et les dirigent vers le tout, en vue de la symphonie et de la concordance de la forme. […] Donnons maintenant la raison de cette coïtion et de ce mouvement qui émeut toute la nature… C'est une forme substantielle spéciale, particulière, appartenant aux globes primaires et principaux ; c'est une entité propre et une essence de leurs parties homogènes et non corrompues que nous pouvons appeler force primaire, radicale et astrale ; ce n'est pas la force première d'Aristote, mais cette forme spéciale par laquelle le globe conserve et dispose ce qui lui est propre. Dans chacun des globes, dans le Soleil, dans la Lune, dans les astres, il y a une telle forme ; il y en a une aussi dans la Terre, elle constitue cette véritable puissance magnétique que nous appelons la vigueur primaire. Il y a donc une nature*

magnétique qui est propre à la Terre, et qui, par une raison première et bien digne d'exciter notre étonnement, réside en chacune de ses parties véritables…[181]

Cette école de pensée « aimantiste » a connu une diffusion en Angleterre avant l'arrivée de Newton sur le terrain scientifique. Ce dernier publia donc ses recherches dans un climat favorable à ces idées. Pour preuve de cette remarque on peut citer les réflexions de Francis Bacon, et ses résultats décrits par Voltaire dans son *Dictionnaire philosophique*. Voltaire déclare que le plus grand service rendu par Bacon à la science a été de deviner l'attraction. Il cite la *Nouvelle méthode* dans laquelle Bacon déclare :

Il faut chercher s'il n'y aurait point une espèce de force magnétique qui opère entre la terre et les choses pesantes, entre la lune et l'Océan, entre les planètes.... Il faut ou que les corps graves soient poussés vers le centre de la terre, ou qu'ils en soient mutuellement attirés ; et en ce dernier cas, il est évident que plus les corps en tombant s'approchent de la terre, plus fortement ils s'attirent. Il faut expérimenter si la même horloge à poids ira plus vite sur le haut d'une montagne ou au fond d'une mine. Si la force des poids diminue sur la montagne et augmente dans la mine, il y a apparence que la terre a une vraie attraction.[182]

Johannes Kepler s'appuie sur les mêmes principes, pour proposer un modèle où le corps ne possède plus la propriété lui permettant de rejoindre « son lieu », mais où la pesanteur provient de l'attraction par un autre corps « apparenté ». Il résulte de son propos une tendance animiste forte, il parle par exemple de la « puissance animale » de la terre.

La gravité est une disposition corporelle réciproque entre des corps apparentés pour s'unir ou se conjoindre (à cet ordre des choses appartient aussi la faculté magnétique) en sorte que la Terre tire la pierre beaucoup plus que la pierre ne tend vers la Terre. Les corps lourds (surtout si nous plaçons la Terre au centre du monde) ne sont pas portés vers le centre du monde comme centre du monde, mais

[181] William Gilbert, *De magnete*, Chiswick Press, Londres, 1600.
[182] Voltaire, *Œuvres complètes*, *dictionnaire philosophique*, 1764, De Francis Bacon, et de l'attraction.

comme centre d'un corps rond apparenté, c'est-à-dire la Terre. C'est pourquoi, où que la Terre soit placée, ou bien qu'elle se transporte par sa puissance animale, les corps lourds sont toujours portés vers elle.[183]

Les explications de Descartes par les tourbillons, que nous avons longuement étudiés dans notre première partie, décrivent un phénomène lié au mécanisme, ne faisant pas appel à une pseudo-attraction à distance de type magnétique. Tout se fait par contact entre les tourbillons qui agissent sur les corps, et ces derniers qui bénéficient de cette poussée. Disciple de Descartes, et mécaniste comme lui, Jacques Duroure résume ainsi l'idée cartésienne de pesanteur : « La Pesanteur est donc cette force avec laquelle les corps les plus subtils poussent ceux qui sont plus grossiers, comme des obstacles à leur mouvement. »[184]

Les idées de Descartes sur le monde qu'il décrivait furent dénoncées *a posteriori* par des gens qui se basaient sur la réussite des prévisions de Newton dans la marche des planètes et des comètes, mais tous n'ont pas eu la même réaction devant l'explication du fonctionnement du système solaire par Descartes. D'Alembert lui-même, dans le *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, est plus qu'indulgent pour une thèse qu'il rejette, mais qu'il replace dans son contexte d'époque :

Si on juge sans partialité ces tourbillons devenus aujourd'hui presque ridicules, on conviendra, j'ose le dire, qu'on ne pouvait alors imaginer mieux : les observations astronomiques qui ont servi à les détruire étaient encore imparfaites, ou peu constatées ; rien n'était plus naturel que de supposer un fluide qui transportât les planètes ; il n'y avait qu'une longue suite de phénomènes, de raisonnements et de calculs, et par conséquent une longue suite d'années, qui pût faire renoncer à une théorie si séduisante. Elle avait d'ailleurs l'avantage singulier de rendre raison de la gravitation des corps par la

[183] Johannes KEPLER, *Astronomia Nova*, 1609, cité par A Koyré, Études newtoniennes, Paris, Gallimard, 1968, p211.

[184] Jacques Du Roure, *La Physique expliquée suivant les sentiments des anciens et nouveaux philosophes, et principalement de Descartes*, Paris, chez l'Auteur, 1653, avec privilège du Roy, chapitre quatrième, article II, section II.

force centrifuge du tourbillon même : et je ne crains point d'avancer que cette explication de la pesanteur est une des plus belles et des plus ingénieuses hypothèses que la philosophie ait jamais imaginées. Aussi a-t-il fallu pour l'abandonner, que les physiciens aient été entrainés comme malgré eux par la théorie des forces centrales, et par des expériences faites longtemps après.

Il estime que Descartes n'aurait pas pu créer une meilleure physique avec les éléments qu'il avait, et ajoute qu'il a « fallu » passer par les tourbillons afin d'arriver au vrai système du monde.

Excepté ce sentiment favorable remarqué de d'Alembert pour Descartes, et le soutien indéfectible des derniers cartésiens, le succès et la diffusion des théories newtoniennes ont marqué le 18e siècle, la plupart des ouvrages en rendent compte. Mais on poursuit un travail de fond au niveau des définitions, comme on peut le voir chez Ozanam, qui décline le terme de pesanteur de trois manières. La première concerne la pesanteur spécifique, ou gravité spécifique, d'un corps, correspondant à notre masse ou poids volumique. Pour lui, elle procède de la densité des parties dont il est constitué. « Ainsi l'on connaît que la gravité spécifique de l'eau est plus grande que celle de l'huile, que la pesanteur spécifique de l'or est plus grande que celle de l'argent, etc. »[185]

La pesanteur absolue d'un corps correspond à ce que nous nommons poids ou force de pesanteur. Ozanam la définit comme la force qu'a ce corps de descendre en chute libre. « Comme la pesanteur absolue d'une pierre qui est dans l'air, est la force qu'elle a de descendre librement, lorsqu'elle ne touche à quoi que ce soit qu'aux parties de l'air. »[186]

[185] Ozanam, *La Méchanique*, Paris, Jombert, 1720, pages 7 par IV.
[186] Ozanam, *La Méchanique*, Paris, Jombert, 1720, pages 8 par IV.

La troisième acception, la pesanteur relative, concerne ce qu'on appelle de nos jours le moment d'une force, ici en l'occurrence le moment du poids de l'objet étudié par rapport à un point, que les latins appellent *momentum*, et qui s'applique au plan incliné, ou à l'extrémité d'un levier ou d'une balance, dans lequel le poids contrebalance une autre force et donne ce qu'on appelle un équilibre : « Il est évident que la pesanteur absolue est plus grande que la pesanteur relative, qui est composée de la pesanteur absolue, et de la distance du point fixe, qui fait agir le corps pesant avec plus ou moins de facilité, selon qu'il et plus ou moins éloigné du point fixe. »[187]

La définition de la pesanteur fournie par Dufieu est simple et précise, elle est simplement agrémentée d'un commentaire assez courant à l'époque : « 19. La gravité ou pesanteur est cette force par laquelle tout corps tombe vers le centre de la terre, lorsqu'il n'est retenu par aucun obstacle ; la cause de la pesanteur n'est pas bien connue. »[188] La définition 19 renvoie à la cause très discutée de la pesanteur. Si Newton ne fait pas appel dans les *Principia mathematica* à une détermination causale de la force (moyen de prévenir les attaques qui ne manqueront pas ?), il est plus explicite dans les *Questions* de l*'Optique* dans lesquelles il écrit à propos entre autres de la loi de l'attraction à distance « La vérité de ces lois se manifeste par l'examen des phénomènes, quoique leurs causes aient échappé jusqu'à ce jour. » [189]

Dufieu emploie indifféremment les termes gravité et pesanteur. Or le dictionnaire de Brisson nous donne deux significations différentes pour les deux termes. La gravitation est l'effort vers lequel tous les corps tendent à se porter les uns vers les autres (deux planètes par

---

[187] Ozanam, *La Méchanique*, Paris, Jombert, 1720, pages 8 par IV.
[188] Jean Ferapie Dufieu, *Manuel physique*, ou manière courte et facile d'expliquer les phénomènes de la nature, Lyon, Regnault, seconde édition, 1760, page 47.
[189] Isaac Newton, *Optique*, traduit par Marat (1787), Paris, Bourgois, 1989, p 344.

exemple), alors que pesanteur a un sens plus restrictif, c'est la force qui fait tendre les corps vers le centre de la terre. Mais Brisson précise que les deux mots ont la même signification ; on réserve simplement l'utilisation du deuxième terme à l'attraction des corps par la terre. Brisson ajoute en commentaire que Newton appelle *attraction* l'action d'un corps A sur un corps B, qui est la cause inconnue dont on observe l'effet, qui est la *gravitation*.

Newton démontre l'équivalence des deux termes gravité et pesanteur tout au début du livre III des *Principia mathematica* : « Si plusieurs lunes faisaient leurs révolutions autour de la terre, ainsi que dans le système de Jupiter ou de Saturne ; [...] Et si celle de ces lunes qui serait la plus proche de la terre était petite, et quelle touchât presque le sommet des plus hautes montagnes, la force centripète, par laquelle cette lune serait retenue dans son orbite, serait, suivant le calcul précédent, à peu près égale à celle des corps graves placés sur le sommet de ces montagnes. [...] Donc la force, qui retient la lune dans son orbite est celle-là même que nous appelons gravité. »[190] Pour Newton, la force de pesanteur, qui est responsable de la chute des corps sur terre, et la force de gravitation, qui maintient une planète sur son orbite, sont une seule et même force. Cette conclusion sera acceptée par la majorité des scientifiques du 18e siècle.

Les commentaires effectués dans notre étude du terme force se retrouvent naturellement pour le cas de la gravité, au sujet par exemple de l'impossibilité ou non d'expliquer la cause du mouvement par son effet qui est la gravitation. Pemberton est catégorique, Newton ne confond pas la cause et l'effet, ce dernier étant matérialisé par le force centripète et attractive relativement au soleil : « Au reste, en employant le mot d'attraction, Newton exprime un effet, et ne prétend nullement désigner une cause. Son seul but, en faisant usage de ces sortes de termes, est d'exprimer une force qui dirige le

[190] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduit en français par la marquise Du Châtelet, Paris, Desaint et Saillant, 1759, livre III, scholie de la Proposition. IV Théorème IV.

mouvement d'un corps vers un centre, sans prétendre décider si la cause de cette action réside dans ce centre, ou vient de quelque impulsion externe. »[191]

D'Alembert reprend ce thème dans son *Traité de dynamique*, et réitère l'idée, sur l'exemple de la loi de gravitation, que nous pouvons connaître un phénomène par ses effets sans avoir d'avis précis sur la cause :

> *Nous verrons bientôt comment on peut déterminer les effets de l'impulsion, et des causes qui peuvent s'y rapporter : pour nous en tenir à celles de la seconde espèce, il est clair que lorsqu'il est question des effets produits par de telles causes, ces effets doivent toujours être donnés indépendamment de la connaissance de la cause, puisqu'ils ne peuvent en être déduits : c'est ainsi que sans connaitre la cause de la pesanteur, nous apprenons par l'expérience que les espaces décrits par un Corps qui tombe, sont entre eux comme les carrés des temps.*[192]

Avant d'en terminer avec le sujet de la gravitation, il est peut-être nécessaire de dire un mot sur les conflits d'antériorité, auxquels la physique newtonienne n'a pas échappé. Un des reproches formulés à l'encontre de Newton était qu'il avait puisé largement dans des idées énoncées avant lui par d'autres. Clairaut lui a rendu raison à plusieurs reprises, avec, comme argument, que de simples propositions peuvent suggérer des découvertes, mais que les démonstrations sont toutes de Newton et ne doivent rien à ses prédécesseurs ; il compare Hooke et Kepler, qui ont « entrevu » la vérité, avec Newton, qui a « démontré » cette même vérité. « C'est en ne s'écartant jamais de la Géométrie la plus profonde, que M. Newton a trouvé la proportion dans laquelle agit la gravité, et que le principe soupçonné par Kepler et par Hook, est devenu dans ses mains une source si féconde de vérités admirables et inespérées. »[193]

---

[191] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, livre II, chap II, p 211.
[192] d'Alembert, *Traité de dynamique*, Paris, David, nelle édition, 1758, p XI.
[193] *Ibid*., § 11, p. 7.

Après le parcours de quelques termes et concepts significatifs qui ont fait débat au début du 18^{e} siècle, nous souhaitons nous arrêter sur une loi qui, bien que déjà connue au siècle précédent, a fait l'objet d'intenses réflexions, et continue d'alimenter les échanges scientifiques à l'époque que nous étudions, non seulement au niveau de la formulation de cette loi, mais aussi sur le fait qu'il puisse ne s'agir que d'un principe, ou qu'on trouve une justification, si ce n'est une démonstration à cette loi. La loi ainsi présentée est nommée par le phénomène qu'elle décrit, l'inertie.

2.1.2 L'inertie

Beaucoup d'ouvrages consacrés à l'histoire ou à la philosophie des sciences donnent souvent l'impression que tout est terminé en mécanique avec Newton et que les vraies questions ont été réglées pour longtemps. Or il n'en est rien, les interventions de d'Alembert, d'Euler puis de Laplace seront nécessaires pour discuter, préciser et améliorer un concept très important en physique, l'inertie.

S'appuyant sur l'observation qu'un objet, lancé horizontalement, s'arrête rapidement. Aristote pensait qu'une force était nécessaire à chaque instant pour maintenir un objet dans un tel mouvement. Cette opinion se maintiendra chez les scolastiques, avec quelques aménagements, comme l'intervention d'un *impetus* chez Buridan, ou d'un principe, dont la nature est de poursuivre ce mouvement.

Un élément complémentaire fondamental déjà évoqué dans le paragraphe 1.1 vient accompagner cette pensée, c'est l'idée chez les Anciens que le mouvement circulaire est naturel ; il est celui des planètes, du soleil et des étoiles, il peut n'avoir ni début ni fin. Les astronomes comme Ptolémée, Copernic puis Tycho Brahé reprendront ce principe de suprématie du mouvement circulaire, jusqu'à ce que presque simultanément Kepler pour le mouvement elliptique des planètes, Galilée pour le mouvement parabolique des projectiles, et Descartes pour la persistance du mouvement rectiligne uniforme des objets livrés à eux-mêmes viennent mettre un terme à cette suprématie.

La première idée d'Aristote mise en avant ici, celle d'une force nécessaire pour maintenir un objet en mouvement, est encore perceptible chez Léonard de Vinci au 15e siècle ; il évoque néanmoins l'observation d'une persistance pendant un certain temps du mouvement initial: « Tout mouvement naturel et continu désire conserver son cours, par la ligne de son principe, en quelque lieu que ce soit ; même s'il varie, il se réclame de son principe. […] Tout mouvement tend à se maintenir ; tout corps en mouvement continue à se mouvoir, tant que l'impulsion de la puissance de son moteur, en lui, se conserve. »[194]

Une étape décisive est franchie en 1632 dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* par Galilée qui prend appui sur une expérience réalisée suivie d'une expérience de pensée. À partir de mesures effectuées sur des plans inclinés où les frottements sont réduits au maximum, Galilée déduit une expérience idéale où les mouvements se font sans frottements sur les supports : une boule qui descend sur un plan incliné (1) d'une certaine hauteur remonte d'une hauteur égale sur un plan incliné (2) se trouvant dans le prolongement du premier, quelle que soit l'inclinaison du plan (2). Si on fait diminuer la pente du plan (2) vers zéro, la boule continuera indéfiniment à vitesse constante sur le plan (2) devenu horizontal. Cette découverte est très innovante, puisqu'elle s'oppose à l'idée aristotélicienne d'une tendance exclusive au repos.

Commençons par l'expérience réelle :

> *Salviati : Dites-moi : supposez une surface plane, polie comme un miroir, faite d'un matériau dur comme l'acier, et qui ne soit pas parallèle à l'horizon, mais légèrement inclinée ; vous posez dessus une bille parfaitement sphérique, d'un matériau lourd et très dur, en bronze par exemple ; si vous abandonnez la bille à elle-même, que croyez-vous qu'elle fasse ? Ne croyez-vous pas, comme moi, qu'elle va rester immobile ?*
>
> *Simplicio : Si la surface est inclinée ?*
>
> *Salviati : Oui, c'est bien ce que je suppose.*

[194] Léonard de Vinci, Textes choisis, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, § 178 p 93.

Simplicio : Je ne crois pas qu'elle resterait immobile ; je suis certain au contraire que spontanément elle irait dans le sens de la pente.[195]

Salviati fait ensuite dire à Simplicio que la bille va aller continuellement en s'accélérant sur la pente descendante qu'elle parcourt. La même expérience est alors proposée avec une bille projetée sur un plan incliné ascendant sur lequel Simplicio devine un ralentissement progressif de la bille. Salviati reprend alors la parole pour prolonger sa réflexion et prévoir le cas idéal d'un plan ni montant ni descendant, le plan horizontal.

[...] Salviati : Jusqu'à présent vous me paraissez avoir expliqué ce qui arrive à un mobile qui roule sur deux plans différents ; sur le plan descendant le corps lourd en mouvement descend spontanément en accélérant continuellement, et, pour le tenir au repos il faut recourir à une force ; mais sur le plan ascendant, il faut une force pour le faire avancer, et même pour le retenir, et le mouvement qui lui a été imprimé diminue continuellement jusqu'à s'annihiler finalement. Vous dites aussi que, dans les deux cas, il y a une différence qui tient à la plus ou moins grande pente, montante ou ascendante ; c'est ainsi qu'une inclinaison plus grande entraîne une vitesse plus grande ; au contraire sur le plan ascendant, un même mobile chassé avec une même force va d'autant plus loin que l'inclinaison est plus faible. Mais dites-moi ce qui arriverait à un mobile sur une surface qui ne monterait ni ne descendrait.

Simplicio : Il me faut ici réfléchir un peu. Puisqu'il n'y a pas de pente vers le bas, il ne peut y avoir inclination naturelle au mouvement, et, puisqu'il n'y a pas de pente vers le haut, il ne peut y avoir non plus de résistance au mouvement : le mobile se trouverait donc indifférent entre la propension et la résistance au mouvement ; il me semble par conséquent qu'il devrait naturellement rester arrêté.

[…] Salviati : Je suis d'accord, pourvu que la bille soit posée à l'arrêt sur le plan ; mais si on lui donnait de l'élan dans une certaine direction, que se produirait-il ?

Simplicio : Elle irait dans cette direction.

Salviati : Mais avec quelle sorte de mouvement ? Avec un mouvement continuellement accéléré, comme sur le plan descendant, ou bien avec un mouvement de plus en plus retardé comme sur le plan montant ?

[195] Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, traduction Fréreux et De Gandt, Paris, le Seuil (première édition 1632), 1992, deuxième journée, p 167.

Simplicio : Je n'arrive pas à trouver de cause ni d'accélération ni de ralentissement, puisqu'il n'y a ni montée ni descente.

Salviati : Oui. Mais s'il n'y a pas de cause de ralentissement, encore moins devrait-il y avoir de cause de repos ; combien de temps, à votre avis, durerait son mouvement ?

Simplicio : Aussi longtemps que durerait la longueur de la surface, sans monter ni descendre.

Salviati : Si donc l'on supposait cet espace sans fin, le mouvement sur cet espace serait également sans fin, c'est-à-dire perpétuel ?

Simplicio : Il me semble que oui, pourvu que le mobile soit d'un matériau qui puisse durer.[196]

Le principe d'inertie que nous connaissons semble donc bien avoir été proposé en premier par Galilée dans le *Dialogue*. Il reprend d'ailleurs six ans plus tard le même thème dans le *Discours concernant deux sciences nouvelles*, sur un mode plus théorique, pour aboutir au même résultat « Il faut remarquer en outre que tout degré de vitesse qui se trouve être dans un mobile est imprimé en lui de façon indélébile du seul fait de sa nature, pourvu seulement que soient supprimées les causes extérieures d'accélération et de ralentissement, ce qui n'a lieu que sur un plan horizontal ; sur un plan descendant, en effet, il existe déjà une cause d'accélération, et sur un plan ascendant une cause de ralentissement ; d'où il suit encore que le mouvement sur un plan horizontal est éternel ; car s'il est uniforme, il ne s'affaiblit ni ne diminue, et encore moins cesse. »[197] Il peut alors énoncer son principe : « J'imagine qu'un mobile a été lancé sur un plan horizontal d'où l'on a écarté tout obstacle ; il est déjà certain, d'après ce qu'on a dit ailleurs plus longuement, que son mouvement se poursuivra uniformément et éternellement sur ce même plan, pourvu qu'on le prolonge à l'infini. »[198]

---

[196] Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, traduction Fréreux et De Gandt, Paris, le Seuil (première édition 1632), 1992, deuxième journée, p 169.

[197] Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, première édition 1638, traduction Maurice Clavelin, PUF, Paris, 1995, Troisième journée p 178.

[198] Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, première édition 1638, traduction Maurice Clavelin, PUF, Paris, 1995, quatrième journée p 205.

La quantité qui caractérise le mouvement, l'impeto, se conserve. Mais cet impeto de Galilée est différent de l'impetus de Buridan. L'impetus consiste en une puissance, une force maintenant un mouvement qui sans lui cesserait. Au contraire, le mouvement chez Galilée perdure sans cause. Simplicio et Salviati conviennent qu'ils n'arrivent pas à trouver de cause possible d'une accélération, d'un ralentissement ou d'un repos pour un objet mis en mouvement dans un plan horizontal. Mais, et c'est le deuxième point important sur lequel nous devons insister pour comprendre la conception de l'inertie du savant italien, dans son esprit, la physique est liée au lieu où nous nous trouvons, le mouvement inertiel n'est pas rectiligne car alors la boule s'éloignerait du centre de la terre ; il s'agit donc selon lui d'un mouvement circulaire autour du centre de la terre. Si le plan incliné rejoint la terre avec une certaine vitesse, le mouvement se poursuivra indéfiniment sur la surface de la terre, car c'est la seule trajectoire qui ne suppose aucune élévation de poids, et sera circulaire : « Nous supposons en effet, et c'est l'une des difficultés, qu'un plan horizontal, qui n'incline ni vers le haut ni vers le bas, est une ligne droite, comme si une telle ligne était, en toutes ses parties, équidistante du centre ; or il n'en est rien, car si partant de son milieu on va vers ses extrémités, on s'éloignera de plus en plus du centre, s'élevant ainsi constamment. »[199] Mais la comparaison de la longueur des parcours avec la distance au centre de la terre nous permet de ne pas nous attarder sur cette difficulté, puisque par approximation on peut assimiler l'arc de cercle parcouru dans le mouvement réel sur la surface de la terre à un segment de droite : « Nos instruments et les longueurs mises en cause sont si petits en comparaison de la distance considérable qui nous sépare du centre du globe, que nous pouvons, à bon droit, assimiler une minute de degré prise sur le plus grand cercle à une ligne droite, et deux perpendiculaires, abaissées par ses extrémités, à deux parallèles. »[200]

Galilée ne pouvait envisager son principe autrement car cela aurait remis en cause sa conception de l'univers. Le principe d'inertie de Galilée n'est pas universel, il n'existe que dans une physique terrestre, la pesanteur étant présente dans ce raisonnement.

[199] Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, première édition 1638, traduction Maurice Clavelin, PUF, Paris, 1995, Quatrième journée p 210.
[200] Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles,* première édition 1638, traduction Maurice Clavelin, PUF, Paris, 1995, Quatrième journée p 211.

Dans les *Études galiléennes*, en parlant de la distinction entre gravité et masse, Alexandre Koyré précise la position de Galilée sur cette distinction : « c'est justement ce que Galilée ne fait pas et ne peut pas faire car pour lui la gravité et la masse se confondent. C'est pourquoi la gravité n'est pas une force qui agit sur les corps, pour lui la gravité c'est le corps lui-même, aussi ne subit-elle aucune variation, dans le temps comme dans l'espace. »[201]. Dans la suite de cet article Alexandre Koyré déclare ainsi que « Galilée n'a pas formulé de principe d'inertie, c'est à Descartes qu'il revient de le faire ». Le principe de Galilée est incomplet ; celui de Descartes va le préciser dans sa formulation, même si on lui reprochera plus tard de s'appuyer sur l'idée que c'est parce que Dieu conserve le mouvement qu'on peut énoncer le principe d'inertie.

Dans les *Principes de la philosophie* Descartes atteint ainsi un degré d'abstraction et de généralisation plus important que Galilée. Après avoir développé dans le paragraphe 26 de la deuxième partie de son ouvrage l'idée qu'« il n'est pas requis plus d'action pour le mouvement que pour le repos… », il formule dans trois paragraphes le principe d'inertie comme nous le connaissons aujourd'hui. Dans le premier des trois, l'auteur propose un principe très général et pas spécifiquement lié au mouvement :

> *37. La première loi de la nature : que chaque chose demeure en l'état qu'elle est, pendant que rien ne change.*
>
> *De cela aussi que Dieu n'est point sujet à changer, et qu'il agit toujours de même sorte, nous pouvons parvenir à la connaissance de certaines règles, que je nomme les lois de la nature, et qui sont les causes secondes des divers mouvements que nous remarquons en tous les corps.*[202]

[201] Alexandre Koyré, *Philosophie des sciences*, *Études galiléennes*, pp 161-290, Paris, Hermann, 1966.
[202] René Descartes, *Œuvres*, tome IX-2, *Principes*, édition Adam et Tannery, Vrin, Paris, 1989 (première édition 1644), deuxième partie. p 84 et 85.

Il ajoute que cette propriété n’est pas immédiatement perceptible, parce que l’observation quotidienne nous donne l’impression du contraire : autour de nous, les objets lancés horizontalement s’arrêtent d’eux-mêmes en un temps assez court. Descartes ne fournit pas une justification physique du type « c’est à cause du frottement sur le support que le mobile s’arrête », mais, fidèle à sa méthode de description du monde qu’il veut expliquer, une raison métaphysique : « Rien ne se porte par l'instinct de sa nature à son contraire, ou à la destruction de soi-même. »[203]

Dans le paragraphe intermédiaire 38, à la question « Pourquoi les corps poussés de la main continuent de se mouvoir après qu’elle les a quittés », la réponse ne nous apporte rien d’autre qu’une affirmation que l’observation confirme le principe énoncé, et que l’intérêt qu’on y trouve est de pouvoir déterminer la raison mécanique de l’arrêt du mobile au bout de quelque temps, soit à cause d’un autre corps, ou bien par l’intermédiaire des fluides dans lesquels baigne le mobile étudié.

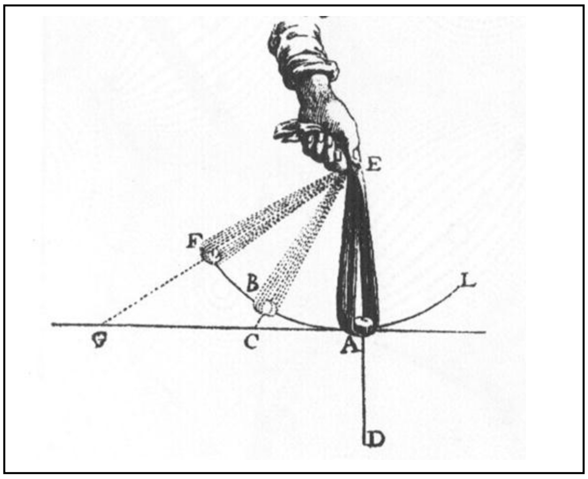
Le paragraphe suivant 39 commence par une justification ne s’appuyant encore une fois pas sur des considérations mécaniques, mais sur le rôle joué selon lui par Dieu dans la manifestation de la loi :

> *39. La deuxième loi de la nature : que tout corps qui se meut, tend à continuer son mouvement en ligne droite.*
>
> *[…] Cette règle, comme la précédente, dépend de ce que Dieu est immuable, et qu'il conserve le mouvement en la matière par une opération très simple; car il ne le conserve pas comme il a pu être quelque temps auparavant, mais comme il est précisément au même instant qu'il le conserve.*[204]

[203] René Descartes, *Œuvres*, tome IX-2, *Principes*, édition Adam et Tannery, Vrin, Paris, 1989 (première édition 1644), deuxième partie. p 85.
[204] René Descartes, *Œuvres*, tome IX-2, *Principes*, édition Adam et Tannery, Vrin, Paris, 1989 (première édition 1644), deuxième partie. p 85.

Il poursuit son propos en décrivant une expérience réelle, celle de la pierre dans la fronde, également utilisée pour la description des forces, que nous avons présentée précédemment :

Et bien qu'il soit vrai que le mouvement ne se fait pas en un instant, néanmoins il est évident que tout corps qui se meut, est déterminé à se mouvoir suivant une ligne droite, et non pas suivant une circulaire : car, lorsque la pierre A tourne dans la fronde E A suivant le cercle A B F en l'instant



qu'elle est au point A, elle est déterminée à se mouvoir vers quelque côté, à savoir A C, si on suppose que c'est celle-là qui touche le cercle. Mais on ne saurait feindre qu'elle soit déterminée à se mouvoir circulairement, parce qu'encore qu'elle soit venue d'L vers A suivant une ligne courbe, nous ne concevons point qu'il y ait aucune partie de cette courbure en cette pierre, lorsqu'elle est au point A ; et nous en sommes assurés par l'expérience, parce que cette pierre avance tout droit vers C, lorsqu'elle sort de la fronde, et ne tend en aucune façon à se mouvoir vers B.[205]

Nous pouvons suivre l'impact des écrits de Descartes dans les décennies suivantes à travers ceux de deux cartésiens. Le premier, Jacques Duroure, suit Descartes de très près, précise les définitions (causes premières, causes secondes), insiste sur les explications métaphysiques, et justifie de façon didactique les observations de la vie courante : pourquoi ne perçoit-on pas de manière évidente le principe d'inertie ?

LX. Il est inconcevable que les corps dont l'essence ne consiste qu'en l'étendue se remuent d'eux-mêmes ; c'est pourquoi il faut que Dieu leur ait imprimé le mouvement, duquel il est par conséquent la première cause. L'expérience nous apprend d'ailleurs que les créatures se communiquent les unes aux autres leurs mouvements : ainsi ils ont encore leurs causes secondes. Descartes attribue ce nom de causes secondes à certaines règles établies sur ce que Dieu ne change

[205] *Ibid*. p 86.

point, et qu'étant immuable il agit toujours de même sorte : nous pouvons appeler ces règles les lois de la nature.

LXI. La première de ces lois est que chaque corps demeure en l'état où il est jusqu'à ce qu'il en soit empêché par la rencontre de quelque autre corps.[206]

Ouvrage d'inspiration cartésienne qui a connu un grand succès concrétisé par de nombreuses éditions, le *Traité de Physique* de notre deuxième auteur, Jacques Rohault, fournit les « vérités qui servent de fondement à presque tout ce que l'on apprend dans la physique ». Ces fondements sont proposés sous forme d'axiomes, dont le sixième donne un principe de conservation, l'exemple fourni, déjà donné dans les *Principes de philosophie*, porte sur la forme de l'objet ; s'il est carré il le reste « de lui-même » : « Le sixième est, que chaque chose est déterminée d'elle-même, à continuer dans sa façon d'être. Ainsi si une chose est carrée, nous pensons qu'elle demeurera toujours carrée, et qu'elle ne tendra jamais d'elle-même à devenir ronde, ou de quelque autre figure. C'est ce que d'autres ont entendu, quand ils ont dit, que rien ne tend à la destruction de soi-même. »[207]

Cet axiome, comme chez Descartes, lui permet de développer ses arguments, justifiant ainsi l'existence du principe d'inertie en deux étapes :

[…] D'où vient qu'un corps qui se meut continue de se mouvoir ? Mais posés nos principes il n'est pas difficile d'en rendre raison : car comme nous avons déjà remarqué, rien ne tend de soi-même à sa destruction ; et c'est une loi de la nature, que les choses doivent toujours demeurer dans un même état, si ce n'est que quelque cause extérieure le change ; ainsi, ce qui existe aujourd'hui, est déterminé à exister toujours ; […] comme ce qui est en repos ne commencera jamais à se mouvoir, si quelque chose ne le meut, de même aussi, ce qui a une fois commencé à se mouvoir, ne saurait de soi-même ne pas continuer à se mouvoir, jusqu'à ce qu'il rencontre quelque chose qui retarde ou qui

[206] Jaques Duroure, La physique expliquée suivant le sentiment des anciens et nouveaux philosophes, et principalement de Descartes, Paris, chez l'auteur, 1653, p 48 et 49.
[207] Rohault, *Traité de physique*, tome premier, quatrième édition, Lyon, Veuve Guillemin, 1696, première partie, chapitre IV, p 33.

arrête son mouvement. Et voilà la véritable raison pourquoi une pierre continue de se mouvoir, lorsqu'elle est hors de la main de celui qui l'a jetée.[208]

Pour Descartes et, comme nous le verrons, après lui pour Newton, le mouvement rectiligne uniforme est comme le repos, il constitue un état, et en tant qu'état ils n'a besoin d'aucune cause pour se maintenir. C'est ce fait qui constitue une vraie nouveauté, alors que pour les scolastiques, un mouvement doit être provoqué et entretenu par une force. Dans le cas d'un objet lancé horizontalement et livré à lui-même, ces derniers ont substitué à une cause extrinsèque (la force responsable du lancer) une propriété intrinsèque, l'inertie, qui permet à l'objet de poursuivre son mouvement. C'est ainsi que Newton, dans les *Principia mathematica*, écrit : « Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état. »[209] Remarquons tout d'abord que quand Newton écrit « changer d'état » il veut signifier *changer de mouvement*.

La formulation de ce principe nous semble aussi devoir nous éclairer sur les sentiments des différents auteurs. Évoquant le facteur perturbateur de l'état initial, Descartes écrit « pendant que rien ne change », et Newton « à moins que quelque force n'agisse ». Un autre auteur, Jean-Pierre de Crousaz, énonce de manière légèrement différente son principe, en utilisant un terme moins connoté que force, qui est la *cause* : « Un mobile se trouve à chaque instant dans une certaine place, précisément égale à sa masse, et comme chaque chose est déterminée à rester dans l'état où elle se trouve, un mobile à chaque instant, est déterminé à rester où il est : il faut donc qu'une nouvelle cause survienne pour le chasser de cette place et l'obliger à la quitter. »[210] On retrouve dans les écrits du 18e siècle ces variantes d'énoncé du

[208] Rohault, *Traité de physique*, tome premier, Lyon, Veuve Guillemin, quatrième édition, 1696, première partie, Chap XI, p 69 et 70, De la continuation et de la destruction du mouvement.

[209] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduit en français par la marquise Du Châtelet, Paris, Desaint et Saillant, 1759,tome premier, p 17.

[210] De Crousaz, *Essay sur le mouvement*, La Haye, Alberts et Vander Kloot, 1728, Continuation du mouvement. P 80.

principe d'inertie, les newtoniens n'hésitant pas à proposer le mot force, et les cartésiens se contentant d'un autre terme plus général et moins marqué scientifiquement que celui de force.

Pemberton, en disciple du savant anglais, ne répugne pas à évoquer des forces, mais dans l'énoncé de la première des trois lois du mouvement qu'il énonce, c'est-à-dire le principe d'inertie, il nomme *puissance* la perturbation, terme qui semble plus précis que *cause*, et qui en tout cas se relie à un concept d'action : « La première loi est, que tous les corps sont tellement indifférents au repos, ou au mouvement, que dès qu'ils se trouvent en repos, ils y restent, jusqu'à ce que quelque puissance, en agissant sur eux, les en fasse sortir : d'un autre côté, s'ils sont une fois en mouvement, ils y persévèrent, continuant à se mouvoir toujours en ligne droite, après être séparés de la puissance qui leur a imprimé le mouvement ; et conservant aussi le même degré de vitesse qui leur avait été communiqué d'abord, sans s'arrêter, ni même en rien perdre, à moins que quelque nouvelle puissance ne vienne à déployer son action sur eux. »[211]

Membre du groupe des expérimentateurs hollandais avec S'Gravesande et Boerhaave, promoteur du newtonianisme en Hollande puis en Europe dès le début du 18^{e} siècle, Pierre Van Musschenbroek a écrit un *Essai de physique* qui a connu une grande diffusion, dans lequel il propose l'énoncé du principe d'inertie : « Si un corps vient à se mouvoir d'un mouvement simple dans le vide, il continuera éternellement son mouvement avec la même vitesse, et en suivant la même route qu'il avait prise au commencement. Car le corps, par sa force d'inertie, reste dans le même état, dans lequel on l'avait mis d'abord ; et comme il ne se trouve dans le vide aucune cause, qui agisse sur ce corps, il se mouvra toujours avec la même vitesse et en suivant la même route. »[212] Il nomme la force d'inertie, comme cause du maintien du corps dans son état initial, repos ou mouvement. À l'image de Newton qu'il cite,

[211] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Livre I, chap I, p 35 et 36.
[212] Musschenbroek, *Essai de physique*, tome 1, Leyden, Samuel Luchtmans, 1739, p 83.

il s'exprime sur cette « force » de manière très précise, avec un exemple illustratif, assimilant la force d'inertie à une résistance montrée par un objet recevant un choc :

> *Nous avons mis la force d'inertie au nombre des propriétés communes des corps. Cette force consiste, en ce qu'un corps ne passe pas aisément de l'état de repos ou de mouvement, à un autre état.*
>
> *Il est en quelque sorte assez difficile de se former une idée assez juste de cette force, et c'est pour cela que Monsieur Newton, philosophe profond et pénétrant, a entrepris le premier de la bien faire connaître par la remarque suivante. Concevez le corps A, entièrement libre et suspendu sans aucun mouvement, que le corps B vienne le choquer avec une certaine vitesse : si il ne se trouve donc, dans le corps A, autre chose que le simple repos, qui ne peut rien opérer, il faudra que le corps A avec le corps B se meuvent avec la même vitesse, avec laquelle le corps B se mouvait auparavant. De cette manière, si A est un fort grand corps, B qui est un très petit corps, produirait un grand effet sur A. Mais voyons à présent ce que nous apprend l'expérience, et nous remarquerons bientôt tout autre chose : car lorsque B vient à choquer A, ils se meuvent tous deux avec beaucoup moins de vitesse, que n'en avait auparavant B, par conséquent B doit avoir perdu quelque chose, et certainement il a perdu une certaine force, cette force ne peut s'être dissipée de B, à moins qu'il ne se soit rencontré quelque résistance dans A ; il faut donc qu'il y ait eu dans A, qui était alors en repos, une résistance, qui produit son effet lorsque ce corps est mis en mouvement, et qui l'empêche de perdre aisément l'état de repos dans lequel il était auparavant. C'est à cette sorte de résistance que nous donnons le nom de force d'inertie ; d'autres l'appellent force passive.*[213]

Newton a défini effectivement une force d'inertie, dès le début des *Principia mathematica*. Il s'agit de la définition III. Citée dès la page 2 de l'ouvrage, cette force anticipe le principe d'inertie énoncé plus loin page 17 : « La force qui réside dans la matière (vis insita) est le pouvoir qu'elle a de résister. C'est par cette force que tout corps persévère de lui-même dans son état actuel de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite. […] Le corps exerce cette force toutes les fois qu'il s'agit de changer son état actuel. »[214]

---

[213] Musschenbroek, *Essai de physique*, tome 1, Leyden, Samuel Luchtmans, 1739, p 55 et 56.

[214] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduit en français par la marquise Du Châtelet, Paris, Desaint et Saillant, 1759, tome premier, p 2.

S’agissant de l’inertie, le terme de force sera fréquemment repris par les auteurs, Vivens par exemple effectue dans un texte court une synthèse des deux propriétés de l’inertie que nous avons pointées : « Il y a, dit-on, une force dans les corps, qui fait qu’ils résistent à être déplacés, et qu’ils persévèrent dans l’état de mouvement ou de repos. C’est ce qu’on appelle *Force d’Inertie*. »[215]

Dans l’article mouvement de l’*Encyclopédie*, d’Alembert reprend la propriété depuis sa genèse (rejet de la thèse d’Aristote) et réitère son propos sur l’impossibilité de connaître la cause et de se contenter de l’étude des effets :

> *Quant à la continuation du mouvement, ou la cause qui fait qu'un corps une fois en mouvement persévère dans cet état, les Physiciens ont été fort partagés là-dessus, comme nous l'avons déjà remarqué. C'est cependant un effet qui découle évidemment de l'une des grandes lois de la nature, savoir que tous les corps persévèrent dans leur état de repos ou de mouvement, à moins qu'ils n'en soient empêchés par des forces étrangères; d'où il s'ensuit qu’un mouvement une fois commencé continuerait à l'infini, s'il n’était interrompu par différentes causes, comme la force de la gravité, la résistance du milieu, etc. de sorte que le principe d'Aristote, toute substance en mouvement affecte le repos, est sans fondement.[…]*[216]

Fraîchement convertie aux idées de Leibniz au moment où elle écrit les *Institutions de physique*, mais acceptant les découvertes de Newton, en particulier la loi d’attraction universelle, Madame du Châtelet énonce le principe d’inertie avec une présentation ici plutôt cartésienne/leibnizienne, c’est-à-dire en employant le vocable *cause* plutôt que *force* : « Un corps persévère dans l’état où il se trouve, soit de repos, soit de mouvement, à moins que quelque cause ne le tire de son mouvement, ou de son repos. »[217] Elle décrit un peu plus loin les conséquences de ce principe lors d’un mouvement idéalisé dans un espace absolument vide : « Un corps qui serait une fois en mouvement dans le vide absolu (s’il était possible)

---

[215] François de Vivens, *Nouvelle théorie du mouvement*, Londres, 1749, p : 87-89.

[216] Diderot et d’Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article mouvement.

[217] Madame du Châtelet, *Institutions de physique*, Paris, Prault, 1740, p 222.

continuerait à se mouvoir pendant toute l'éternité dans ce vide, et y parcourrait à jamais des espaces égaux en temps égaux, puisque dans le vide aucun obstacle ne consumerait la force de ce corps en tout, ni en partie. »[218]

Quelques voix s'élèvent néanmoins distinctement contre l'existence de la force d'inertie, comme le cartésien Gamaches en 1740 dans son *Astronomie physique*, mettant les lecteurs en garde contre les fausses impressions ou les fausses évidences : « Ce qui peut nous faire de la peine ce sont nos préjugés. Ce que nous avons une fois cru, nous cessons difficilement de le croire. Ainsi jugeons-nous qu'il y a dans les corps qui sont censés se mouvoir, quelque chose de plus que dans ceux qu'on suppose en repos ; nous nous persuadons qu'il y a en eux une force qui ressemble à l'impression sensible que font sur nous les corps étrangers qui rencontrent le nôtre. »[219]

Malgré ces quelques réticences ou ces oppositions à la force d'inertie, le principe d'inertie, lui, est bien établi au milieu du 18[e] siècle. Mais c'est sur le terme de principe (donc non démontrable et accepté sans preuve comme loi de la nature) que d'Alembert va intervenir. Dans le *Traité de dynamique* de 1743, d'Alembert remplace les trois lois de Newton par ses propres lois de la mécanique, qui ne font pas appel à la force newtonienne. Cette modification le conduit à « démontrer » le principe d'inertie, la deuxième de ses lois de la mécanique. Il commence par donner un énoncé précis et complet : « Un corps mis une fois en mouvement par une cause quelconque, doit y persister toujours uniformément et en ligne droite, tant qu'une nouvelle cause, différente de celle qui l'a mis en mouvement, n'agira pas sur lui ; c'est-à-dire, qu'à moins qu'une cause étrangère et différente de la cause motrice, n'agisse sur ce corps, il se mouvra perpétuellement en ligne droite, et parcourra en temps égaux des espaces égaux. »[220]

---

[218] Madame du Châtelet, *Institutions de physique*, Paris, Prault, 1740, p 225.
[219] de Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, p22.
[220] Jean le Rond d'Alembert, *Traité de dynamique*, 1743 (2ème édition de 1758), p 4.

La démonstration qu'il va alors donner porte sur une alternative : soit la cause motrice n'existe qu'au commencement du mouvement, soit elle a une action qui se poursuit pendant le mouvement. Dans le premier cas, d'Alembert utilise le principe de raison pour justifier que le mobile va en ligne droite : il n'y a pas de raison pour qu'il aille à droite plutôt qu'à gauche. Il utilise alors une figure permettant d'illustrer les arguments qui suivent, prouvant ainsi l'uniformité du mouvement qui se poursuit « perpétuellement »:

> *… Supposons le Corps partant de A, (Fig. 1re) et capable de parcourir de lui-même uniformément la ligne AB ; soient pris sur la ligne AB deux points quelconques C, D, entre A et B. Le corps étant en D est précisément dans le même état que lorsqu'il est en C, si ce n'est qu'il se trouve dans un autre lieu. Donc il doit arriver à ce corps la même chose que quand il est en C. Or étant en C il peut (hyp.) se mouvoir de lui-même uniformément jusqu'en B. Donc étant en D il pourra se mouvoir de lui-même uniformément jusqu'au point G, tel que DG = CB, et ainsi de suite.*

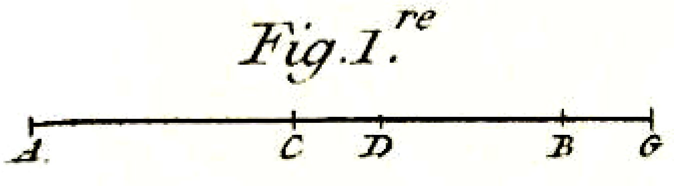


Fig. 1

> *Donc si l'action première et instantanée de la cause motrice est capable de mouvoir le corps, il sera mû uniformément et en ligne droite, tant qu'une nouvelle cause ne l'en empêchera pas.*[221]

Dans le second cas, la cause motrice reste constante, puisque rien ne vient la modifier, cette action va donc se maintenir et conserver le mouvement comme il était au début. D'où la conclusion : « Donc en général un corps mis en mouvement par quelque cause que ce soit, y persistera toujours uniformément et en ligne droite, tant qu'aucune cause nouvelle n'agira pas sur lui. »[222]

[221] Jean le Rond d'Alembert, *Traité de dynamique*, 1743 (2ème édition de 1758), p 5.
[222] Jean le Rond d'Alembert, *Traité de dynamique*, 1743 (2ème édition de 1758), p 6.

D'Alembert fait suivre son propos de deux remarques assez longues. Dans la première, il justifie le fait suivant : s'il a « démontré » cette loi, afin de persuader le lecteur, c'est parce que l'énoncé de la loi d'inertie contredit le sens commun qui laisse entendre qu'un corps abandonné à lui-même sur un plan horizontal se ralentit peu à peu et finit par s'arrêter. Il ajoute que tous ceux qui jusqu'à maintenant ont voulu justifier le principe d'inertie ont invoqué soit une force qui existerait dans la matière, ce qui n'est pas envisageable car cela sous-entendrait « dans la matière un être dont on n'a point d'idée nette »[223], soit l'indifférence de la matière au mouvement ou au repos, ce qui ne peut se prouver.

La deuxième remarque est faite pour évoquer que dans les faits l'expérience est en accord avec le raisonnement sur le principe d'inertie. Nous constatons tous les jours qu'un corps au repos y reste tant qu'une action extérieure ne vient pas interrompre ce repos, on observe « l'incapacité de la matière à se mouvoir elle-même »[224]. Enfin l'expérience nous montre que si les corps en mouvement s'arrêtent toujours au bout d'un certain temps, à cause des frottements ou de la résistance de l'air, nous constatons que si on diminue ces forces de frottement la durée du mouvement avant l'arrêt s'allonge, et nous permet d'imaginer le mouvement perpétuel si les frottements et résistances étaient totalement annulés.

L'apport d'Euler dans le débat concerne l'utilisation du terme *force* pour l'inertie. Euler présente tout d'abord le principe d'inertie en référence au premier principe de Newton, avec un énoncé traditionnel : « Tout corps, conformément au premier principe de la mécanique, persévère naturellement dans son état, soit de repos, soit de mouvement uniforme et rectiligne. »[225] Puis il développe une série d'arguments lui permettant de conclure qu'il n'y a pas de force intervenant dans le cas de l'inertie. En effet, si l'état de mouvement ou de repos

[223] *Ibid.*, p 7.
[224] *Ibid.*, p 9.
[225] Euler, *De la force de percussion et de sa véritable mesure*, in Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin, 1, 1746, p 21.

d'un corps change, c'est parce qu'il y a eu intervention d'une cause externe, cette cause externe à laquelle on a donné le nom de force. L'inertie, qui rend compte qu'un corps demeure dans le même état, ne peut donc prendre le nom de force. Dans un autre article, Euler écrit :

> *Tant que le corps demeure dans le même état, c'est-à-dire en repos, ou dans un mouvement uniforme et rectiligne, la cause de cette conservation d'état est dans la nature même du corps, et l'on ne saurait dire qu'aucune force extrinsèque n'ait agi sur lui. C'est ce principe interne qu'on appelle INERTIE. En effet, l'état de chaque corps se conservant en vertu de sa propre constitution, il est nécessaire que la cause de tout changement soit externe, parce qu'il serait absurde d'attribuer à un même corps un effort à conserver son état, et en même temps à le changer.*[226]

Il reviendra à peu près dans les mêmes termes, dans plusieurs articles, sur ce sujet, toujours en insistant sur le fait que la cause d'un effet observé sur un corps ne peut se trouver dans le corps, mais doit toujours lui être extérieure. Et inversement, un corps au repos ne peut de lui-même se mettre en mouvement, de même qu'un corps en mouvement ne peut trouver en lui des ressources lui permettant de s'arrêter

Avant de clore le chapitre concernant l'inertie, nous souhaitons ajouter deux remarques un peu marginales, mais qui souhaitent éclairer le débat agitant le 18e siècle. La première revient sur le mouvement circulaire, et l'opposition des théories sur la force centrifuge cartésienne et la force centripète newtonienne. D'après Sauri, cette opposition est artificielle, les deux notions étant d'après lui complémentaires.

> *Nous remarquerons ici en faveur des commençants, qui imaginent ordinairement une espèce de conflit et de combat entre la force centrifuge et la force centripète, que celle-ci produit toujours son effet, qui consiste à éloigner le mobile de la tangente de l'orbite pour lui faire parcourir l'arc, tandis que l'autre l'aurait retenu dans la tangente, s'il n'y avait pas eu de force centripète. Ainsi, en considérant cette théorie sous ce point de vue, on peut dire que la force centripète est toujours égale à la*

[226] Euler, *Recherches sur l'origine des forces*, Mémoires de l'Académie de Sciences de Berlin, 6, 1752, p 419.

centrifuge dans toutes sortes de courbes. […] La force centrifuge n'est donc que la considération de la force d'inertie, qui demande que le mobile suive la tangente, tandis que la force centripète, en surmontant cette inertie, le ramène dans l'orbite ; ainsi la force centripète ne livre aucun combat à la force centrifuge.[227]

La deuxième remarque est datée de 1769, elle émane de Laplace qui intervient sur le sujet pour proposer la chose suivante : l'énoncé de la loi d'inertie pourrait être seulement une approximation de la réalité, et la vitesse de l'objet abandonné à lui-même pourrait en réalité décroître insensiblement, mais d'une manière qui tromperait nos sens :

Cela prouve que si le corps se meut uniformément au sortir de la main qui l'a lancé dans l'espace, il continuera de se mouvoir de même, si rien ne s'y oppose ; mais il ne m'est point démontré que ce mouvement initial doive être uniforme. Si l'on n'a point dans l'idée que nos sens nous donnent de la matière rien qui puisse altérer sa vitesse, on n'y voit rien aussi qui doive la conserver. Nous ignorons entièrement la nature des corps, et celle du mouvement, nous ne pouvons la connaître que par ses effets, ainsi la seule expérience peut nous instruire à cet égard. Je regarde donc la loi d'inertie comme une supposition dont les résultats s'accordent très sensiblement avec les phénomènes de la nature.[228]

Nous avons évoqué précédemment une évolution importante au début du 18e siècle par l'accès à une définition fiable et complète de la vitesse, et la démonstration des lois de la cinématique et de la dynamique, s'appuyant sur l'utilisation du calcul différentiel. Il s'agit de ce qui est maintenant connu comme l'algorithme de la cinématique.

[227] Sauri, *Institutions mathématiques*, Paris, Froullé, 4e édition, 1786, note p 309 et 310.
[228] Laplace, manuscrit intitulé « Remarques », cité dans Roger Hahn, *Le système du monde, Pierre Simon Laplace*, un itinéraire dans la science, NRF Gallimard, 2004.

2.1.3 L'algorithme de la cinématique

Comme nous l'avons présenté dans notre première partie, Newton utilise dans les *Principia mathematica* de 1687 une géométrie infinitésimale qui n'est pas une application de son calcul des fluxions. La parution des textes concernant le calcul différentiel présenté par Leibniz date de 1684 puis 1686. Autour de l'année 1700 ces deux savants verront leurs découvertes réinvesties pour créer une nouvelle présentation de la science du mouvement. Cette présentation leur prendra une partie à chacun, pour les combiner. La géométrie différentielle utilisée par Newton dans les *Principia mathematica* et les principes de dynamique proposés par Leibniz n'étaient soit pas très connus, soit peu exploitables, car difficiles à lire, on voit donc l'élaboration d'une mécanique organisée autour de la physique de Newton et du calcul différentiel de Leibniz, les travaux de ce dernier ayant été diffusés largement par le marquis de l'Hospital dans l'*Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes* de 1696.

Le travail le plus abouti sur le sujet qui nous concerne est de Varignon. Membre d'un groupe entourant Malebranche dans la fin du 17^{e} siècle, comme l'Hospital, Lamy, Sauveur, Saurin, Privat de Molières, Pierre Varignon va s'inspirer de la méthode de Leibniz décrite par l'Hospital pour l'utiliser lors de l'étude du mouvement. Il va construire ce que Michel Blay a nommé « l'algorithme de la cinématique » dans son ouvrage *La naissance de la mécanique analytique* (Paris, PUF, 1992). La construction se fait progressivement, sur plusieurs années, de 1698 à 1700, puis est complétée dans les années suivantes. Le monde scientifique disposera alors d'un outil performant qui contient la formulation analytique de la deuxième loi de Newton.

Ce travail s'appuie essentiellement sur une nouvelle approche du concept de vitesse, à partir de l'expression de la vitesse instantanée qui nécessite le calcul différentiel. Il s'agit ensuite de l'utiliser pour obtenir les « équations du mouvement ». Cette utilisation des différentielles permet à Varignon d'appliquer les règles connues du mouvement uniforme à chaque instant du déplacement, même si celui-ci n'est pas uniforme, comme on va le voir.

Dans les deux mémoires donnés à l'Académie des sciences en 1698, l'élément de temps utilisé pour exprimer ses résultats, infiniment petit, est noté dz, et Varignon le qualifie d'instant. Pendant l'instant considéré, le mobile parcourt un espace égal à dx avec une « vitesse dans chaque instant » y qui est ce que nous appelons aujourd'hui la vitesse instantanée : « De sorte que cette vitesse (y), dans chaque instant pouvant être regardée comme uniforme, à cause que y ± dy = y, la notion seule des vitesses uniformes donnera $y = \frac{dx}{dz}$ pour la règle de tous les mouvements variés comme on voudra, c'est-à-dire quelque rapport d'espace, de temps ou de vitesse, qu'on suppose ; la vitesse de chaque instant étant toujours et partout égale au quotient de l'espace parcouru dans chaque instant divisé par cette même différentielle de temps. »[229]

Il applique ainsi les règles du calcul de l'Hospital, qui demande qu'on prenne indifféremment l'une pour l'autre deux quantités qui ne diffèrent entre elles que d'une quantité infiniment petite. La vitesse dans chaque instant est considérée comme constante pendant l'instant dz, elle pourra par contre se modifier pendant les instants successifs, et la formule $y = \frac{dx}{dz}$ pourra être utilisée analytiquement pour des mouvements uniformes ou variés, rectilignes ou curvilignes, avec l'aide de la méthode mathématique de l'Hospital.

[229] Varignon Pierre, mémoire donné à l'Académie royale des sciences de Paris le 5 juillet 1698, cité par Blay Michel, *La naissance de la mécanique analytique,* Paris, PUF, 1992, p 156.

Deux ans plus tard, Varignon a approfondi son étude en l'appliquant à la théorie des forces centrales, ou forces tendant à un centre. Il publie alors en cette année 1700 successivement trois mémoires, toujours à l'Académie royale des sciences, dans lesquels sont données les relations entre force centrale, vitesse, espace et temps, pour tous les mouvements, rectilignes dans le premier mémoire, curvilignes dans le deuxième, et pour les mouvements planétaires dans le troisième mémoire.

Le premier mémoire, du 30 janvier 1700, consacré au mouvement rectiligne, reprend les résultats des mémoires de 1698, mais Varignon ajoute une variable supplémentaire, la force centrale. On a donc quatre grandeurs à étudier, l'espace parcouru x, le temps t, la vitesse v, et la force centrale y. La méthode utilisée dans les mémoires de 1698 est reprise, et conduit Varignon aux résultats suivants : « on aura dx pour l'espace parcouru comme d'une vitesse uniforme v, à chaque instant ; dv pour l'accroissement de vitesse qui s'y fait ; ddx pour ce qui se parcourt d'espace en vertu de cet accroissement de vitesse ; et dt pour cet instant. À ce compte, la vitesse ne consistant que dans un rapport d'espace parcouru d'un mouvement uniforme, au temps employé à le parcourir, l'on aura déjà $v = \frac{dx}{dt}$ pour une première règle, laquelle donnera $dv = \frac{ddx}{dt}$ en faisant dt constante. »[230] Il termine sa démonstration en ajoutant à la première une deuxième relation faisant intervenir la force centrale : « De plus les espaces parcourus par un corps mû d'une force constante et continuellement appliquée, telle qu'on conçoit d'ordinaire la pesanteur, étant en raison composée de cette force et des carrés des temps employés à les parcourir ; l'on aura aussi $ddx = ydt^2$ ou $y = \frac{ddx}{dt^2} = \frac{dv}{dt}$. Ce qui fait encore une règle $y = \frac{dv}{dt}$, qui avec la précédente $v = \frac{dx}{dt}$, satisfait à tout ce qu'on se propose ici de résoudre. »[231]

[230] Varignon, *Manière générale de déterminer les forces, les vitesses, les espaces et les temps…*, in Mémoires de l'Académie des Sciences, pour l'année 1700, Paris, 1761, p 23.
[231] Varignon, *Manière générale de déterminer les forces, les vitesses, les espaces et les temps…*, in Mémoires de l'Académie des Sciences, pour l'année 1700, Paris, 1761, p 23.

Le résultat obtenu constitue ce que Varignon nomme les règles générales des mouvements en ligne droite et qu'il note 1°) $v = \frac{dx}{dt}$ 2°) $y = \frac{dv}{dt}$ ou $(\frac{ddx}{dt^2})$. Ces règles pourront être appliquées à tout type de mouvement rectiligne par des procédures analytiques. Le 31 mars suivant Varignon publie un deuxième article qui reprend la même méthode mais qui s'applique maintenant à « toutes sortes de mouvements en lignes courbes », et qui constitue maintenant une généralisation à tout problème de mécanique. Ce travail lui permet de souligner qu'il retrouve par cette technique analytique les résultats que Newton a donnés par une autre procédure dans ses *Principia mathematica*, et qu'il réserve l'application de cette méthode au mouvement des planètes à une publication ultérieure. Ce qu'il fait le 13 novembre de la même année dans un mémoire intitulé *Des forces centrales, ou des pesanteurs nécessaires aux planètes pour leur faire décrire les orbes qu'on leur a supposés jusqu'ici*.

Les recherches de Varignon se poursuivent dans les années suivantes, avec des publications régulières à l'Académie des sciences. Dans un mémoire du 6 juillet 1707, on trouve la définition de l'accélération ou accroissement instantanée : dans le cas d'un mouvement accéléré (resp ralenti) c'est la quantité dont la vitesse augmente (resp diminue) en chaque instant. Dans un autre mémoire du 15 mai 1720, la formule $f = m\,\frac{du}{dt}$ (toujours utilisée de nos jours) intervient dans les calculs. Dans l'*Histoire de l'Académie des sciences* de la même année, le secrétaire perpétuel Fontenelle revient sur la formulation de ce résultat en notant que « la pesanteur ou force accélératrice quelconque est égale à la masse du corps multipliée par l'infiniment petit de la vitesse, et divisée par l'infiniment petit du temps. […] La force centrale, ou, ce qui revient au même, toute force accélératrice a en général pour mesure ou pour expression un espace infiniment petit du second genre divisé par le carré du temps infiniment petit, et si l'on y veut faire entrer la masse du corps que nous ne considérions pas en 1700, il ne faudra que multiplier par cette masse l'espace infiniment petit du second genre. » Cette deuxième relation peut s'écrire $f = m\,\frac{d^2x}{dt^2}$.

Les recherches effectuées par Varignon dans ce début de 18e siècle ont donc permis une formalisation nouvelle de la théorie mécanique ; nous sommes déjà loin de la géométrie infinitésimale de Newton et cette présentation de la science du mouvement s'appuyant sur l'analyse va lentement se généraliser jusqu'à Lagrange. Malgré ces travaux nous avons vu que de nombreux ouvrages de cette époque ne prennent pas en compte ces nouvelles procédures d'écriture et de calcul, même si on trouve néanmoins dans l'article *mouvement* de l'*Encyclopédie* une utilisation du calcul différentiel dans tous les cas de mouvement : « En général on peut représenter les lois du mouvement uniforme, ou varié, suivant une loi quelconque, par l'équation d'une courbe, dont les abscisses expriment les temps t, et les ordonnées correspondantes les espaces parcourus pendant ces temps. Si $e=nt$, n étant un nombre constant, les espaces seront comme les temps, et le mouvement sera uniforme. S'il y a entre e et t quelque autre équation, le mouvement sera varié; si on n'a point d'équation finie entre e et t, on pourra exprimer le rapport de e à t par une équation différentielle, $de=Rdt$, R étant une fonction de e et de t, laquelle représente la vitesse ; et il est à remarquer que puisque $de/dt= R$, le mouvement sera accéléré si la différence de R est positive, et retardé si elle est négative ; car dans le premier cas, la vitesse R ira en croissant, et dans le second, en décroissant. » [232]

La grandeur *accélération* va mettre assez longtemps avant que son utilisation soit généralisée ; l'*Encyclopédie* la définit de la façon suivante : « accélération. s. f. C'est l'accroissement de vitesse dans le mouvement d'un corps. » et poursuit par une définition de la force accélératrice : « accélératrice (*Force*). On appelle ainsi la force ou cause qui accélère le mouvement d'un corps. »[233].

[232] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article mouvement.

[233] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article accélération.

Après cette étude des concepts de la physique et de leur mise en place progressive dans les procédures scientifiques, nous pouvons nous pencher sur la pratique scientifique proprement dite, et les méthodes proposées, certaines reprenant les méthodes des siècles précédents, d'autres renouvelant celles-ci profondément.

2.2 La méthode scientifique

2.2.1 La méthode ; le rôle de l'induction

Aristote ? Bacon ? Descartes ? Galilée ? Newton ? Il est vain de vouloir donner un point de départ à ce qui constitue pour nous la méthode scientifique. Ce terme couvre des significations qui ont évolué dans le temps. Le survol de cette évolution nous permettra de mieux comprendre les débats qui ont eu cours au 18^{e} siècle et qui se sont poursuivis jusqu'à nos jours, et nous profiterons également de ce retour en arrière pour évoquer l'opinion des penseurs du 18^{e} siècle sur leurs prédécesseurs.

Limiter le rôle d'Aristote à l'invention de la méthode inductive est une manière très réductrice de présenter son apport à la réflexion scientifique, celui-ci allant bien au-delà. Il prend pour point de départ la perception des sens, insiste sur l'étude des faits observables, et se différencie de Platon qui s'appuie exclusivement sur le monde des idées. Aristote pense la science dans le monde observable, la nature, alors que chez Platon nous ne sommes certains que du monde des idées ; il est donc impossible d'après ce dernier d'avoir une connaissance approfondie du monde des phénomènes.

Loin des caricatures, la physique d'Aristote s'appuie sur une réflexion philosophique, on peut parler d'une théorie scientifique ou préscientifique en ce sens qu'elle part des observations et du sens commun pour les confronter à une réflexion critique. Enfin il est nécessaire de signaler que la philosophie naturelle d'Aristote est une téléologie, elle s'appuie sur les causes finales : tout est ordonné et a une fin. La physique d'Aristote a pour tâche la connaissance rationnelle du monde matériel. Mais Aristote donne la priorité à la théorie : la connaissance par observation ou expérience est un point de départ, mais l'étude théorique seule permet de remonter aux causes. Un préalable à l'étude de la science de la nature est nécessaire : en premier il faut en connaître les principes pour comprendre les phénomènes naturels, comme nous pouvons le lire dès la première phrase des *Seconds analytiques*. Deux traductions de cette phrase peuvent nous éclairer, la première de Jean Barthélémy Saint Hilaire : « Toute connaissance rationnelle, soit enseignée soit acquise, dérive toujours de notions antérieures. »[234], et la deuxième, de Jules Tricot : « Tout enseignement donné ou reçu par la voie du raisonnement vient d'une connaissance préexistante. »[235]

Ces notions antérieures, cette connaissance préexistante, évoquées par Aristote sont les principes, qu'ailleurs encore il nomme les indémontrables, auxquels il fait souvent référence, qui sont le point de départ des théories. On doit donc trouver un moyen d'accéder aux principes. C'est sur cette demande que débute *la Physique* : « Puisque connaître en possédant la science résulte, dans toutes les recherches dans lesquelles il y a des principes, des causes ou des éléments, du fait que l'on a un savoir de ces principes, causes ou éléments (en effet nous pensons savoir chaque chose quand nous avons pris connaissance de ses causes premières, ses principes premiers et jusqu'aux éléments), il est évident que pour la science portant sur la nature aussi il faut s'efforcer de déterminer d'abord ce qui concerne les principes. »[236] À partir de là se pose la question de la méthode à envisager pour trouver les principes de la science. Dans le premier livre des *Derniers analytiques*, Aristote écrit que nous ne pouvons

[234] Aristote, *Logique*, tome III, traduit par J Barthélémy saint-Hilaire, Paris, Librairie philosophique de Ladrange, 1838, p 1.
[235] Aristote, *Organon*, Seconds analytiques, trad J Tricot, Paris, Vrin, 1995, p 1.
[236] Aristote, *Physique*, traduction et présentation de Pierre Pellegrin, Paris, GF Flammarion, 2000. Livre I Chapitre 1 La recherche des principes, p 69.

apprendre que par induction ou par démonstration, que la démonstration se fait à partir de la connaissance des principes universels, et que la connaissance des principes universels s'obtient par l'induction. Plus loin, dans le deuxième livre, il écrit que c'est l'expérience qui conduit à l'induction, qui elle-même nous conduit aux principes, en le justifiant par le fait que c'est ainsi que « la sensation produit en nous l'universel. » [237]

Si l'on suit Aristote, il s'agit de partir de la sensation, de l'existant, de l'observation d'un fait particulier, et de remonter ainsi par induction à l'universel (au général), qui est l'objet de la science, de la connaissance. On peut ainsi lire dans les *Topiques* : « Quant à l'induction, c'est, partant des singuliers, l'irruption à l'universel ; par exemple, si c'est celui qui s'y connaît le meilleur pilote, et de même [le meilleur] cocher, c'est aussi, de manière absolue, celui qui s'y connaît qui est le meilleur en chaque [matière]. Par ailleurs, l'induction est plus persuasive, plus claire, plus accessible au sens et commune à la plupart, tandis que le raisonnement est plus contraignant et plus efficace contre les spécialistes de la contradiction. »[238]

Dans la *Physique*, Aristote souligne pourtant une difficulté, l'observable ne répond pas toujours à un cas simple, et il faudra donc démêler ce qu'il appelle des ensembles confus, avant d'atteindre les principes.

> *Mais le chemin naturel va de ce qui est plus connu et plus clair pour nous à ce qui est plus clair et plus connu par nature […]. C'est pourquoi il est nécessaire de progresser de cette manière : de ce qui est plus obscur par nature mais plus clair pour nous vers ce qui est plus clair et plus connu par*

[237] Aristote, *Logique*, tome III, traduit par J Barthélémy saint-Hilaire, Paris, Librairie philosophique de Ladrange, 1838, livre II, chapitre XIX, 7.

[238] Aristote, *les Topiques*, traduction Yvan Pelletier, chapitre XII, in http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/Aristote/topiques.htm#XII

nature. Mais ce qui est d'abord évident et clair pour nous ce sont plutôt les ensembles confus ; mais ensuite, à partir de ceux-ci, deviennent connus, pour qui les divise, leurs éléments et leurs principes[239]

La connaissance des principes de la physique nous permettra d'atteindre les causes, sujet central des préoccupations d'Aristote. Celui-ci n'utilise donc l'induction que pour découvrir les principes, et agit par déduction pour le reste de sa démarche dans l'étude de la nature.

Pour rester sur le thème de l'induction et nous rapprocher de l'époque qui nous concerne, nous devons citer Bacon dont la démarche, différente de celle d'Aristote, est critique sur cette dernière, qu'il appelle induction *vulgaire* dans l'aphorisme 17 du *Novum organum*: « Les lois générales n'ont pas été établies avec plus de méthode et de justesse que les notions n'ont été formées ; cela est vrai même des premiers principes que donne l'induction vulgaire. »[240] Il détaille ses critiques dans un autre aphorisme, en faisant apparaître dans la méthode aristotélicienne, une simple énumération de quelques faits accessibles, eux-mêmes étant en nombre trop restreint : « Pour établir les lois générales, il faut chercher une autre forme d'induction que celle que l'on a employée jusqu'ici, et qui ne serve pas à découvrir et à constituer seulement les principes, comme on les nomme, mais encore les lois les moins générales, les intermédiaires, et toutes en un mot. L'induction, qui procède par une simple énumération, est une chose puérile, qui aboutit à une conclusion précaire, qu'une expérience contradictoire peut ruiner, et qui prononce le plus souvent sur un nombre de faits trop restreint, et sur ceux seulement qui se présentent d'eux-mêmes à l'observation. »[241]

Il s'agit donc pour lui de proposer une autre méthode inductive qui permette non seulement de remonter aux principes comme le proposait Aristote, mais également de trouver

[239] Aristote, *Physique*, traduction et présentation de Pierre Pellegrin, Paris, GF Flammarion, 2000. Livre I Chapitre 1 La recherche des principes, p 71.
[240] Bacon, *Novum Organum*, trad Lorquet, Paris, Hachette, 1857, I, aph 17, p 9.
[241] Bacon, Novum Organum, trad Lorquet, Paris, Hachette, 1857, I, aph 105 p 56.

toutes les lois de la nature, et cela sans user de la démonstration par déduction. Après la recherche et l'énumération de tous les cas, il faut exclure les cas inadaptés, avant d'énoncer le résultat obtenu : « Mais l'induction, qui sera utile pour la découverte et la démonstration des sciences et des arts, doit séparer la nature par des rejets et des exclusions légitimes ; et, après avoir repoussé tous les faits qu'il convient, conclure en vertu de ceux qu'elle admet. »[242] Il ajoute alors que sa méthode, non seulement permet de remonter petit à petit aux principes, mais aussi aux lois et aux notions en utilisant des analogies.

Après Bacon, Galilée utilise lui aussi par une forme d'induction quand il écrit que *la nature est écrite en langage mathématique* : il ne le démontre pas, il s'appuie sur un faisceau d'observations et d'expériences qui montrent que l'utilisation de la géométrie permet de rendre compte des propriétés. Descartes à son tour préconise dans sa méthode de partir des choses simples pour remonter aux choses compliquées, ce qui est une forme d'induction, mais lui-même parle d'intuition. L'une des *Règles pour la direction de l'esprit* rejoint la pratique de Bacon pour obtenir un résultat : « Si enfin je veux montrer par énumération que la surface du cercle est plus grande que toutes celles des autres figures de périmètre égal, il n'est pas nécessaire de passer en revue toutes les figures, mais il suffit de faire cette démonstration sur quelques-unes en particulier, pour tirer par induction la même conclusion au sujet de toutes les autres. »[243]

D'autres auteurs du 17e siècle utilisent l'induction, mais avec des précautions que n'avaient pas prises Bacon, comme par exemple Arnaud et Nicole dans leur ouvrage sur la logique. Dans le dix-neuvième chapitre de la troisième partie, consacré aux diverses manières de mal raisonner, les auteurs définissent ainsi l'induction : « On appelle induction, lorsque la recherche de plusieurs choses particulières nous mène à la connaissance d'une vérité générale. Ainsi lorsqu'on a éprouvé sur beaucoup de mers que l'eau en est salée, et sur beaucoup de

---

[242] Bacon, Novum Organum, trad Lorquet, Paris, Hachette, 1857, I, aph 105 p 56.
[243] Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit*, trad Victor Cousin, Wikisource, Règle 7, p 13.

rivières que l'eau en est douce, on conclut généralement que l'eau de mer est salée, et celle des rivières douce. »[244]

Ils ajoutent (comme Aristote l'avait fait) que les principes premiers sont connus par induction : « C'est même par là que toutes nos connaissances commencent, parce que les choses singulières se présentent à nous avant les universelles, quoique ensuite les universelles servent à connaître les singulières. »[245] L'intitulé du chapitre indique qu'on s'intéresse aux raisonnements incorrects, et le paragraphe IX dont sont tirés les deux extraits précédents a pour titre *Tirer une conclusion générale d'une induction défectueuse.* Les auteurs s'attachent donc à nous mettre en garde : l'induction seule n'est jamais un moyen certain d'atteindre une loi générale. Par exemple, ce n'est pas l'examen particulier de tous les triangles qui m'a fait trouver que l'aire est égale au produit de la base par la moitié de la hauteur, mais la considération de ce qui est renfermé dans l'idée du triangle que j'imagine. D'autres penseurs leur emboîteront le pas pour confirmer que multiplier les exemples ne permet pas d'atteindre avec certitude la vérité d'une affirmation, ou que des cas particuliers ne suffisent pas à nous conduire avec certitude à une propriété générale.

Malgré tout, l'induction est une méthode efficace pour inférer des résultats, les savants ne se priveront pas de l'utiliser, comme Newton, dont les raisonnements font parfois appel à l'induction, en référence à la troisième des quatre règles qu'il préconise pour faire des sciences, comme nous le voyons dans cet extrait du livre III des *Principia mathematica* concernant la fameuse loi de gravitation universelle : « Puisqu'il est constant par les expériences et par les observations astronomiques que tous les corps qui sont près de la surface de la terre pèsent sur la terre, selon la quantité de leur matière ; que la lune pèse sur la terre à raison de sa quantité de matière, que notre mer pèse à son tour sur la lune, que toutes les planètes pèsent mutuellement les unes sur les autres, et que les comètes pèsent aussi sur le

[244] Arnauld et Nicole, *La logique ou l'art de penser*, Paris, Tel Gallimard, 1992, p 243.
[245] *Ibid* p 243.

soleil, on peut conclure, suivant cette troisième règle, que tous les corps gravitent mutuellement les uns vers les autres. »[246]

Après ce préambule consacré à l'induction, pratique sur laquelle nous reviendrons plus loin, nous pouvons élargir notre propos en notant la volonté qui émerge tout doucement au cours des siècles d'organiser, de régler, de formaliser, bref d'améliorer l'étude qu'on appelle aujourd'hui scientifique, en se donnant des méthodes, tout ceci afin de rendre compte et d'expliquer le mieux possible les phénomènes de la nature. Déjà au 15e siècle Léonard de Vinci exprimait ses idées sur la science, en la définissant tout d'abord : « On appelle science, ce discours mental qui prend son origine des derniers principes, au-delà desquels on ne peut plus rien trouver qui fasse partie de ladite science. »[247] , puis en mettant en avant le rôle essentiel de l'expérience : « […] Mais il me paraît que vaines et pleines d'erreurs sont les sciences qui ne naissent pas de l'expérience, mère de toute certitude, et qui n'aboutissent pas à une notion expérimentale, c'est-à-dire dont ni leur origine, ni leur milieu, ni leur fin ne passe par aucun des cinq sens. »[248] Il insiste ensuite sur le besoin de répéter plusieurs fois une même expérience, avec la nécessité d'observer que des résultats identiques sont obtenus lors de chaque expérience, avant d'énoncer une loi générale.

Dans la physique médiévale comme dans celle d'Aristote, même si des expériences et des observations ont eu lieu, ce que Bacon appellera l'expérimentation n'a pratiquement aucune place. Nous avons vu dans notre première partie que des avancées dans les sciences ont eu lieu, mais on ne peut pas parler de grand changement, comme G. Beaujouan, dans l'*Histoire générale de sciences*, le confirme : « Malgré les tentatives faites alors pour renouveler la physique d'Aristote, il n'y a pas eu de « révolution scientifique » au 14e siècle. Les penseurs de cette époque n'ont pas brisé cette « union d'une métaphysique finaliste avec

[246] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduit en français par la marquise Du Châtelet, Paris, Desaint et Saillant, 1759, livre III, règle III.
[247] Léonard de Vinci, *Textes choisis*, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, 143 p 82.
[248] Léonard de Vinci, *Textes choisis*, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, 144 p 83.

l'expérience du sens commun » que A Koyré considérait naguère comme caractéristique du Moyen Âge. Il n'était pas question pour eux de renoncer aux explications causales et essentielles, pour se contenter de la simple intelligibilité fonctionnelle qui sera celle de la science classique. »[249]

Avec Bacon, comme nous l'avons déjà souligné, une méthode se met en place. Opposé à la logique aristotélicienne, remplaçant la pensée déductive par une explication de la nature basée sur l'expérience, Bacon veut renouveler l'approche scientifique de la physique. Dans l'aphorisme 70 de la première partie du *Novum Organum*, il écrit que la meilleure démonstration est l'expérience, à condition de ne pas s'écarter des observations. Une mise en garde contre les expériences mal conduites ou irréfléchies est effectuée, suivie de conseils pour la recherche ; il faut passer des choses considérées en elles-mêmes à des objets plus généraux. Il propose ensuite de suivre le modèle de la création divine pour pratiquer une recherche intellectuelle efficace : « […] Mais dans la véritable carrière de l'expérience, et dans l'ordre suivant lequel on doit tirer des opérations nouvelles, il faut prendre pour modèles l'ordre et la prudence divine. Dieu, le premier jour, créa seulement la lumière, et consacra à cette œuvre un jour entier, pendant lequel il ne fit aucun ouvrage matériel. Pareillement, en toute recherche, il faut d'abord découvrir les causes et les principes véritables, chercher des expériences lumineuses, et non point fructueuses. Les lois générales, bien découvertes et bien établies, ne fournissent pas une opération isolée, mais une pratique abondante, et entraînent après elles les œuvres par troupes. »[250]

Appelé parfois père de l'empirisme (par Hooke) ou de la philosophie expérimentale (par Voltaire), il différentie expérience (*experientia*) qui est pour lui la simple observation d'un fait courant, et expérimentation (*experimentum*) qui associe une réflexion à une expérience, ce qui permet de remonter à des lois plus générales, et ainsi de suite. Il appelle à la réalisation d'une science des causes formelles, tout en rejetant l'utilisation des causes

---

[249] G Beaujouan, in *Histoire Générale des Sciences*, sous la direction de René Taton, Paris, PUF, 1966, p 625.
[250] Bacon, Novum Organum, trad Lorquet, Paris, Hachette, 1857, I, aph 70 p 50.

finales, sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Notons également chez lui l'idée d'expérience cruciale (faits de la croix[251], ou *experimentum crucis*), qui consiste à dire que dans certains cas une seule expérience suffit pour convaincre, si elle permet de trancher entre plusieurs options ou plusieurs causes envisagées. Bacon lui donne aussi la dénomination de *faits décisifs*, et fournit dans l'aphorisme 36 du deuxième livre du *Novum organum* huit exemples d'expériences cruciales pris dans l'astronomie, la physique, et la chimie. L'expression a connu un succès certain, chacun a entendu parler de l'expérience cruciale de Newton en 1666 qui permet d'expliquer la composition de la lumière blanche, ou encore en 1851 du pendule de Foucault qui met en évidence le mouvement de rotation de la terre.

De nombreux auteurs du 18e siècle se réfèrent à Bacon, le couvrent d'éloge en lui accordant l'entière paternité de la construction de la nouvelle méthode qu'on applique à leur époque, et ainsi le font connaître au public lettré. Nous avons cité Hooke et Voltaire, et nous pouvons ajouter d'Alembert qui dans le *Discours préliminaire* de l'Encyclopédie lui accorde un rôle éminent dans la construction et la classification (*la division des connaissances humaines*) de la science moderne. Voltaire, avec l'emphase qu'on lui connaît et qu'il pratiqua souvent, dans les louanges comme dans les critiques, a beaucoup contribué à la popularité de l'auteur anglais au siècle des Lumières :

> *Le chancelier Bacon ne connaissait pas encore la nature ; mais il savait et indiquait tous les chemins qui mènent à elle. Il avait méprisé de bonne heure ce que les universités appelaient la philosophie ; et il faisait tout ce qui dépendait de lui, afin que ces compagnies, instituées pour la perfection de la raison humaine, ne continuassent pas de la gâter par leurs quiddités, leur horreur du vide, leurs formes substantielles et tous les mots impertinents que non seulement l'ignorance rendait respectables, mais qu'un mélange ridicule avec la religion avait rendus presque sacrés.*[252]

[251] Dans l'aphorisme 36 cité, Bacon écrit que l'expression « fait de la croix » est empruntée aux croix qui, placées à l'embranchement des routes, indiquent les divers chemins.
[252] Voltaire, *Lettres philosophiques*, Amsterdam, Lucas, 1734, 12e lettre, sur le chancelier Bacon.

C’est ici qu’il le nomme *père de la philosophie expérimentale*. En effet, d’après Voltaire, personne avant Bacon n’avait pratiqué cette méthode, qui a pris son essor à la suite de la publication de ses ouvrages, en particulier du *Novum organum* : « Peu de temps après, la physique expérimentale commença tout d’un coup à être cultivée à la fois dans presque toutes les parties de l’Europe. C’était un trésor caché dont Bacon s’était douté, et que tous les philosophes, encouragés par sa promesse, s’efforcèrent de déterrer. »[253]

Il va aller encore plus loin, allant jusqu’à lui prêter une antériorité dans la découverte de la loi de gravitation :

> *Mais ce qui m’a le plus surpris, ç’a été de voir dans son livre, en termes exprès, cette attraction nouvelle dont monsieur Newton passe pour l’inventeur.*
>
> *« Il faut chercher, dit Bacon, s’il n’y aurait point une espèce de force magnétique qui opère entre la terre et les choses pesantes, entre la Lune et l’Océan, entre les Planètes, etc. »*
>
> *En un autre endroit, il dit : « Il faut ou que les corps graves soient portés vers le centre de la terre ou qu’ils en soient mutuellement attirés, et, en ce dernier cas, il est évident que plus les corps, en tombant, s’approcheront de la terre, plus fortement ils s’attireront.*[254]

Pemberton, dans son ouvrage sur Newton, fait souvent référence à Bacon, comme précurseur de Newton en tant qu’inventeur de la méthode à suivre pour la découverte en sciences : « Il n’y a, dit-il, que deux routes qu’on puisse prendre pour parvenir à la connaissance de la nature. L’une est de passer étourdiment de quelques observations faites à la légère sur les choses à des axiomes généraux, et puis, sans autre examen, de fonder un système sur ces axiomes comme sur autant de principes certains et incontestables. L’autre méthode (qu’il reconnaît pour être la seule bonne, mais qui jusqu’à son temps n’avait pas été mise en œuvre) est de procéder prudemment et à pas comptés, réservant les principes généraux pour le dernier résultat de nos recherches. »[255]

---

[253] Voltaire, *Lettres philosophiques*, Amsterdam, Lucas, 1734, 12e lettre, sur le chancelier Bacon.
[254] Voltaire, *Lettres philosophiques*, Amsterdam, Lucas, 1734, 12e lettre, sur le chancelier Bacon.
[255] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Introduction page 5.

Plus tard, certains comme Joseph de Maistre rejetteront la rigidité de la méthode préconisée par Bacon, en soulignant que de nombreuses découvertes connues en sciences prennent leur origine dans l'inspiration ou le génie de leur inventeur voire dans la chance ou le hasard, et critiqueront également le manque de compétences scientifiques de Francis Bacon. Mais déjà, avant de Maistre, Hume s'est montré également critique envers Bacon, il le compare à un autre savant qui lui semble avoir beaucoup plus de mérites, Galilée : « Si nous le considérons [Bacon] comme auteur et philosophe seulement, l'idée que nous nous faisons de lui à cette heure, quoique avantageuse, nous le présente pourtant comme inférieur à son contemporain Galilée, peut-être même à Kepler. Il montra de loin le chemin de la vraie philosophie : Galilée, non seulement le montra aux autres, mais y fit lui-même de grands pas. L'Anglais ne savait pas la géométrie ; le Florentin rendit la vie à cette science, y excella, et l'appliqua le premier, de même que l'expérience, à la philosophie naturelle. Le premier rejeta dédaigneusement et dogmatiquement le système de Copernic ; le second le confirma par des preuves nouvelles tirées de la raison et des sens.»[256] Renouvier est lui-même très critique envers Bacon, Selon lui, le seul mérite de Bacon est « d'avoir crié si haut et si éloquemment que le monde entier entendit sa voix : il faut faire des expériences. »[257]. Un peu plus loin il nuance ses propos en rappelant tout ce qu'il a permis par l'enthousiasme dont il a fait preuve comme « prophète du progrès obtenu par la science en multipliant les expériences ».[258]

Il est peut-être plus satisfaisant, comme souvent, de juger avec un point de vue intermédiaire entre les « dénonciateurs » et les « supporters », puisqu'on peut effectivement trouver dans l'œuvre de Bacon, des textes qui ont permis une avancée, mais aussi d'autres qui peuvent nuire à son crédit, comme par exemple ses idées sur la cosmologie. Dans ses critiques des hypothèses avancées par des astronomes au cours des siècles, Bacon inclut Copernic en rejetant son héliocentrisme en plusieurs occasions, en particulier dans un ouvrage publié en

[256] Hume, cité par Charles Renouvier, *Philosophie analytique de l'histoire*, vol. 3, 1897, p 259.
[257] Charles Renouvier, *Philosophie analytique de l'histoire*, vol. 3, 1897, p 261.
[258] Charles Renouvier, *Philosophie analytique de l'histoire*, vol. 3, 1897, p 263.

1623 : « Or c'est l'absurdité de ces suppositions qui a fait tomber les astronomes dans celle du mouvement diurne de la terre (hypothèse que nous croyons absolument fausse). »[259] Rappelons également son refus du raisonnement jusqu'à désirer séparer les mathématiques de la physique. Il écrit par exemple : « ... C'est avec fort peu de jugement que l'astronomie est rangée parmi les sciences mathématiques, classification qui déroge à sa dignité. »[260]

Galilée a une démarche différente de celle proposée par Bacon, il utilise des expériences qu'il associe à des raisonnements mathématiques. On a conservé les manuscrits faisant état de ses mesures avec des billes roulant sur des plans légèrement inclinés utilisés pour ralentir le mouvement, et permettre des mesures plus fiables ; cette expérience est décrite dans ses *Discours sur deux sciences nouvelles*, nous en avons rendu compte, mais les valeurs numériques des résultats obtenus n'apparaissent pas dans l'ouvrage, ce qui pourrait laisser entendre que Galilée estime convaincre mieux son lecteur en lui fournissant une démonstration géométrique qu'en présentant les résultats d'expériences et de mesures. La loi du mouvement rectiligne uniformément accéléré, qui dit que la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps, précédemment énoncée par Nicole Oresme, est attribuée à Galilée, parce qu'il a eu l'idée géniale d'expérimenter avec un plan incliné pour vérifier la loi de la chute des corps qu'il a mathématiquement établie par ailleurs.

Le savant italien, très proche des ingénieurs, techniciens et marins, lui-même ayant travaillé comme ingénieur, a su innover dans des pratiques expérimentales précises, lui permettant de comparer les mesures effectuées avec ses raisonnements théoriques. L'une des deux sciences nouvelles qu'il présente dans ses *Discours* est la résistance des matériaux, qu'il ne pourra pas approfondir de manière satisfaisante avec la seule géométrie, cette branche de la physique ne commencera à progresser qu'avec le développement et l'utilisation du calcul différentiel et intégral. L'idée de Galilée est que la différence entre un solide et un liquide

[259] Bacon, *De la dignité et de l'accroissement des sciences*, in œuvres de Bacon ,traduit par F Riaux, Paris, Charpentier, 1852, première série, p 216.
[260] Bacon, *De la dignité et de l'accroissement des sciences*, in œuvres de Bacon ,traduit par F Riaux, Paris, Charpentier, 1852, première série, p 216.

provient du fait que les particules solides sont reliées de façon continue à l'aide d'une force de liaison, et celles du liquide disposées de manière contiguë.

L'ouvrage le plus célèbre de René Descartes est le *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*, qu'on présente plus simplement comme le *Discours de la méthode*. Dans ce livre publié en 1637, l'auteur explique le chemin à suivre pour connaître le monde : il faut accepter de douter et procéder avec une méthode dont il va définir les aspects principaux : premièrement partir de choses vraies, d'idées claires et distinctes, simples à concevoir et à décrire (intuition), deuxièmement avancer par le raisonnement depuis les choses simples jusqu'aux choses compliquées (déduction), mais progressivement, par ordre et de manière exhaustive. Pour cela il préconise de respecter quatre préceptes :

> *Le premier était de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connusse évidemment être telle : C'est-à-dire, d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements, que ce qui se présente si clairement et si distinctement à mon esprit, que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute.*
>
> *Le second, de diviser chacune des difficultés que j'examinerai en autant de parcelles qu'il se pourra et qu'il sera requis pour mieux les résoudre.*
>
> *Le troisième, de conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusqu'à la connaissance des plus composés. Et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns des autres.*
>
> *Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers, et des revues si générales que je fusse assuré de ne rien omettre.*[261]

Notons ici que ces propositions ne seront pas acceptées sans approfondissement et commentaires, ce que Leibniz ne manquera pas de faire d'une manière précise et argumentée.

[261] Descartes, *Discours de la Méthode*, 1637, in *Œuvres et Lettres*, présenté par André Bridoux, La Pléiade, nrf, 1949, pp 103 et 104.

Dans les *Remarques sur la partie générale des principes de Descartes* datées de 1692, Leibniz revient entre autres sujets sur la pratique du doute méthodique préconisé par le philosophe français. Il suggère que plutôt que de douter de toute chose incertaine, il faut examiner les raisons de l'accepter ou de la rejeter. Il écrit : « je ne vois pas l'avantage de considérer comme faux ce qui est douteux : ce ne serait pas se délivrer des préjugés, on ne ferait qu'en changer. »[262]

Quelques années avant le *Discours de la méthode*, en 1628, Descartes a écrit les *Règles pour la direction de l'esprit*, livre dans lequel il développe déjà les propositions qu'il donnera dans le *Discours*. Dans la règle III, par exemple il met en avant l'utilisation de l'intuition, et de la déduction, cette dernière étant une « opération par laquelle nous entendons tout ce qui se conclut nécessairement d'autres choses connues avec certitude. »[263] Il insiste dans la règle V sur la nécessité d'œuvrer avec ordre: « Toute la méthode consiste dans l'ordre et la disposition des choses vers lesquelles il faut tourner le regard de l'esprit, pour découvrir quelque vérité. Or nous la suivrons exactement, si nous ramenons graduellement les propositions compliquées et obscures aux plus simples, et si ensuite, partant de l'intuition des plus simples, nous essayons de nous élever par les mêmes degrés à la connaissance de toutes les autres. »[264] La règle X concerne le travail d'un apprenti scientifique : comment tendre vers la maîtrise de la méthode ? « Pour que l'esprit acquière de la sagacité, il faut l'exercer à chercher ce qui a déjà été trouvé par d'autres, et à parcourir avec méthode tous les métiers des hommes, même moins importants, mais surtout ceux qui expliquent l'ordre ou le supposent. »[265] Voulant réellement aider les « commençants », Descartes explicite l'énoncé de sa règle en désignant les professions et les domaines qu'on aura avantage à étudier :

> *Mais comme tous les esprits ne sont pas également portés à découvrir spontanément les choses par leur propre force, cette règle apprend, qu'il ne faut pas s'occuper tout de suite des choses difficiles et ardues, mais qu'il faut approfondir tout d'abord les arts les moins importants et les plus*

[262] Leibniz, Remarques sur la partie générale des principes de Descartes in *Opuscules philosophiques choisis*, trad Schrecker, Paris, Vrin, 2001, p 35.

[263] Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit*, in Œuvres et lettres, présenté par André Bridoux, la Pléiade, NRF, 1949. Règle III : p 12.

[264] Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit*, la Pléiade, NRF, 1949. Règle V : p 20.

[265] Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit*, la Pléiade, NRF, 1949. Règle X, p 37.

simples, ceux surtout où l'ordre règne davantage, comme sont ceux des artisans qui font de la toile et des tapis, ou ceux des femmes qui brodent ou font de la dentelle, ainsi que toutes les combinaisons des nombres, et toutes les opérations qui se rapportent à l'arithmétique, et d'autres choses semblables : tous ces arts exercent admirablement l'esprit, pourvu que nous ne les apprenions pas des autres, mais que nous les découvrions par nous-mêmes.[266]

Il poursuit dans la même règle X avec ses conseils par un résumé de la méthode qu'il décrira dans le *Discours* : « Il faut donc s'exercer d'abord à ces choses plus faciles, mais le faire avec méthode, afin de s'accoutumer à parvenir toujours par des chemins faciles et connus, et comme en se jouant, jusqu'à la vérité intime des choses ; car, de cette façon, nous sentirons bientôt, et en moins de temps qu'on ne le pouvait espérer, que nous aussi, avec une égale facilité, nous pouvons déduire de principes évidents plusieurs propositions, qui paraissaient très difficiles et compliquées. »[267] Le *Discours de la méthode* sert d'introduction à trois autres publications scientifiques, la célèbre *Géométrie*, la *Dioptrique* et les *Météores*, qui veulent montrer comment on peut mettre en application les préceptes cartésiens.

Nous pouvons à partir de ces éléments distinguer les points communs et les différences entre les méthodes préconisées par Bacon et Descartes, avec comme grande opposition l'utilisation du raisonnement par déduction (*ces longues chaînes de raisons*) par Descartes que rejette Bacon. Newton à son tour a apporté sa pierre à l'édifice. Il n'a pas fait qu'une construction cohérente d'une théorie permettant de décrire les mouvements sur terre et dans les cieux, ou expliqué la composition de la lumière blanche, ou encore inventé le calcul différentiel, il a également proposé des règles que chacun devra suivre pour conduire un raisonnement de façon satisfaisante et atteindre la vérité en physique. Ces règles sont des conseils de méthode qui seront repris tout au long du 18^{e} siècle. Au début du troisième livre des *Principia mathematica*, intitulé "Du système du monde", qui est une application des résultats des deux premiers livres au mouvement des corps célestes, Newton résume sa méthode, celle qui doit permettre à ses successeurs de poursuivre son travail. Les règles sont au nombre de quatre :

[266] Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit*, la Pléiade, NRF, 1949. Règle X, p 38.
[267] Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit*, la Pléiade, NRF, 1949. Règle X p 39.

Règle Première

Il ne faut admettre de causes, que celles qui sont nécessaires pour expliquer les Phénomènes.

La nature ne fait rien en vain, et ce serait faire des choses inutiles que d'opérer par un plus grand nombre de causes ce qui peut se faire par un plus petit.

Règle II

Les effets du même genre doivent toujours être attribués, autant qu'il est possible, à la même cause.

Ainsi la respiration de l'homme et celle des bêtes ; la chute d'une pierre en Europe et en Amérique ; la lumière du feu d'ici-bas et celle du Soleil ; la réflexion de la lumière sur la Terre et dans les Planètes, doivent être attribuées respectivement aux mêmes causes.

Règle III

Les qualités des corps qui ne sont susceptibles ni d'augmentation ni de diminution, et qui appartiennent à tous les corps sur lesquels on peut faire des expériences, doivent être regardées comme appartenant à tous les corps en général.

Règle IV

Dans la philosophie expérimentale, les propositions tirées par induction des phénomènes doivent être regardées malgré les hypothèses contraires, comme exactement ou à peu près vraies, jusqu'à ce que quelques autres phénomènes les confirment entièrement ou fassent voir qu'elles sont sujettes à des exceptions.

Car une hypothèse ne peut affaiblir les raisonnements fondés sur l'induction tirée de l'expérience.[268]

Les consignes sont donc à la fois différentes de celles du philosophe anglais et du philosophe français, mais l'induction chère à Bacon y tient une grande place. Le 18e siècle voit majoritairement une reprise des propositions newtoniennes, d'Antoni par exemple énonce la première règle dans des termes qui paraissent voisins, ajoutant simplement une notion de degré de fiabilité, ou une probabilité d'acceptation selon le nombre de faits pris en compte :

La première consiste à n'admettre pour cause des phénomènes que celles qu'on sera assuré être les véritables, et qui pourront servir à rendre raison de ces mêmes phénomènes. Et on sera certain d'avoir découvert la vraie cause, lorsqu'elle aura les deux conditions suivantes. La première lorsqu'on pourra démontrer, que tous les phénomènes d'une seule et même nature dépendent d'une

[268] Newton, *Principes mathématiques de philosophie naturelle*, Traduction de la marquise du Chastelet, Paris, Desaint et Saillant, 1756, tome second, livre III, p 2 à 5.

même cause. La seconde, que cette cause a force suffisante, pour produire de semblables phénomènes.

Si la première condition ne peut se démontrer que dans un ou peu de phénomènes de la même nature, alors la cause sera seulement probable, vraisemblable et conjecturale ; elle aura cependant ses degrés de certitude, mais ils dépendront du nombre des phénomènes capables de produire cette même cause.[269]

Une deuxième lecture de cette première proposition de d'Antoni permet néanmoins de relever que sa première phrase ne reprend pas le début de celle de Newton. Or cette première règle newtonienne est très voisine du principe de simplicité attribué à Ockham (14e siècle, le *rasoir d'Ockham*) qui dit qu'il n'est pas utile d'énoncer des hypothèses nouvelles tant que celles déjà données sont considérées comme suffisantes. Ce principe de simplicité, occulté dans son énoncé par d'Antoni, est par contre retenu par le fidèle newtonien qu'est Pemberton, qui développe même les idées contenues dans l'énoncé de Newton : « Le premier est, qu'il ne faut pas admettre en philosophie plus de causes qu'il n'est nécessaire pour expliquer les phénomènes de la nature. Cette règle est généralement approuvée, tous les philosophes, de quelque secte qu'ils soient, avouant unanimement, que la nature ne fait rien en vain, et que quand un petit nombre de moyens suffit pour produire un effet, il n'en faut pas mettre en œuvre davantage. »[270]

La seconde règle est reprise par les deux auteurs, sans grande modification. Pemberton se contente d'écrire : « Son second principe est une suite du premier, savoir, que des effets semblables doivent être attribués aux mêmes causes. »[271], et d'Antoni ajoute seulement des exemples différents de ceux de Newton :

La seconde règle de Newton est que les effets de même nature sont produits par les mêmes causes. Ainsi l'on voit deux corps s'échauffer en les frottant l'un contre l'autre, et l'on voit de même la

[269] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 15 et 16.
[270] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, p 29.
[271] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, p 30.

chaleur s'exciter par le frottement de deux autres corps ; quoique ceux-ci soient d'une matière différente de celle des premiers, nous dirons néanmoins que les effets étant de même nature, la cause est la même. Si deux pièces de superficies bien polies posées l'une sur l'autre se tiennent fortement unies, et que la même chose arrive en adaptant l'une contre l'autre deux pièces de bois, de métal et de verre bien polies aussi, nous conviendrons que la cause de ces adhésions est partout la même, puisque les effets sont de même nature.[272]

C'est ici que nos deux auteurs se rejoignent pour écrire tous deux qu'il y a trois règles énoncées par Newton. D'Antoni tout d'abord qui omet entièrement la règle IV concernant l'induction, il ne fait que citer le mot *induit* pour compléter la citation de sa dernière règle :

Enfin la dernière règle de Newton est, que les qualités des corps, sur lesquels on peut faire des expériences (qualités qui sont invariables), doivent être comptées parmi les propriétés communes à ces mêmes corps ; et comme l'étendue, l'impénétrabilité et la force d'inertie sont des propriétés constantes pour tous les corps, et sur lesquelles on peut faire des expériences ; ainsi nous sommes induits à conclure, que les autres corps les plus éloignés de nous, tels que ceux qui sont cachés dans les entrailles de la terre, et les corps célestes, ont les mêmes propriétés.[273]

Pemberton cite dans son troisième principe la même règle, mais la prolonge par l'explication détaillée du principe d'induction utilisé dans la physique ; il confond donc dans un même principe les règles III et IV de Newton :

Le troisième de ces principes, et dont l'évidence ne cède en rien à celle des deux autres est, que les qualités des corps, qui ne sauraient être augmentées ni diminuées, et qui conviennent sans exception aux corps sur lesquels on a pu faire des expériences, doivent être regardées comme inhérentes à tous les corps.

C'est sur cette règle qu'est fondée la méthode d'induction, sans laquelle il n'est pas possible de faire quelques progrès dans la philosophie naturelle. Car comme ce n'est que par des expériences que les qualités des corps viennent à être connues de nous, il ne nous reste aucun moyen de découvrir les propriétés de ces corps, sur lesquels nous ne pouvons faire aucune expérience, parce qu'ils sont hors de notre portée, qu'en leur appliquant ce que nous savons touchant les corps que nous avons

[272] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 19.
[273] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 21 et 22.

examinés. La seule précaution requise ici, est que les observations et les expériences sur lesquels nous raisonnons, soient assez nombreuses, et qu'on ait égard à toutes les objections qui pourraient être proposées, comme Bacon le remarque très judicieusement (Nov org I ax 105). Et cet avis n'est sûrement pas négligé quand en vertu de cette règle nous attribuons l'étendue et l'impénétrabilité à tous les corps, quoique nous n'ayons pas la moindre preuve directe qu'aucun des corps célestes soit impénétrable, ni même que les étoiles fixes aient de l'étendue.

[…] Telle est cette méthode d'induction sur laquelle toute philosophie est fondée.[274]

Décrire un épisode scientifique qui, quoique sans incidence sur le débat des idées, est significatif de ce qui se pratique d'un point de vue expérimental au milieu du 18e siècle, nous permettra d'appréhender concrètement les méthodes évoquées plus haut. Il s'agit de rendre compte d'une série d'expériences réalisées par Buffon, longuement présentées dans un mémoire à l'Académie royale des sciences de Paris. La préparation, la mise au point et la réalisation des expériences ont pris beaucoup de temps à Buffon, ce qui nous incite à penser que son objectif était certainement plus important que ce qu'on pourrait retenir lors d'une lecture rapide, à savoir la volonté de réplication d'un épisode scientifique resté fameux à travers les époques.

Dans le débat entre Cartésiens et Newtoniens, Buffon a choisi son camp, il s'est résolument rangé aux côtés des disciples du savant anglais. Il souhaite contribuer à la déstabilisation des adeptes des tourbillons et des défenseurs du plein et de l'impulsion. Le sujet auquel il va s'attaquer, celui des miroirs ardents, est marginal, et ne concerne pas le lieu des grandes controverses, mais il va y consacrer beaucoup de temps. L'utilisation des "miroirs ardents" (dits aussi "brûlants") par Archimède en 214 av. J-C lors du siège de Syracuse par les troupes romaines du général romain Marcellus se trouve en effet sujet de polémique depuis un certain temps. Archimède aurait conçu ces miroirs pour concentrer les rayons du soleil sur la

[274] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, p 30 à 32.

flotte romaine et ainsi y mettre le feu. De nombreux savants se sont penchés sur cette histoire et ont généralement cru en son exactitude jusqu'au 17e siècle : citons parmi les plus connus Roger Bacon, Oronce Fine, Cavalieri, Galilée, Mersenne.

C'est René Descartes qui, vers 1630, exprime des doutes, et pour cela, il s'appuie sur des données théoriques, à travers une étude géométrique très pointue, et parvient à deux conclusions : les rayons du soleil ne sont pas parallèles, il y a donc une impossibilité géométrique de concevoir un miroir concentrant ses rayons en un point, et, de plus, il faudrait un miroir immense pour fournir une chaleur suffisante à grande distance. En 1637, il réaffirme ce rejet dans sa *Dioptrique*.

La majorité de la classe scientifique de l'époque et du début du siècle suivant se rallie à Descartes ; Buffon, lui, n'est pas un théoricien de la physique, il ne s'attaque pas à lui sur le plan des idées, il agit en homme de terrain, en praticien de la science, il va fabriquer des miroirs ardents pour montrer leur efficacité, apportant ainsi sa pierre à l'édifice de destruction du cartésianisme dont il se veut artisan. Fidèle à son image, il ne néglige pas de faire connaître ses expériences, les présentant en public ; l'une d'entre elles se fait en présence du roi, auquel il offre le miroir qu'il utilise.

Dans les *Mémoires* de l'Académie Royale des Sciences, en date du 12 avril 1747, Buffon publie les résultats de ses réflexions et de ses études dans un article intitulé : *Invention de miroirs ardents, pour brûler à une grande distance* (les unités utilisées sont le pied de 30,5 cm et le pouce de 2,7 cm). Il commence par présenter un historique de notre sujet, avant de passer à une attaque en règle : « … Cette histoire, dont on n'a pas douté pendant quinze ou seize siècles, a d'abord été contredite, et ensuite traitée de fable dans ces derniers temps. Descartes né pour juger, et même pour surpasser Archimède, a prononcé contre lui d'un ton de maître ; il a nié la possibilité de l'invention, et son opinion a prévalu sur les témoignages et sur la croyance de toute l'antiquité : les Physiciens modernes, soit par respect pour leur Philosophe, soit par complaisance pour leurs contemporains, ont été du même avis. » Il poursuit sa réflexion par un regret des pratiques de son temps envers les savants d'autrefois, pratiques qui pour lui sont certainement principalement le fait des cartésiens qu'il veut affronter : « On n'accorde guère aux anciens que ce qu'on ne peut leur ôter : déterminés peut-être par ces motifs, dont l'amour-propre ne se sert que trop souvent sans qu'on s'en aperçoive, n'avons-nous pas naturellement trop de penchant à refuser ce que nous devons à ceux qui nous ont précédés, et si notre siècle refuse plus qu'un autre, ne serait-ce pas qu'étant plus éclairé, il croit avoir plus de droit à la gloire, plus de prétentions à la supériorité ? »[275]

Il justifie alors son intervention pour répondre au refus de croire au miroir. Pour Buffon en effet la réalisation et la réussite d'une expérience proche de celle d'Archimède mettrait en défaut la démonstration de Descartes, l'utilisation d'une pratique expérimentale d'après lui permettant ou non de valider des résultats obtenus par l'utilisation exclusive des mathématiques : « Quoi qu'il en soit, […] les miroirs ardents d'Archimède étaient si décriés, qu'il ne paraissait pas possible d'en rétablir la réputation : car, pour appeler du *jugement de Descartes*, il fallait quelque chose de plus fort que des raisons, et il ne restait qu'un moyen sûr et décisif, à la vérité, mais difficile et hardi, c'était d'entreprendre de retrouver les miroirs, c'est-à-dire, d'en faire qui pussent produire les mêmes effets ; j'en avais conçu depuis longtemps l'idée, et j'avouerai volontiers que le plus difficile de la chose était de la voir possible, puisque dans l'exécution j'ai réussi au-delà même de mes espérances. »

Il en vient donc avec force détails à la fabrication des miroirs, s'expliquant sur les contraintes auxquelles il avait dû faire face, contraintes techniques et financières. Les descriptions montrent une grande recherche de précision, et les détails fournis permettent à d'éventuels contradicteurs de vérifier ses dires.

---

[275] Buffon, *Invention de miroirs ardents, pour brûler à une grande distance*, Mémoires de l'Académie royale des sciences, année 1747.

J'ai donc cherché les moyens de faire des miroirs pour brûler à de grandes distances, comme de 100, de 200 et de 300 pieds : je savais en général, qu'avec les miroirs par réflexion, l'on n'avait jamais brûlé à plus de 15 ou 20 pieds tout au plus, […] et je sentais bien qu'il était impossible dans la pratique, de travailler un miroir de métal ou de glace, avec assez d'exactitude, pour brûler à ces grandes distances. […]

Je pensai donc sérieusement à exécuter mon projet ; […] je me rabattis à des glaces communes de 6 pouces sur 8 pouces, et un ajustement en bois qui, à la vérité, est moins solide et moins précis, mais dont la dépense convenait mieux à une tentative. M. Passement, dont l'habileté dans les mécaniques est connue même de l'Académie, se chargea de ce détail ; et je n'en ferai pas la description, parce qu'un coup d'œil sur le miroir en fera mieux entendre la construction qu'un long discours. Il suffira de dire qu'il est composé de 168 glaces étamées de 6 pouces sur 8 pouces chacune, éloignées les unes des autres d'environ quatre lignes, que chacune de ces glaces se peut mouvoir en tous sens, et indépendamment de toutes les autres, et que les quatre lignes d'intervalle qui sont entre elles, servent non seulement à la liberté de ce mouvement, mais aussi à laisser voir à celui qui opère, l'endroit où il faut conduire ses images. Au moyen de cette construction, l'on peut faire tomber sur le même point les 168 images, et par conséquent, brûler à plusieurs distances, comme à 20, 30, et jusqu'à 150 pieds, et à toutes les distances intermédiaires ; et en augmentant la grandeur du miroir, ou en faisant d'autres miroirs semblables au premier, on est sûr de porter le feu à de plus grandes distances encore, ou d'en augmenter, autant qu'on voudra, la force ou l'activité de ces premières distances.[276]

Après la description des matériaux utilisés et les détails sur la fabrication et l'assemblage des miroirs, Buffon décrit de façon très précise la série de ses observations entre le 23 mars et le 11 avril 1747. Nous en donnons quelques extraits ici : « Pour la première expérience que j'ai faite le 23 Mars dernier 1747, à midi, j'ai mis le feu, à 66 pieds de distance, à une planche de hêtre goudronnée, avec 40 glaces seulement, c'est-à-dire, avec le quart du miroir environ . […] J'ai mis le feu à une planche goudronnée et soufrée, à 126 pieds de distance, avec 98 glaces, […] Le 3 Avril à quatre heures du soir, le miroir étant monté et posé sur son pied, on a produit une légère inflammation sur une planche couverte de laine hachée, à 138 pieds de distance avec 112 glaces, quoique le soleil fût faible, et que la lumière en fût fort pâle. Il faut prendre garde à soi, lorsqu'on approche de l'endroit où sont les matières combustibles, et il ne faut pas regarder le miroir ; car si malheureusement les yeux se trouvaient au foyer, on serait aveuglé par l'éclat de la lumière. […] Le 10 Avril après midi, par

[276] Buffon, *Invention de miroirs ardents, pour brûler à une grande distance*, Mémoires de l'Académie royale des sciences, année 1747.

un soleil assez net, on a mis le feu à une planche de sapin goudronnée, à 150 pieds avec 128 glaces seulement, l'inflammation a été très subite, et elle s'est faite dans toute l'étendue du foyer qui avait environ 16 pouces de diamètre à cette distance. »[277]

D'après lui, le succès est donc au rendez-vous. Il est juste en cet instant de noter qu'en vrai expérimentateur Buffon ne se contente pas d'effectuer ses essais dans le seul but de contester Descartes, et qu'à travers l'utilisation des miroirs, il étudie les rapports entre la lumière et la chaleur. Il cherche à obtenir une vraie mesure de la chaleur. Le scientifique joue ici pleinement son rôle : éviter de passer à côté d'une idée sur un domaine en devenir, même si cette réflexion ne concerne pas précisément le sujet traité : « Cette découverte nous fournit plusieurs choses utiles pour la Physique, et peut-être pour les Arts. […] On aura par le moyen de mon miroir, la vraie échelle de l'augmentation de la chaleur, et on fera un thermomètre réel, dont les divisions n'auront plus rien d'arbitraire depuis la température de l'air, jusqu'à tel degré de chaleur qu'on voudra, en faisant tomber une à une successivement, les images du Soleil les unes sur les autres, et en graduant les intervalles, soit au moyen d'une liqueur expansive, soit au moyen d'une machine de dilatation ; et de là nous saurons ce que c'est en effet qu'une augmentation double, triple, quadruple, etc. de chaleur, et nous connaitrons les matières dont l'expansion ou les autres effets seront les plus convenables pour mesurer les augmentations de chaleur. »[278]

Il n'est pas possible pour notre auteur de se contenter d'un simple constat d'efficacité de son matériel, il lui faut régler leur compte à ces théoriciens qui ont occupé leur temps inutilement d'après lui :

> *Enfin on sera convaincu, lorsqu'on aura examiné la théorie que j'ai donnée, et qu'on aura vu l'effet de mon miroir, que le moyen que j'ai employé, était le seul par lequel il fût possible de réussir à brûler au loin ; car indépendamment de la difficulté physique de faire de grands miroirs concaves*

[277] Buffon, *Invention de miroirs ardents, pour brûler à une grande distance*, Mémoires de l'Académie royale des sciences, année 1747.
[278] Buffon, *Invention de miroirs ardents, pour brûler à une grande distance*, Mémoires de l'Académie royale des sciences, année 1747.

sphériques, paraboliques, ou d'une autre courbure quelconque assez régulière pour brûler à 150 pieds, on se démontrera aisément à soi-même, qu'ils ne produiraient à très-peu près qu'autant d'effet que le mien, parce que le foyer en serait presqu'aussi large ; que de plus ces miroirs courbes, quand même il serait possible de les exécuter, auraient le désavantage très grand de ne brûler qu'à une seule distance, au lieu que le mien brûle à toutes les distances ; et par conséquent on abandonnera le projet de faire par le moyen des courbes, des miroirs pour brûler au loin, ce qui a occupé inutilement un grand nombre de Mathématiciens et d'Artistes….[279]

Le mot de la fin de sa publication est destiné à rendre justice à Archimède dans le style qui a contribué à sa renommée : « Maintenant que j'ai rendu compte de ma découverte, et du succès de mes expériences, je dois rendre à Archimède et aux anciens, la gloire qui leur est due : il est certain qu'Archimède a pu faire avec des miroirs de métal, ce que j'ai fait avec des miroirs de glace ; il est sûr qu'il avait plus de lumières qu'il n'en faut pour imaginer la théorie qui m'a guidé, et la mécanique que j'ai fait exécuter, et que par conséquent on ne peut lui refuser le titre de premier inventeur de ces miroirs, que l'occasion où il sut les employer, rendit sans doute plus célèbres que le mérite de la chose même. »[280]

Publié dans les *Mémoires* de l'Académie royale des sciences, ce compte rendu se veut l'exemple d'une étude scientifique « moderne », s'appuyant sur un refus d'accepter ce que son auteur considère comme un ensemble de démonstrations inadaptées émises par le camp des cartésiens qu'il combat, sur une expérimentation argumentée et abondamment décrite, et sur des observations précises et complètes. Cette présentation très détaillée d'un travail sur le terrain, effectué par Buffon, un scientifique célèbre, nous permet de voir mises en acte les idées professées par nombre de ses contemporains, mais qui restaient sur un plan trop théorique, et la méthode utilisée par un praticien expérimenté.

[279] Ibid.
[280] Ibid.

Pour clore cette partie consacrée à la méthode utilisée en physique, nous relevons une contribution intéressante de Condorcet qui propose de calculer en effectuant des approximations, dans des limites acceptables, à la double condition de ne pas s'éloigner des résultats observés, et de ne pas compliquer ces calculs :

> *On ne connaît les phénomènes de la nature, qu'autant que nos sens et nos instruments nous le permettent, les différences qui leur échappent sont nulles pour nous ; ainsi, dans quelque cas que ce soit, dès qu'on cherche à rapporter à des observations la vraie loi d'un phénomène, ou la force qui s'y exerce, l'une ou l'autre ne peuvent être également connues qu'à ces différences près : le calcul de ces lois n'est donc jamais qu'une approximation. Ainsi, dès qu'il est uniquement question de la connaissance de la nature, les méthodes d'approximation les plus simples sont les seules qu'on doive employer ; et, pourvu que l'erreur soit telle qu'elle soit imperceptible à nos instruments, et qu'on ne néglige dans le calcul que de pareilles quantités, il est clair que ces méthodes nous donneront tout ce que nous pouvons connaître.*[281]

[281] Condorcet, *Essais d'analyse*, ou sur le système du monde, Paris, Didot, 1768, p 40.

2.2.2 Empirisme et rationalisme

Le 18e siècle présente un visage paradoxalement divisé, de nombreux auteurs se réfèrent à l'un ou à l'autre des savants des siècles précédents ou du début de leur siècle, comme si les pratiques étaient tellement différenciées. Il semble difficile par exemple à la plupart des newtoniens de revendiquer quelque chose provenant des idées de Descartes. À propos de la méthode scientifique à utiliser, on a l'impression qu'il y a affrontement entre deux approches de la science, en particulier en physique. Mais les séparations sont-elles aussi nettes ? Un empirisme newtonien s'oppose-t-il à ce point au rationalisme cartésien ? Il est intéressant de constater que, bien avant cette période, les conceptions de la science étaient beaucoup plus nuancées, et qu'une tendance à vouloir classifier, mettre les idées dans des cases précises, a conduit beaucoup d'auteurs à retenir les faits dominants, pour occulter les nuances qui ont été le lot des plus importants savants depuis l'Antiquité. Nous souhaitons montrer ici que la plupart des auteurs défendent des positions intermédiaires et que le consensus n'est pas si éloigné qu'on pouvait sembler le croire.

Aristote propose une hiérarchisation des personnes en fonction de leur pratique. Pour lui l'art (activité technique) naît de l'expérience, qui est le point de départ de la science, mais la dépasse en lui fournissant une meilleure connaissance de la nature : « Toutefois nous pensons d'ordinaire que le savoir et la faculté de comprendre appartiennent plutôt à l'art qu'à l'expérience, et nous considérons les hommes d'art comme supérieurs aux hommes d'expérience, la sagesse, chez tous les hommes, accompagnent plutôt le savoir : c'est parce que les uns connaissent la cause et que les autres ne la connaissent pas. En effet les hommes d'expérience connaissent qu'une chose est, mais ils ignorent le pourquoi ; les hommes d'art savent à la fois le pourquoi et la cause. »[282]

Léonard de Vinci a une position sans ambiguïté sur la science. Si l'expérience, que tous ne pratiquent pas, constitue un point de départ nécessaire, elle doit être suivie d'un travail mathématique : « Les vraies sciences sont celles que l'expérience a fait pénétrer par les sens et qui imposent silence à la langue des argumentateurs et qui ne nourrit pas de songes ses investigateurs, mais sur les premiers et vrais principes connus procède successivement et avec une vraie suite arrive à conclure, comme on le voit, dans les mathématiques. »[283]

Il insiste ensuite sur le modèle à respecter, en demandant de travailler selon un ordre précis : partir de l'expérience pour remonter aux causes. Il peut alors détailler la marche à suivre, qui s'appuie donc d'abord sur l'observation et l'expérience, puis laisse la voie au raisonnement et à la démonstration : « Je traiterai tel sujet. Mais avant tout, je ferai quelques expériences, parce que je veux présenter d'abord l'expérience. Je démontrerai ensuite pourquoi les corps sont contraints à se comporter de telle ou telle manière. C'est la méthode qu'on doit observer dans la recherche des phénomènes de la nature. Il est vrai que la nature commence par le raisonnement et finit par l'expérience, mais il nous faut procéder autrement et commencer par l'expérience, et, par elle, découvrir la loi. »[284]

Quand Bacon s'exprime à ce sujet, nous nous apercevons qu'il fournit parfois des avis nettement moins tranchés dans certains textes que ceux qu'on présente habituellement comme représentatifs de sa pensée, et que nous avons rencontrés précédemment. L'extrait que nous

[282] Aristote, *Métaphysique*, traduction J Tricot, Paris, Vrin, 1991, A, 1.
[283] Léonard de Vinci, *Textes choisis*, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, 164 p 84.
[284] Léonard de Vinci, *Textes choisis*, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, 214 p 103 et 104.

donnons ici évoque les empiriques et les dogmatiques, ces derniers étant ceux qu'on nomme aussi rationalistes. Les dogmatiques sont ceux qui ont le goût des raisonnements. Les empiriques sont ceux qui ont le goût des expériences.

> *Ceux qui ont traité des sciences furent ou des empiriques ou des dogmatiques. Les empiriques, à la manière des fourmis, se contentent d'amasser et de faire usage ; les rationnels, à la manière des araignées, tissent des toiles à partir de leur propre substance ; mais la méthode de l'abeille tient le milieu, elle recueille sa matière des fleurs des jardins et des champs, puis la transforme et la digère par une faculté qui lui est propre. Le vrai travail de la philosophie est à cette image. Il ne cherche pas son seul et principal appui dans les forces de l'esprit ; et la matière que lui offrent l'histoire naturelle et les expériences mécaniques, il ne la dépose pas telle quelle dans la mémoire, mais modifiée et transformée dans l'entendement. Aussi d'une alliance plus étroite et plus respectée entre ces deux facultés, expérimentale et rationnelle - alliance qui reste à former -, il faut bien espérer.*[285]

Nous avons présenté en détails dans notre première partie l'utilisation d'une expérience par Descartes. Pour expliquer l'arc-en-ciel, il prend une fiole sphérique remplie d'eau, envoie un rayon de lumière blanche, et étudie les rayons colorés émergeant de la fiole. Cette expérience est fournie avec un nombre important de valeurs numériques des mesures effectuées, ce qui permet à Descartes de proposer sa théorie de l'arc-en-ciel. Celle-ci n'aurait pas pu être formulée sans l'expérimentation mise en œuvre. Il s'exprime par ailleurs au sujet des expériences et de l'observation, comme par exemple dans les *Règles pour la direction de l'esprit*, où, lors de l'utilisation de la méthode, beaucoup ne respectent pas cette règle, « ainsi font aussi ces philosophes qui, sans tenir compte des expériences, pensent que la vérité naîtra de leur propre cerveau, comme Minerve de celui de Jupiter »[286]. Ces remarques laissent entendre qu'il n'y a donc aucunement un rejet de l'expérimentation de sa part, et que son utilisation peut côtoyer les arguments rationalistes. Il est vrai que sa physique est présentée sur un mode déductif à partir des hypothèses présentées. Il est vrai également qu'il a écrit la fameuse phrase qu'on lui reprochera souvent, « … et les démonstrations de tout ceci sont si certaines qu'encore que l'expérience nous semblerait faire voir le contraire, nous serions

[285] Bacon, *Novum Organum*, trad Malherbe et Pousseur, Paris, PUF, 1986, aph. 95.
[286] Descartes, *Règles pour la direction de l'esprit*, la Pléiade, NRF, 1949. Règle 5 : p 20.

néanmoins obligés d'ajouter plus de foi à notre raison qu'à nos sens. »[287], alors qu'elle ne constitue pas un rejet de l'expérience, il s'agit seulement de noter la fragilité de l'observation, et la plus grande certitude des mathématiques. Il assume le fait d'inventer un monde, monde rêvé qui lui permet d'expliquer les phénomènes, en insistant sur les concordances avec l'expérience. Dans le paragraphe 43 de la troisième partie des *Principes de philosophie,* intitulé *Qu'il n'est pas vraisemblable que les causes desquelles on peut déduire tous les phénomènes, soient fausses*, il écrit : « Et certes, si les principes dont je me sers sont très évidents, si les conséquences que j'en tire sont fondées sur l'évidence des mathématiques, et si ce que j'en déduis de la sorte s'accorde exactement avec toutes les expériences, il me semble que ce serait faire injure à Dieu, de croire que les causes des effets qui sont en la nature, et que nous avons ainsi trouvées, sont fausses : car *ce serait le vouloir rendre coupable* de nous avoir créés si imparfaits, que nous fussions sujets à nous méprendre, lors même que nous usons bien de la raison qu'il nous a donnée. »[288]

Les mêmes commentaires peuvent concerner Newton qui est présenté comme le grand empiriste, mais si son *Optique* est effectivement en grande partie une succession de comptes rendus d'expériences effectuées et d'interprétation de ces expériences, les *Principia mathematica* sont en fait un ouvrage contenant essentiellement de la géométrie avec des démonstrations purement mathématiques. Il y a donc dans sa démarche un assemblage d'empirisme et de rationalisme qu'il est difficile de séparer. Il aurait certainement difficilement pu être opposé à des considérations comme celles-ci : « Les connaissances, qui nous viennent des sens, sont si imparfaites et si limitées, qu'il est impossible d'atteindre avec elles à un terme assez sûr pour s'y arrêter. Mais si nous y joignons l'adresse et la pénétration, nos progrès seront alors d'autant plus complets, surtout si l'on peut employer la géométrie sublime (le dernier effort de l'esprit humain). Il s'ensuit de là que lorsque les observations et les expériences nous ont conduits à une connaissance exacte des causes physiques, il convient alors de les étendre et de les perfectionner à l'aide du raisonnement. »[289] De telles consignes

[287] Descartes René, *Les Principes de la Philosophie*, in Œuvres IX-2, publié par Adam et Tannery, Vrin, 1989, deuxième partie, art. 52, p. 93.

[288] Descartes René, *Les Principes de la Philosophie*, in Œuvres IX-2, publié par Adam et Tannery, Vrin, 1989, troisième partie, paragraphe 43, page 123.

[289] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 3.

sont souvent mises en application au 18e siècle, comme en témoigne l'article *accélération* de l'Encyclopédie, qui fournit une description de la genèse d'une importante loi de la physique, celle de la chute libre des corps sur terre. Sont mises en évidence les démarches, l'importance respective de l'expérience et de la démonstration :

> *Lorsqu'on examine les effets produits par de telles causes [les forces accélératrices], et qu'on ne connait point les causes en elles-mêmes, les effets doivent toujours être donnés indépendamment de la connaissance de la cause, puisqu'ils ne peuvent en être déduits : c'est ainsi que sans connaitre la cause de la pesanteur, nous apprenons par l'expérience que les espaces décrits par un corps qui tombe sont entre eux comme les carrés des temps. En général dans les mouvements variés dont les causes sont inconnues, il est évident que l'effet produit par la cause, soit dans un temps fini, soit dans un instant, doit toujours être donné par l'équation entre les temps et les espaces : cet effet une fois connu, et le principe de la force d'inertie supposé, on n'a plus besoin que de la géométrie seule et du calcul pour découvrir les propriétés de ces sortes de mouvements.*[290]

Condorcet est encore plus explicite sur le même thème dans ses *Essais d'analyse*, où il s'exprime en général sur l'établissement d'une loi de la physique : « La loi d'une force ou d'un phénomène nous peut être donnée, soit par une formule analytique, soit par une suite d'observations. Cette dernière manière est même la seule dont nous connaissions immédiatement les choses qui s'offrent à nos sens : la première n'a lieu que lorsque nous employons un résultat déjà déduit des observations, ou une hypothèse indiquée par l'analogie. »[291] D'Alembert confirme dans les mêmes termes que la théorie vient en appui de l'observation, qui a permis en premier de se faire une idée plus ou moins précise de la loi : « […] Le premier objet réel de la physique *expérimentale* sont les propriétés générales des corps, que l'observation nous fait connaitre, pour ainsi dire, en gros, mais dont l'expérience seule peut mesurer et déterminer les effets ; tels sont, par exemple, les phénomènes de la pesanteur. Aucune théorie n'aurait pu nous faire trouver la loi que les corps pesants suivent dans leur chute verticale, mais cette loi une fois connue par l'expérience, tout ce qui appartient au mouvement des corps pesants, soit rectiligne soit curviligne, soit incliné soit vertical, n'est

---

290 Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article accélération.

291 Condorcet, *Essais d'analyse*, Paris, Didot, 1768, tome premier, Sur le système du monde, p 6.

plus que du ressort de la théorie ; et si l'expérience s'y joint, ce ne doit être que dans la même vue et de la même manière que pour les lois primitives de l'impulsion. »[292]

Ces commentaires nous ont montré l'état de la réflexion au 18e siècle au sujet de la méthode à suivre et de la découverte en physique. Nous semblons donc assez loin de l'idée qu'on peut se faire de la séparation de la science en deux familles inconciliables : les sciences d'observation qui veulent décrire la réalité des phénomènes, et les sciences déductives, ou sciences du raisonnement, qui veulent fournir la raison explicative des choses. Le commentaire final doit être pour d'Alembert qui écrit dans l'article *expérimental* de l'Encyclopédie : « […] Que de choses n'aurais-je point à dire ici sur les sciences qu'on appelle physico-mathématiques, sur l'astronomie physique entre autres, sur l'acoustique, sur l'optique et ses différentes branches, sur la manière dont l'expérience et le calcul doivent s'unir pour rendre ces sciences le plus parfaites qu'il est possible. »[293]

Nous allons voir qu'en terme de pratique scientifique, plus que dans le débat entre rationalistes et empiristes qui fut en fait assez peu mouvementé au 18e siècle chez les physiciens, on a assisté à une opposition plus conflictuelle et plus durable sur un autre thème, celui de l'utilisation des hypothèses, tout en aboutissant peut-être finalement à une forme de consensus. Notons que nous ne parlons pas ici des hypothèses en tant que données de l'énoncé comme en mathématiques, mais en tant que supposition, ou proposition, permettant de déduire des propriétés dont on aura à vérifier l'accord avec l'observation.

---

[292] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article expérimental.

[293] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article expérimental.

2.2.3 Le rôle des hypothèses

L'impression de l'ouvrage de Copernic *Des révolutions des orbes célestes* a eu lieu en 1543 à Nuremberg sous la surveillance d'un théologien de cette ville, Osiander, désigné par Copernic à l'instigation de son disciple Rhéticus. Osiander, craignant les réactions des autorités devant le contenu héliocentriste du livre, décida d'écrire une lettre-préface pour prévenir les critiques. Le rôle de l'astronome, dit-il, est d'inventer des hypothèses permettant de calculer les mouvements des planètes de telle sorte que les résultats concordent avec les mouvements observés. Il n'est pas indispensable que les hypothèses soient vraies. Celles de cet ouvrage ne doivent pas être considérées comme plus vraisemblables que les hypothèses des anciens, mais elles permettent avec plus de facilité d'atteindre des résultats conformes aux observations. La science doit, selon une phrase passée à la postérité, « sauver les phénomènes », et c'est ce à quoi parvient Copernic. On a vu depuis que la précaution prise par Osiander avait une raison d'être puisque, au siècle suivant, Galilée sera poursuivi par les autorités ecclésiastiques pour ne pas avoir voulu se prémunir de la même manière en posant sa théorie comme un modèle mathématique et au contraire en soutenant la réalité de l'héliocentrisme.

Ce préambule nous montre l'ancienneté de la notion d'hypothèse utilisée en science. Ce qui était d'après Osiander une supposition mathématique gratuite pour *sauver les phénomènes* va être à nouveau utilisé par Descartes dans ses *Principes de philosophie,* mais dans un contexte différent. Il a inventé un Monde basé sur la théorie des *Tourbillons,* dont la description lui semblait à son époque en accord avec les observations. Il écrit dans son ouvrage *qu'il n'est pas vraisemblable que les causes desquelles on peut déduire tous les phénomènes, soient fausses* puis fait suivre cette proposition d'une mise en garde contre les accusations qu'il recevra et qu'il prévoit déjà, dans l'article 44 dont le titre est *Que je ne veux point toutefois assurer que celles que je propose sont vraies :*

> *[…] je désire que ce que j'écrirai soit seulement pris pour une hypothèse, laquelle est peut être fort éloignée de la vérité ; mais encore que cela fut, je croirai avoir beaucoup fait, si toutes les choses qui en seront déduites, sont entièrement conformes aux expériences : car si cela se trouve, elle ne sera pas moins utile à la vie que si elle était vraie, parce qu'on s'en pourra servir en même façon pour disposer les causes naturelles à produire les effets qu'on désirera.*[294]

Le mot hypothèse est revendiqué, ainsi que la possibilité d'erreur. Le critère de validité sera la conformité des données avec l'expérience. Il s'accorde même le droit de se tromper dans l'article suivant : « Que même j'en supposerai ici quelques-unes que je crois fausses. Et tant s'en faut que je veuille qu'on croie toutes les choses que j'écrirai, que même je prétends en proposer ici quelques-unes que je crois absolument être fausses. »[295] et il se justifie dans cet article par le fait que l'intelligibilité et la simplicité lui semblent devoir être prioritaires pour essayer d'expliquer la nature : « … nous ferons mieux entendre quelle est généralement la nature de toutes les choses qui sont au monde, si nous pouvons imaginer quelques principes qui soient fort intelligibles et fort simples, desquels nous fassions voir clairement que les astres et la terre, et enfin tout le monde visible aurait pu être produit ainsi que de quelques semences, bien que nous sachions qu'il n'a pas été produit en cette façon ; que si nous la décrivions seulement comme il est, ou bien comme nous croyons qu'il a été créé. »[296]

Quand Madame du Châtelet écrit ses *Institutions de physique*, la polémique au sujet de l'utilisation des hypothèses en physique occupe les esprits depuis le début du 18^e^ siècle.

---

[294] Descartes René, *Les Principes de la Philosophie*, in Œuvres IX-2, publié par Adam et Tannery, Vrin, 1989, troisième partie, paragraphe 44, page 123.

[295] ibid troisième partie, art. 45 pp. 123.

[296] ibid troisième partie, art. 43, 44, et 45 pp. 123.

Newton s'est opposé à aux hypothèses de Descartes sur les tourbillons, et refuse l'utilisation d'hypothèses dans ses *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*. On a retenu la célèbre phrase « hypotheses non fingo » (« Quant à la raison de ces propriétés de la gravité, je n'ai pu encore la déduire des phénomènes, et je ne forge pas d'hypothèses. »[297]), qui indiquait son refus de la méthode utilisée par Descartes. Pourtant Newton prône l'existence d'une force à distance que ses détracteurs dénonceront au mieux comme une hypothèse, mais pire, pour beaucoup comme un retour aux causes occultes d'Aristote et des philosophes scolastiques. Pour éviter les critiques qu'il pressent, le savant anglais écrit que cette force est purement mathématique et n'a donc pas d'existence réelle. On a presque l'impression de se retrouver devant la lettre-préface d'Osiander.

La préface de la première édition des *Institutions newtoniennes* de Pierre Sigorgne consacre quelques lignes aux hypothèses qu'en bon newtonien il réfute. Dans la philosophie qu'il préconise (celle de Newton), il n'y a de place que pour le vrai :

> *… et l'on sait qu'il n'y a jamais bien loin de l'hypothèse à la fiction, ou au mensonge : ceux qui seraient encore attachés à cette façon de raisonner en physique, doivent se ressouvenir de la Dent d'or, et ils conviendront sans peine que les pensées les plus ingénieuses des hommes, dès qu'elles ne partent point de l'expérience, sont toujours infiniment au-dessous des procédés de la nature, et que le système qui aurait la plus heureuse application aux phénomènes, dès là qu'il serait fondé sur un principe purement imaginé, ne pourrait guère être comparé qu'à ces songes suivis, qui au réveil nous laissent dans une incertitude d'autant plus grande sur leur réalité, qu'ils ont plus l'air de la vérité par l'accord que l'on croit voir entre leurs parties.*[298]

L'auteur évoque dans sa présentation la *Dent d'or*. Fontenelle raconte dans l'*Histoire des Oracles* qu'en 1593 une dent en or avait poussé dans la bouche d'un enfant habitant en

[297] Newton, Isaac, (1642-1727), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687, traduction de feue la Marquise du Chastellet, Paris, 1756, Scholie général.
[298] Sigorgne, *Institutions newtoniennes*, Paris, Quillau, 1747, préface pp 5 et 6.

Silésie. Un médecin s'empara de cette histoire, et prétendit que la poussée de cette dent était en partie naturelle, et en partie miraculeuse ; plusieurs auteurs ont diffusé cette histoire, jusqu'à ce qu'un orfèvre venu examiner l'enfant s'aperçoive qu'une feuille d'or avait été appliquée sur la dent. Fontenelle a commencé le récit de cette histoire par la phrase suivante resté célèbre : « Assurons-nous bien du fait, avant que de nous inquiéter de la cause. », à laquelle Sigorgne fait allusion dans sa préface.

Il faut attendre 1740 et la publication des *Institutions de physique* pour avoir une étude complète sur les hypothèses et leur utilisation en physique. Dès l'avant-propos des *Institutions de physique*, Madame du Châtelet affirme l'omniprésence des hypothèses dans l'élaboration des théories scientifiques, en particulier en astronomie. La seule réserve mise en avant concerne le risque de confusion entre l'hypothèse proposée et la vérité :

> *VIII. Un des torts de quelques philosophes de ce temps, c'est de vouloir bannir les hypothèses de la physique ; elles y sont aussi nécessaires que les échaffauts dans une maison que l'on bâtit ; les échaffauts deviennent inutiles, mais on n'aurait pu l'élever sans leur secours. Toute l'astronomie, par exemple, n'est fondée que sur des hypothèses, et si on les avait toujours évitées en physique, il y a apparence qu'on n'aurait pas fait tant de découvertes ; aussi rien n'est-il plus capable de retarder les progrès des sciences que de vouloir les en bannir, et de se persuader que l'on a trouvé le grand ressort qui fait mouvoir toute la nature, car on ne cherche point une cause que l'on croit connaître, et il arrive par là que l'application des principes géométriques de la mécanique aux effets physiques, qui est très difficile et très nécessaire, reste imparfaite, et que nous nous trouvons privés des travaux et des recherches de plusieurs beaux génies qui auraient peut-être été capables de découvrir la véritable cause des phénomènes.*[299]

Les propos des scolastiques utilisant un *jargon inintelligible* ont pu être contestés par l'étude approfondie qui en a été faite et les nouveaux arguments qui ont été avancés, mais, plus dangereux, une hypothèse ingénieuse peut tromper plus facilement et plus longtemps un esprit séduit :

---

[299] Madame du Châtelet, *Institutions de Physique*, Paris, Prault fils, 1740, avant-propos.

Il est vrai que les hypothèses deviennent le poison de la philosophie quand on les veut faire passer pour la vérité, et peut-être même sont-elles plus dangereuses alors que ne l'était le jargon inintelligible de l'École ; car ce jargon étant absolument vide de sens, il ne fallait qu'un peu d'attention à un esprit droit pour en apercevoir le ridicule, et pour chercher ailleurs la vérité ; mais une hypothèse ingénieuse et hardie, qui a d'abord quelque vraisemblance, intéresse l'orgueil humain à la croire, l'esprit s'applaudit d'avoir trouvé ces principes subtils, et se sert ensuite de toute sa sagacité pour les défendre. La plupart des grands hommes qui ont fait des systèmes nous en fournissent des exemples, ce sont de grands vaisseaux emportés par des courants, ils font les plus belles manœuvres du monde, mais le courant les entraîne.[300]

Madame du Châtelet revient plus loin sur la théorie newtonienne et ce qui est à ses yeux l'« hypothèse-attraction », puisqu'il ne s'agit nullement d'une propriété mise en évidence dans la nature, mais elle ne cherche pas à rejeter cette hypothèse :

Cette attraction est selon eux (les newtoniens), une propriété donnée de Dieu à toute la matière, par laquelle toutes ses parties tendent l'une vers l'autre en raison directe de leur masse, et en raison inverse du carré de leur distance. […] Il est certain, que si on accorde aux newtoniens cette supposition d'une attraction répandue dans toutes les parties de la matière, ils expliquent merveilleusement par cette attraction les phénomènes astronomiques, la chute des corps, le flux et el reflux de la mer, les effets de la lumière, la cohésion des corps, les opérations chimiques ; et que presque tous les effets naturels deviennent une suite de cette force que l'on suppose répandue dans toute la matière, quand on l'a une fois admise.[301]

Le chapitre IV de l'ouvrage, entièrement consacré aux hypothèses, constitue une nouveauté dans le monde scientifique : les ouvrages de physique de l'époque ne leur accordaient pas une telle importance, et l'étude approfondie qu'elle en fait reste encore de nos jours tout à fait d'actualité, comme cette présentation : « Il faut un commencement dans toutes les recherches, et ce commencement doit presque toujours être une tentative très imparfaite, et

---

[300] Madame du Châtelet, *Institutions de Physique*, Paris, Prault fils, 1740, pp 9 et 10.
[301] *Ibid* p 315 et 317 (chapitre XVI, *De l'attraction*).

souvent sans succès. Il y a des vérités inconnues comme des pays, dont on ne peut trouver la bonne route qu'après avoir essayé de toutes les autres. Ainsi, il faut nécessairement que quelques uns risquent de s'égarer, pour montrer le bon chemin aux autres : ce serait donc faire un grand tort aux sciences, et retarder infiniment leurs progrès que d'en bannir avec quelques philosophes modernes, les hypothèses. »[302]

La définition précise du mot *hypothèse* qu'elle propose alors lui permet de souligner la quasi nécessité de son utilisation afin d'avancer dans la recherche : « Lorsque l'on prend certaines choses pour rendre raison de ce qu'on observe, et que l'on n'est pas encore en état de démontrer la vérité de ces choses que l'on a supposées, on fait une hypothèse. Ainsi, les philosophes établissent des hypothèses pour expliquer par leur moyen les phénomènes dont nous ne sommes point en état de découvrir la cause par l'expérience, ni par la démonstration. »[303]

Les paragraphes suivants s'attachent à rappeler les inconvénients d'une telle entreprise : propositions souvent inutiles, ou qui conduisent à plusieurs solutions, ou qui n'aboutissent pas, ou qui sont en contradiction avec les faits observés, alors que le travail engagé est *long* et *pénible*. Des exemples issus de l'histoire de l'astronomie sont fournis, les acteurs étant Ptolémée, Copernic puis Huygens, avec chez l'auteur l'objectif de montrer le rôle majeur des hypothèses dans les découvertes, même si les inconvénients cités peuvent être un frein. Il s'agit de les utiliser efficacement, en prenant appui sur les expériences et les mesures, et en les modifiant, éventuellement afin de préserver *l'accord entre l'hypothèse et les observations*. Madame du Châtelet énonce les règles à respecter lors de l'énoncé d'hypothèses, avec la recherche de la vérité constamment en point de mire ; elle se réfère au principe de raison suffisante sur lequel nous reviendrons plus loin :

[302] *Ibid* p 75, paragraphe 54.
[303] *Ibid* p 76, paragraphe 56.

[…] La première de toutes est, qu'elle ne soit point en contradiction avec le principe de raison suffisante, ni avec aucun de ceux qui servent de fondement à nos connaissances. La seconde règle est de se bien assurer des faits qui sont à notre portée, et de connaître toutes les circonstances qui accompagnent le phénomène que nous voulons expliquer. Ce soin doit précéder toute hypothèse inventée pour en rendre raison ; car celui qui hasarderait une hypothèse sans cette précaution, courrait le risque de voir renverser son explication par des faits nouveaux dont il avait négligé de s'instruire ; […]. Mais lorsque l'on peut se flatter de connaître le plus grand nombre des circonstances qui accompagnent un phénomène, alors on peut en chercher la raison par des hypothèses, au hasard sans doute de se corriger, et d'être corrigé bien souvent : mais ces efforts que l'on fait pour trouver la vérité sont toujours glorieux, quand même ils seraient sans fruit.[304]

S'ensuivent une série de conseils qui peuvent faire figure de maximes à retenir : « Une expérience ne suffit pas pour admette une hypothèse, mais une seule suffit pour la rejeter lorsqu'elle lui est contraire. […] Une hypothèse peut être vraie dans une de ses parties, et fausse dans l'autre : alors la partie qui se trouve en contradiction avec l'expérience, doit être corrigée. »[305] Une recherche d'exhaustivité est nécessaire pour arriver à une quasi-certitude, avec la réserve qu'un seul contre-exemple nous fait renoncer à l'hypothèse énoncée : « […] Ainsi, quand on fait une hypothèse, on doit déduire toutes les conséquences qui peuvent en être légitimement déduites, et les comparer ensuite avec l'expérience ; car s'il arrive que toutes ces conséquences soient confirmées par les expériences, la probabilité acquiert son plus haut degré : mais s'il y en a une seule à laquelle elles soient contraires, on doit rejeter, ou l'hypothèse entière, si cette conséquence est une suite de l'hypothèse entière, ou cette partie de l'hypothèse dont elle est une suite nécessaire. »[306]

Un des intérêts principaux de ce chapitre est la conscience forte que montre l'auteur devant les limites de cette utilisation des hypothèses, concrétisées par leur degré de probabilité, et la volonté d'augmenter ce degré par des modifications éventuelles, jusqu'à les faire approcher autant que faire se peut de la vérité scientifique :

[304] *Ibid* p 82.
[305] *Ibid* p 83.
[306] *Ibid* pp 84 à 86.

> *Les hypothèses ne sont donc que des propositions probables qui ont un plus grand, ou un moindre degré de certitude, selon qu'elles satisfont à un nombre plus ou moins grand des circonstances qui accompagnent le phénomène que l'on veut expliquer par leur moyen ; et comme un très grand degré de probabilité entraîne notre assentiment, et fait sur nous presque le même effet que la certitude, les hypothèses deviennent enfin des vérités, quand leur probabilité augmente à un tel point, qu'on peut la faire moralement passer pour une certitude.*[307]

Le paragraphe de conclusion du chapitre consacré aux hypothèses illustre parfaitement la méthode utilisée par l'auteur dans son ouvrage : prises de position claires sur les problèmes scientifiques de son époque, mais simultanément respect du travail des savants et ouverture d'esprit devant les sujets de querelles qui lui semblent dépassées :

> *En distinguant entre le bon et le mauvais usage des hypothèses, on évite les deux extrémités, et sans se livrer aux fictions, on n'ôte point aux sciences une méthode très nécessaire à l'art d'inventer, et qui est la seule qu'on puisse employer dans les recherches difficiles qui demandent la correction de plusieurs siècles, et les travaux de plusieurs hommes, avant d'atteindre à une certaine perfection ; et l'on ne doit point craindre que par cette méthode la philosophie devienne un amas de fables : car on a vu qu'on ne peut faire une bonne hypothèse que lorsqu'on a un grand nombre des faits et des circonstances qui accompagnent le phénomène qu'on veut expliquer, et que l'hypothèse n'est vraie et ne mérite d'être adoptée que lorsqu'elle rend raison de toutes les circonstances. Les bonnes hypothèses seront toujours l'ouvrage des plus grands hommes. Copernic, Kepler, Hughens, Descartes, Leibnitz, M Newton lui-même, ont tous imaginé des hypothèses utiles pour expliquer les phénomènes compliqués et difficiles ; et les exemples de ces grands hommes et leur succès doivent nous faire voir combien ceux qui veulent bannir les hypothèses de la philosophie, entendent mal les intérêts des sciences.*[308]

Il est difficile d'évaluer l'influence réelle de l'ouvrage de physique d'Émilie du Châtelet sur ses contemporains. Par contre son chapitre consacré aux hypothèses a eu une

[307] *Ibid* pp 86 et 87.
[308] *Ibid* pp 88 et 89.

postérité certaine, au moins à deux titres. Condillac par exemple a écrit en 1749 un *Traité des Systèmes* dans lequel il donne son avis au sujet de l'utilisation des hypothèses. On ne peut s'empêcher de penser aux *Institutions de Physique* quand on lit par exemple dans ce *Traité* au sujet des *suppositions*, mot se substituant à *hypothèses* chez Condillac :

> *Quand nos suppositions, disent ces physiciens, seraient fausses ou peu certaines, rien n'empêche qu'on n'en fasse usage pour arriver à de grandes connaissances. C'est ainsi qu'on emploie, pour élever un bâtiment, des machines qui deviennent inutiles quand il est achevé. Ne sommes-nous pas redevables au système Cartésien, des plus belles et des plus importantes découvertes qu'on a faites, soit dans le dessein de le confirmer, soit dans le dessein de le combattre ? Les expériences de Huyghens, Boile, Mariote, Newton, sur l'air, le choc, la lumière et les couleurs, en sont des exemples fameux.*
>
> *Je réponds d'abord que les suppositions sont à un système, ce que les fondements sont à un édifice. Ainsi, il n'y a pas assez de justesse à les comparer avec les machines dont on se sert pour construire un bâtiment.*[309]

Un signe fort nous permet d'accorder à ce chapitre des *Institutions de physique* un rôle important dans le monde des savants. L'article *Hypothèse* de l'Encyclopédie reprend l'essentiel de ce qui est écrit dans les *Institutions*, quelquefois sans même changer les phrases de Madame du Châtelet. On a par exemple : « Hypothèse**,** s. f. (Métaphysiq.) c'est la supposition que l'on fait de certaines choses pour rendre raison de ce que l'on observe, quoique l'on ne soit pas en état de démontrer la vérité de ces suppositions. Lorsque la cause de certains phénomènes n'est accessible ni à l'expérience, ni à la démonstration, les Philosophes ont recours aux hypothèses. »[310]

[309] Condillac, *Traité des Systèmes*, in Œuvres complètes, tome II, Paris, Houel, 1798, pp. 342 et 343.

[310] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article hypothèse.

Signalons également que les deux références d'ouvrages fournies à la fin de l'article *hypothèses* de L'Encyclopédie sont les *Institutions de physique* et le *Traité des systèmes* de Condillac.

Pour conclure on peut citer d'Alembert qui défend l'esprit d'analogie, les conjectures et donc les hypothèses bien utilisées : « Au reste, quand je proscris de la Physique la manie des explications, je suis bien éloigné d'en proscrire cet esprit de conjecture, qui tout à la fois timide et éclairé conduit quelquefois à des découvertes, pourvu qu'il se donne pour ce qu'il est, jusqu'à ce qu'il soit arrivé à la découverte réelle : cet esprit d'analogie, dont la sage hardiesse perce au-delà de ce que la nature semble vouloir montrer, et prévoit les faits, avant que de les avoir vus. Ces deux talents précieux et si rares, trompent à la vérité quelquefois celui qui n'en fait pas assez sobrement usage : mais ne se trompe pas ainsi qui veut. »[311]

Les études successives des concepts et des méthodes nous ont montré une évolution dans les conceptions et les idées, avec des points d'accord, mais aussi de nombreux débats qui subsistent et donnent à voir au final une situation plus complexe que prévu, restant en devenir. Nous devrons aussi faire une place à tous les personnages qui ont transmis les connaissances acquises, en les faisant évoluer, à travers leur perception et leur compréhension.

[311] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article *expérimental*.

2.3 Quelle épistémologie au 18e siècle ?

2.3.1 Complexité de la situation ; évolution vers un prépositivisme

Comme nous avons pu l'approcher précédemment, nous constatons que les catégories épistémologiques permettent de se repérer, mais elles sont souvent simplificatrices, et la réalité présente une réelle complexité. On peut, comme cela a souvent été fait, essayer de placer les savants que nous avons étudiés dans des catégories, mais la lecture de leurs œuvres ne permet pas toujours de décider simplement, ainsi que nous l'avons déjà vu. Quand on parle de Galilée, on le catalogue le plus souvent comme un des fondateurs de la méthode expérimentale, ce que fait par exemple Ludovico Geymonat dans son *Galilée*, en insistant sur ses expériences, alors qu'Alexandre Koyré met plutôt en avant sa méthode théorique mathématisée et son platonisme. Nous avons présenté un Descartes plus rationaliste qu'empiriste, mais qui ne néglige pas l'expérience, un Newton empiriste, mais qui organise toute sa mécanique autour d'une méthode mathématique hypothético-déductive.

Leurs successeurs ne nous donnent pas non plus la possibilité de les classer précisément. On a déjà nommé Leibniz qui, au cours de sa carrière scientifique, est passé par les étapes suivantes : sympathie pour les scolastiques, cartésianisme ordinaire, critique éclairée du cartésianisme (rejets des préceptes cartésiens de la méthode trop vagues, le premier par exemple, celui de l'évidence, critique du doute cartésien qui s'appuie sur la volonté de rejeter les choses douteuses comme si elles étaient fausses, car il ne permet pas d'améliorer la connaissance, et refus de ses lois des chocs), critique forte de Newton (opposition à la force à distance, croyance aux tourbillons cartésiens).Il terminera son parcours en proposant une méthode personnelle s'appuyant sur trois éléments, la démonstration logique à partir du principe de contradiction, l'utilisation des expériences, la démonstration métaphysique à partir du principe de raison suffisante. Nous pouvons ajouter un projet utopique d'une nouvelle méthode « universelle » pour raisonner dans les sciences, en particulier en physique. Dans sa *Préface à la science générale*, il fait part de sa recherche pour une nouvelle méthode applicable en tous points. Il s'agit de prendre modèle sur la démonstration en mathématiques. La preuve y est établie sur le papier, et donc avec des caractères qui représentent la chose étudiée, et non pas la chose même. Leibniz écrit : « De là il est manifeste, que si l'on pouvait trouver des caractères ou signes propres à exprimer toutes nos pensées, aussi nettement et exactement que l'arithmétique exprime les nombres, ou que [l'algèbre] l'analyse géométrique exprime les lignes, on pourrait faire en toutes les matières autant qu'elles sont sujettes au raisonnement tout ce qu'on peut faire en arithmétique et en géométrie. Car toutes les recherches qui dépendent du raisonnement se feraient par la transposition de ces caractères, et par une espèce de calcul; ce qui rendrait l'invention des belles choses tout à fait aisée.»[312] Il conclut en écrivant que venir à bout de ce projet est une de ses ambitions.

La position de d'Alembert n'est pas plus facile à préciser, son newtonianisme étant modulé par ses réserves devant l'utilisation des forces, en particulier de la force de gravitation, et de certaines relations. Il nous dit que quand on a déterminé expérimentalement la relation entre espace et temps dans un mouvement de chute libre, il n'est besoin que d'étudier mathématiquement cette relation : « Il est donc inutile d'avoir recours à ce principe dont tout le monde fait usage aujourd'hui, que la force accélératrice ou retardatrice est

[312] Leibniz, *Opuscules et fragments inédits*, extraits des manuscrits de la bibliothèque royale de Hanovre, Louis Couturat, Paris, Alcan, 1903, préface à la science générale.

proportionnelle à l'élément de la vitesse ; principe appuyé sur cet unique axiome vague et obscur, que l'effet est proportionnel à sa cause. Nous n'examinerons point si ce principe est de vérité nécessaire ; nous avouerons seulement que les preuves qu'on en a données jusqu'ici ne nous paraissent pas fort convaincantes : nous ne l'adopterons pas non plus avec quelques géomètres, comme de vérité purement contingente, ce qui ruinerait la certitude de la mécanique, et la réduirait à n'être plus qu'une science expérimentale. Nous nous contenterons d'observer que, vrai ou douteux, clair ou obscur, il est inutile à la mécanique, et que par conséquent il doit en être banni. »[313] De plus il ne rejette pas entièrement les thèses cartésiennes, comme ne manquera pas de lui rappeler Diderot.

Nous avons relevé d'autres aspects de cette complexité : par exemple dans le positionnement de scientifiques devant le rôle des mathématiques dans la physique, de ceux qui à l'instar de Bacon refusent de leur accorder une place importante, tels Réaumur, Buffon, Castel, Diderot (on notera qu'on trouve parmi eux à la fois des cartésiens et des newtoniens), à ceux qui, comme Galilée et Descartes, prônent une physique mathématique, tels Clairaut, d'Alembert, Madame du Châtetet, Sigorgne, Pemberton, Maupertuis, puis plus tard Lagrange et Laplace. Un auteur comme Fontenelle exprime un certain malaise devant la physique moderne en train de prendre la pouvoir, à la fois mathématisée et utilisant selon lui des concepts imaginés :

> *Il y a, pour ainsi dire, deux mondes bien différents, l'un mathématique et l'autre physique. Le mathématique, qu'on peut appeler aussi métaphysique, n'existe que dans les idées du géomètre : il suppose des infiniment petits, le point sans dimension, la ligne sans largeur, la surface sans profondeur, le cercle et toutes les figures polygones d'une perfection seulement imaginée : ajoutons le repos absolu, des corps d'une dureté invincible etc. L'équilibre parfait est dans cette même classe, aussi bien que le vide et la gravitation des corps par eux-mêmes. Toutes ces suppositions sont la base d'un calcul, qui sans cela ne pourrait être exact, et qui sans l'exactitude ne pourrait être porté à la démonstration. Mais rien de tout cela ne se trouve exactement dans la nature, non plus que les*

313 Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article accélération.

indiscernables de Leibnitz : c'est une étrange illusion que d'abuser de ces abstractions, en les transportant dans le monde physique, comme des êtres réels.[314]

Il est peut-être utile aussi, sans tomber dans la caricature, de signaler l'importance des nationalités : les français et les allemands sont majoritairement plus rationalistes et favorables au mécanisme, et les anglais, plus facilement empiristes et favorables aux actions à distance. Restent les hollandais tels Huygens et ceux qu'on a appelés les expérimentateurs, qu'on classerait plus proches des rationalistes par certains côtés (Huygens restera un opposant farouche aux forces à distance) et pionniers de l'expérimentation de précision. On peut néanmoins lire des avis critiquant cette positon figée au sujet de newtoniens anglais, leibniziens allemands, et cartésiens français, comme Madame du Châtelet qui écrit, : « La recherche de la vérité est la seule chose dans laquelle l'amour de votre pays ne doit point prévaloir, et c'est assurément bien mal à propos qu'on a fait une espèce d'affaire nationale des opinions de Newton, et de Descartes : quand il s'agit d'un livre de physique, il faut se demander s'il est bon, et non pas si l'auteur est anglais, allemand ou français. »[315]

Dans les années 1740, le nombre de membres de l'Académie royale des sciences qui sont newtoniens va en croissant. Mais dans le monde savant il y a des newtonianismes bien différents : Maupertuis, et son principe de moindre action bien peu newtonien, Voltaire militant mais pas très scientifique, Sigorgne qui devient un adepte des corpuscules ultra-mondains de Lesage, Madame du Châtelet, qui préconise un newtonianisme fortement teinté de leibnizianisme, d'Alembert, convaincu par le succès de la loi de gravitation universelle, mais réticent devant l'utilisation des forces. Ceux qui persistent à être cartésiens le sont également avec des diversités très grandes, depuis Malebranche qui va continuellement évoluer dans ses pensées, Privat de Molières qui essaie de concilier les lois de Newton et de Kepler avec les tourbillons, Castel qui accepte les résultats de Newton mais refuse l'utilisation abusive des mathématiques, Bernoulli qui va passer d'un cartésianisme affirmé à un

314 Fontenelle, *Théorie des Tourbillons cartésiens*. Paris, Guérin, 1752, p X à XII.
315 Madame du Châtelet, *Institutions de physique*, 1740, p 7.

newtonianisme de raison, etc… On voit donc cette complexité perdurer dans le newtonianisme et le cartésianisme.

Afin de poursuivre dans notre comparaison de personnages qui sont intervenus à cette période, nous pouvons citer Varignon qui présente un profil scientifique très contrasté. Jésuite, membre de l'Académie des sciences, participant au groupe des malebranchistes, Varignon est intermédiaire entre le 17^{e} et le 18^{e} siècle. Né en 1654 et mort en 1722, cartésien et donc adepte des tourbillons et du mécanisme, il est un grand connaisseur du latin et du grec, réputé aussi pour ses travaux en mathématiques (il a démontré le théorème de Varignon qui dit que les milieux des côtés d'un quadrilatère quelconque forment un parallélogramme) et son apport à la théorie de la statique (décomposition d'une force en deux autres, énoncé du théorème des moments des forces). Enfin il est resté célèbre comme promoteur de l'utilisation du calcul différentiel leibnizien dans la physique newtonienne pour retrouver les lois de la mécanique sous une forme analytique (voir à ce sujet notre paragraphe 2.1.3). Il était donc intéressant pour nous d'évoquer la situation paradoxale d'un mathématicien et physicien brillant, qui est à l'origine de travaux majeurs, mais qui a aussi travaillé sur les causes de la pesanteur, et donné un ouvrage qui nous semble étonnant. Le livre, *Nouvelles conjectures sur la pesanteur*, de 1690, est donc une tentative d'explication des causes de la pesanteur. L'auteur s'appuie sur l'observation suivante : si un morceau de bois tombe sur la terre, cela doit faire soupçonner que quelque corps le pousse vers la terre. Ce corps n'est pas un corps visible, et la comparaison avec l'action du vent sur un objet ou une voile le conduit à proposer l'explication suivante : un morceau de bois à une certaine distance du sol subit des poussées égales d'air à l'est et à l'ouest, au sud et au nord (même quantité d'air de chaque côté), mais inégales au-dessus et en-dessous (hauteur d'air faible en-dessous, très grande au-dessus). Le morceau de bois sera donc plus poussé par le haut que par le bas, ce qui le fait descendre. Le responsable de la pesanteur est donc la colonne d'air qui surplombe l'objet. S'ensuivent des explications sur les écarts de pesanteur entre des objets de mêmes dimensions mais constitués de matériaux différents. L'ouvrage d'environ deux cent cinquante pages s'appuie sur des mathématiques, géométrie, algèbre et analyse. Une telle cohabitation de productions scientifiques très différentes chez le même homme semble digne de figurer dans notre paragraphe concernant la complexité de la situation.

Nous nous intéresserons aussi dans cette partie à un texte de Dufieu de 1758 qui présente plusieurs facettes pouvant nous éclairer sur la pratique de la science au milieu du 18e siècle. Il s'agit plutôt d'un ouvrage de vulgarisation, son titre, *Manuel physique, ou manière courte et facile d'expliquer les phénomènes de la nature,* nous incitant à le croire tel. On décèle dans l'expression (trace d'une pensée scolastique encore présente ?) une forme d'animisme dans la vision du soleil, on repère des termes comme *tendance, éprouve, triomphe, exerce, emporte, …*

> *Les orbites des planètes sont des ellipses dont le soleil est comme le foyer commun. Il est démontré qu'un mobile qui décrit une ellipse, éprouve une tendance ou gravitation vers le corps qui se trouve à l'un des foyers, laquelle varie en raison inverse du carré de la distance du mobile à ce corps. Les planètes pèsent donc sur le soleil suivant cette proportion : elles pèsent aussi, disent les Newtoniens, les unes sur les autres, et le soleil lui-même éprouve une sorte d'action ou d'attraction de leur part. Mais à raison de l'excès de sa masse, il triomphe de leurs attractions particulières ; et en vertu de celle qu'il exerce sur elle, combinée avec le mouvement de projection qui leur a été imprimé, et qui subsiste toujours, il les emporte en quelque sorte autour de lui dans des orbites différentes.*[316]

Il poursuit par une reconnaissance de la validité des lois de Newton, et conclut par un constat d'échec de la théorie des tourbillons cartésiens

> *La gravitation ou attraction varie donc encore dans cette hypothèse en raison directe des masses. Il faut avouer qu'elle s'accommode, à peu de choses près, aux phénomènes célestes, et que la loi de l'attraction supposée, les observations se trouvent merveilleusement conformes aux conséquences qu'on en tire par le calcul. Le système de Newton est donc au moins bien séduisant ; et il est naturel qu'un géomètre se fasse un point d'honneur de l'admettre. C'en est donc fait des tourbillons cartésiens qui ne donnent, dit-on, que quelques explications vagues et bien générales des mouvements des cieux. La mode en est passée, M de Fontenelle n'est plus.*[317]

[316] Jean Ferapie Dufieu, *Manuel physique*, ou manière courte et facile d'expliquer les phénomènes de la nature, Lyon, Regnault, seconde édition, 1760, (première édition 1758), p 535.
[317] Jean Ferapie Dufieu, *Manuel physique*, ou manière courte et facile d'expliquer les phénomènes de la nature, Lyon, Regnault, seconde édition, 1760, (première édition 1758), p 536.

Le paragraphe suivant semble au contraire nier ce qui vient d'être écrit, par le fait qu'il est dit qu'il n'y a pas de contradiction entre les tourbillons et l'attraction, la différence ne vient que d'une question de vocabulaire d'après Dufieu : « Kepler, avant Newton, avait dit que les vitesses des planètes autour du soleil étaient entre elles en raison renversée de leurs distances à cet astre ; et ce qui en était une suite, que les distances des planètes étaient entre elles comme les racines cubiques des carrés des temps de leurs révolutions. Les observations des astronomes se sont toujours accordées à confirmer ce rapport. C'est une loi fondamentale dans l'astronomie ; elle tire son origine d'un certain degré de mouvement précis imprimé à tout le système solaire, et d'une sorte d'équilibre qui règne dans les cieux. Dans l'opinion des cartésiens, cet équilibre se trouve entre les différentes couches du tourbillon solaire ; couches sphériques qui, par une juste compensation de leurs vitesses et de leurs grandeurs réciproques, peuvent avoir une même force centrifuge. De cet équilibre des forces centrifuges, non seulement il en naît comme nécessairement la règle de Kepler, mais encore le principe fondamental du livre de M. Newton, pourvu qu'on veuille bien appeler *force centrifuge*, ce qu'il appelait *attraction*. »[318] C'est cet ensemble d'approches juxtaposées mêlant des restes des formulations anciennes, des explications « tourbillonnaires » et d'autres « attractionnistes » qui nous montre que la physique telle qu'elle est présentée ici par Dufieu contient certains éléments tout à fait recevables à notre époque, et d'autres qui montrent qu'elle est encore en devenir. Se côtoient donc de la physique très mathématisée (celle de d'Alembert, Clairaut par exemple), et une physique puisant son vocabulaire et son approche dans des thèses souvent rejetées par presque tout l'ensemble de la classe scientifique. Il ne s'agit pas que d'une différence entre recherche et vulgarisation, il s'agit bien d'un décalage conceptuel encore présent dans de nombreux ouvrages.

Sans aller chercher un autre ouvrage de vulgarisation, nous pouvons retrouver de semblables différences, mais à un moindre degré, dans le traité de mécanique d'Ozanam, auteur d'ouvrages célèbres et reconnus, qui ont eu de nombreuses rééditions. Cet ouvrage de 1720 est un manuel destiné à des élèves. Ozanam démontre le théorème suivant : *La force qui*

[318] Jean Ferapie Dufieu, *Manuel physique*, ou manière courte et facile d'expliquer les phénomènes de la nature, Lyon, Regnault, seconde édition, 1760, (première édition 1758), p 537.

porte un corps perpendiculairement en haut, se diminue également. La démonstration est courte, mais sans appareil mathématique, on a l'impression de lire un texte de présentation de Galilée, donc écrit un siècle auparavant :

> *Parce que la pesanteur du corps jeté en haut, le porte en bas, son mouvement doit diminuer continuellement, et il doit entièrement se détruire, lorsque la force de l'impression qui le porte en haut, causée par la puissance qui l'a jeté, est égale à celle qu'il a par sa gravité, de se porter en bas, c'est-à-dire que le corps jeté en haut doit cesser de monter au moment que les deux impressions sont égales, après quoi il doit immédiatement descendre, parce qu'alors celle de la pesanteur commence à prévaloir à celle de la projection. Puisque donc la pesanteur empêche que le mouvement imprimé de bas en haut, n'ait autant de vitesse, et que par cet effet contraire elle détruit la force du mouvement de bas en haut, autant que serait celui qu'elle produirait de haut en bas, qui croît également, la force qui pousse en haut, doit aussi décroître également. Ce qu'il fallait démontrer.*[319]

Le scolie qui suit donne un exemple de mouvement et fournit des résultats numériques, mais se présente toujours comme une suite de phrases difficiles à suivre, que d'autres à l'époque d'Ozanam auraient certainement écrit avec un formalisme qui aurait allégé l'ensemble :

> *On voit aisément, que comme un corps tombant acquiert en temps égaux des degrés égaux de vitesse, et qu'au contraire en montant il perd en temps égaux des degrés égaux de vitesse, c'est-à-dire que les vitesses diminuent en montant en la même proportion inverse qu'elles augmentent en descendant ; ce corps passe par les mêmes espaces dans des temps égaux en montant et en descendant ; d'où il suit que les espaces parcourus par le mobile jeté vers le haut sont les mêmes dans un ordre renversé que ceux qui sont parcourus dans le même temps par le mobile tombant : de sorte que si le corps emploie cinq secondes de temps à monter à la hauteur de vingt-cinq pieds, et que l'espace qu'il parcourt à la première seconde, soit par exemple de neuf pieds, celui de la deuxième seconde sera de sept, celui de la troisième de cinq, celui de la quatrième de trois, et celui de la cinquième et dernière d'un pied ; jusqu'au moment où il se trouve en équilibre sans monter ni descendre ; après quoi il commencera d'abord à descendre en parcourant dans la même proportion inverse les mêmes espaces dans le même temps ; de sorte qu'à la première seconde de temps il descendra d'un pied, à la deuxième de trois, à la troisième de cinq, à la quatrième de sept, à la*

[319] Ozanam, *La méchanique*, tirée du cours de mathématique de M Ozanam, Paris, Jombert, 1720, de la statique, livre II, chapitre I, proposition III, p 88.

cinquième et dernière de neuf, mettant en cette façon cinq secondes de temps à descendre de 25 pieds, comme il en a demeuré à monter aussi de 25 pieds.[320]

« Le système de Newton règne maintenant sans opposition, et a pris l'empire le plus universel qui ait jamais été établi en philosophie. Ses principes, il faut l'avouer, ont un degré de solidité et de certitude qu'on chercherait en vain dans tout autre système. C'est ce que les esprits les plus sceptiques ne peuvent se refuser à reconnaître. »[321] En lisant ce texte écrit par le philosophe et économiste Adam Smith autour des années 1760, nous constatons un décalage important entre la réalité des faits décrits dans notre chapitre, qui nous montre une opinion et des avis beaucoup plus dispersés, et l'avis du philosophe écossais, qui est pourtant celui qui a perduré jusqu'à maintenant dans de nombreux documents consacrés à la science de cette époque. Pour confirmer la réalité de comportements si peu consensuels, nous avons tenté de mettre en avant la complexité de la situation, citant les savants impliqués, leur évolution, leurs conceptions d'une science liée à une métaphysique (Varignon recherche une cause à la pesanteur, beaucoup le feront après lui, Leibniz rêve d'une méthode universelle, …), l'influence éventuelle de leur origine géographique, le rôle des ouvrages dont beaucoup restent encore d'une facture qu'on pourrait qualifier de prénewtonienne, etc.

Pour illustrer encore mieux notre propos, en évitant de trop empiéter sur les problèmes métaphysiques qui seront étudiés dans notre troisième partie, nous pouvons traiter d'un débat de fond qui se poursuit toute la première moitié du 18^{e} siècle, et qui reste connu sous le nom de *querelle des forces vives*. Il s'agit de déterminer ce qui se conserve lors des mouvements et des chocs. Dans les *Principes de philosophie* Descartes écrit que c'est ce qu'il appelle la quantité totale de mouvement (égale à mv) qui se conserve. Selon lui, Dieu est à l'origine de ce principe, en ce qu'il a mu à l'origine, de façons différentes, les parties de la matière, et a conservé dans cette matière une égale quantité de mouvement. De ce même raisonnement est

[320] Ozanam, *La méchanique*, tirée du cours de mathématique de M Ozanam, Paris, Jombert, 1720, de la statique, livre II, chapitre I, proposition III, pp 88 et 89.

[321] Citation d'Adam Smith, in Dugald-Stewart, *Éléments de la philosophie de l'esprit humain*, tome deux, Paris, Ladrange et Hachette, édition revue, 1843, p 238.

issu aussi chez Descartes, comme nous l'avons vu, la justification du principe de l'inertie. Il écrit : « Lorsqu'une partie de la matière se meut deux fois plus vite qu'une autre, et que cette autre est deux fois plus grande que la première, nous devons penser qu'il y a tout autant de mouvement dans la plus petite que dans la plus grande ; et que toutefois et quantes que [322] le mouvement d'une partie diminue, celui de quelque autre partie augmente à proportion. »[323]

Leibniz va s'opposer au principe de conservation de la quantité de mouvement pour lui substituer un autre principe de conservation, celui de la force vive, mv^2. Il le fera en plusieurs occasions, d'abord dans des articles séparés, dont un intitulé « Sur une erreur mémorable de Descartes », puis dans son *Essay de dynamique* écrit en 1692. Pour convaincre son lecteur, il établit une proposition en s'appuyant sur l'axiome 2 : « Il faut autant de force[324] pour élever une livre à la hauteur de quatre pieds qu'il en faut pour élever quatre livres à la hauteur d'un pied. » et sur la proposition 1 : « Les vitesses que les corps pesants acquièrent en descendant sont comme les carrés des hauteurs dont ils descendent. » L'énoncé de la proposition 7 est le suivant : « Un corps de quatre livres de poids et de un degré de vitesse a la même force qu'un corps d'une livre de poids et de deux degrés de vitesse. Et par conséquent si toute la force de celui-là doit être transférée sur un corps d'une livre, il ne recevra que deux degrés de vitesse. »[325]

Il donne alors la démonstration : « Soit le premier A, le second B. Si A peut monter à un pied, ou élever quatre livres, c'est-à-dire son poids, à un pied, B pourra monter à 4 pieds (proposition 1) ou élever son poids qui est de une livre à quatre pieds. Donc (axiome 2) la force d'A est égale à celle de B, ce qu'il fallait démontrer. »[326] Cette démonstration rapportée

---

[322] Ou *combien que*, signifie *même si*.

[323] Descartes, *Principes de la philosophie*, Œuvres publiées par Adam et Tannery, IX 2, Paris, Vrin, 1989, deuxième partie, paragraphe 36, p 84.

[324] Force pour Leibniz correspond à notre actuelle énergie.

[325] Leibniz, *Essay de dynamique*, in Leibniz et la dynamique de 1692, Pierre Costabel, Paris, Vrin, 1981, proposition 7, p 108.

[326] Leibniz, *Essay de dynamique*, in Leibniz et la dynamique de 1692, Pierre Costabel, Paris, Vrin, 1981, proposition 7, p 108.

au principe de Descartes entraînerait d'après Leibniz la contradiction suivante : pour Descartes, si un corps d'une livre acquière quatre degrés de vitesse, il peut monter à la hauteur de seize pieds par la proposition 1, et donc la même force qui pourrait élever un corps de quatre livres à un pied pourrait élever un corps d'une livre à seize pieds, ce qui est impossible.

C'est Dortous de Mairan qui reprend en 1728 les débats en publiant à l'Académie des sciences une défense de Descartes. Il fait intervenir le facteur temps dans les proportions données par Leibniz dans sa proposition. Ce qui l'entraîne à conclure que pour un corps qui a deux fois plus de vitesse, l'effet est double et non quadruple (double espace parcouru et double déplacement de matière dans des temps égaux). La polémique va se poursuivre entre les partisans de la conservation de mv, la majorité des cartésiens et des newtoniens, et les partisans de la conservation de mv^2, principalement les leibniziens, mais aussi Maupertuis. Madame du Châtelet va alors répondre en attaquant les arguments de Mairan, dans le chapitre XXI de ses *Institutions de physique* ; des réponses et contre-réponses publiées successives vont avoir lieu, sans qu'on puisse régler définitivement la question, chaque camp gardant ses convictions. Notons que ces échanges constituent la première querelle scientifique importante entre une femme et un homme. D'autres savants ont également essayé d'apporter des éléments à la querelle, Bernoulli d'un côté pour les leibniziens, et MacLaurin de l'autre pour les newtoniens.

L'intervention de d'Alembert dans son *Traité de dynamique* va faire évoluer la situation, par un renvoi des polémistes dos à dos. Il pense qu'il ne s'agit pas de débattre sur la grandeur qui se conserve, mais qu'on doit s'attacher à étudier les obstacles ou les résistances qui sont opposées au mouvement, car c'est ainsi qu'on pourra étudier les effets d'une force, « être obscur et métaphysique » qu'on doit éviter d'utiliser en physique.

> *Enfin ceux mêmes qui ne seraient pas en état de remonter jusqu'aux principes métaphysiques de la question des forces vives, verront aisément qu'elle n'est qu'une dispute de mots, s'ils considèrent que les deux partis sont d'ailleurs entièrement d'accord sur les principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement. Qu'on propose le même problème de mécanique à résoudre à deux géomètres, dont l'un soit adversaire et l'autre partisan des forces vives, leurs solutions, si elles sont bonnes, seront toujours parfaitement d'accord ; la question de la mesure des forces est donc entièrement inutile à la mécanique, et même sans aucun objet réel. Aussi n'aurait-elle pas sans doute enfanté tant de volumes, si on se fût attaché à distinguer ce qu'elle renfermait de clair et d'obscur. En s'y prenant ainsi, on n'aurait eu besoin que de quelques lignes pour décider la question: mais il semble que la plupart de ceux qui ont traité cette matière, aient craint de la traiter en peu de mots.*[327]

Pour clore sur cette partie, nous avons retenu Euler qui, dans les Mémoires de l'Académie de Berlin, en 1746, propose un avis assez voisin de celui de d'Alembert. Après avoir présenté le problème, il explique que les deux partis sont d'accord sur le fait que la force qui se conserve doit se mesurer à partir de la masse et de la vitesse, et il ajoute :

> *Mais les partisans de Newton, ou plutôt ceux de Descartes et de Leibnitz, ne sont pas encore d'accord, de quelle formule on doit se servir, pour exprimer ce produit, tant de la masse que de la vitesse du corps qui choque. Les premiers veulent que ces forces soient exprimées en donnant le produit de la masse du corps qui choque par sa vitesse. Leibnitz prétend au contraire que la mesure de cette force se trouve dans le produit de la masse par le carré de la vitesse. On sait assez avec quelle chaleur cette dispute a été poussée de part et d'autre, et je ne crois pas avoir besoin de rapporter les arguments sur lesquels chaque parti fonde sa thèse. Car n'ayant jamais convenu entre eux de l'effet, par la grandeur duquel il fallait mesurer cette force, leurs disputes ont dégénéré le plus souvent en logomachies, qui s'évanouiront, je pense, d'elles-mêmes, dès qu'on aura trouvé la vraie manière d'estimer et de mesurer les forces, dont les corps quelconques soutiennent l'action, lorsqu'ils se choquent réciproquement.*[328]

L'étude de la querelle des forces vives a été pour nous l'occasion de constater qu'un changement dans les références peut être observé. Les principes de Descartes et de Leibniz

[327] Jean le Rond d'Alembert, *Traité de dynamique*, 1743 (2ème édition de 1758), discours préliminaire pp XXIII et XXIV.
[328] Euler, *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin*, 1, 1746, paragraphe VII, p 28.

contiennent beaucoup de métaphysique, et évoquent le rôle de Dieu, jusque dans leurs justifications et leurs démonstrations. Bien que nous souhaitions développer ce sujet dans notre troisième partie, nous pouvons néanmoins noter ici que la lecture des auteurs du 18e siècle montre que des références de ce type vont en s'amenuisant. Il ne s'agit pas de dire que la métaphysique et la religion ont disparu de la science qui se fait, nous allons d'ailleurs le montrer plus loin, mais d'observer une certaine laïcisation de la science, due peut-être à une volonté de s'intéresser plus aux « comment » des choses, et un peu moins aux « pourquoi ». On peut même évoquer chez certains auteurs un réel « prépositivisme » Nous avons vu d'Alembert se contenter ici de juger ce qui est pour lui un faux débat, mais sans intervenir sur le volet métaphysique du principe de conservation. On constate le même comportement dans les ouvrages de Lalande, qui se contente de décrire les phénomènes : « Supposons donc l'existence de l'attraction universelle, et cherchons les effets qui doivent en résulter ; leur accord avec les phénomènes observés et connus, nous fera voir partout la certitude et l'évidence de cette loi. »[329], ou encore chez Gamaches, qui se fixe des buts simples et concrets, qui peuvent très bien se passer de liens métaphysiques ou religieux : « Le mouvement, on demande quelle est sa nature, quelle est sa cause et comment il se communique : ce sont trois questions que je vais essayer de résoudre. »[330]

Enfin, sur un tel thème, il était impensable de ne pas rappeler une célèbre anecdote, peut-être apocryphe, mais en tout cas si significative qu'on ne peut l'occulter. Il s'agit du dialogue entre Napoléon 1er et Laplace après la publication de la *Mécanique céleste* de ce dernier. Victor Hugo en a rendu compte dans *Choses vues* :

> *M. Arago avait une anecdote favorite. Quand Laplace eut publié sa Mécanique céleste, disait-il, l'empereur le fit venir. L'empereur était furieux. - Comment, s'écria-t-il en apercevant Laplace, vous avez fait tout le système du monde, vous donnez les lois de toute la création et dans tout votre livre vous ne parlez pas une seule fois de l'existence de Dieu ! - Sire, répondit Laplace, je n'avais pas besoin de cette hypothèse.*[331]

[329] De La Lande, *Abrégé d'astronomie,* Paris, Vve Desaint, 1774. Paragraphe 1001, p 411.
[330] de Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, première dissertation, p 3.
[331] Victor Hugo, Choses vues, in *Œuvres complètes*, Paris, Robert Laffont, Bouquins, 1987, p.686.

2.3.2 Le rôle des transmetteurs au 18^{e} siècle

Baser la célébrité et l'importance d'un auteur scientifique sur le nombre d'exemplaires publiés ou vendus de ses livres est certainement inadapté, nous savons par exemple que la première édition de Newton et les ouvrages de d'Alembert n'ont pas eu une distribution à la hauteur de l'importance de leurs découvertes et de la diffusion de leurs idées. Varignon a publié seulement à l'Académie des Sciences, a donc été lu par un nombre restreint de personnes, alors que ses travaux physico-mathématiques vont devenir dans les années qui suivent un modèle dans toute l'Europe scientifique pour la présentation de la cinématique et de la dynamique. Il a en fait été nécessaire de trouver un certain nombre de personnes capables de faire connaître au monde les travaux des savants. Pour parvenir à cette passation des travaux des découvreurs, il aura fallu s'appuyer sur des diffuseurs qui ont un rôle essentiel dans la mise à disposition du public des nouvelles connaissances. Ces diffuseurs ou transmetteurs ont été de plusieurs types : des producteurs de manuels destinés à l'étude, ou d'autres qui veulent faire connaître une œuvre et qui en proposent une lecture plus ou moins accessible. On peut parler de vulgarisation dans certains cas, ou d'ouvrages qui font œuvre militante pour une idée qui les a convaincus, tel l'ouvrage de Voltaire, les *Éléments de la philosophie de Newton*.

Quelques livres à contenu scientifique ont acquis une grande réputation populaire, et ont été abondamment diffusés ; on peut citer pour la période qui nous concerne les *Entretiens sur la pluralité de mondes* de Fontenelle, les *Éléments* de Voltaire qu'on vient d'évoquer, et l'*Histoire naturelle* de Buffon. Ces ouvrages, qu'on qualifierait aujourd'hui de « best sellers » ont en commun d’être d’une grande qualité littéraire, ce qui peut contribuer à obtenir l’enthousiasme que Léonard de Vinci estime nécessaire pour étudier : « Manger sans appétit se change en repas fastidieux, et l’étude sans enthousiasme gâte la mémoire qui ne retient pas ce qu’elle prend. »[332] Cet aspect de plaisir est également important pour nos transmetteurs, comme le souligne Madame du Châtelet dans la préface de ses *Institutions de physique* : « Vous sentirez dans tous les temps de votre vie quelles ressources et quelles consolations on trouve dans l’étude, et vous verrez qu’elle peut même fournir des agréments, et des plaisirs. »[333] Ce plaisir peut provenir directement des textes eux-mêmes comme l’écrit Pemberton : « … Newton, dont les écrits m’ont trop charmé pour ne pas souhaiter de partager ce plaisir avec d’autres. »[334]

Nous parcourons, tout au long de cet écrit, les résultats des travaux et des réflexions des grands savants, quelquefois obtenus directement de la source, souvent connus par l’intermédiaire de nos transmetteurs. Leur rôle et la difficulté de leur tâche sont importants, et requièrent de nombreuses qualités, même si Madame du Châtelet reste modeste en évoquant sa contribution : « Pour moi, qui en déplorant cette indigence [le manque d’ouvrages en France] suis bien loin de me croire capable d’y suppléer, je ne me propose dans cet ouvrage que de rassembler sous vos yeux les découvertes éparses dans tant de bons livres latins, italiens, et anglais ; la plupart des vérités qu’ils contiennent sont connues en France de peu de lecteurs, et je veux vous éviter la peine de les puiser dans des sources dont la profondeur vous effraierait, et pourrait vous rebuter. »[335]

Elle s’est déjà exprimée sur le rôle qu’elle s’assigne dans l’introduction qu’elle écrit pour sa traduction de *La Fable des abeilles* de Mandeville : « La nature m’avait refusé le génie créateur qui fait trouver des vérités nouvelles, je me suis rendu justice, et je me suis

[332] Léonard de Vinci, *Textes choisis*, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907, 159 p 88.
[333] Émilie du Châtelet, *Institutions de physique*, Paris, Prault fils, 1741, p. 12.
[334] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, préface p IV.
[335] Émilie du Châtelet, *Institutions de physique*, Paris, Prault fils, 1741, p. 4.

bornée à rendre avec clarté, celles que les autres ont découvert, et que la diversité des langues rendent inutiles pour la plupart des lecteurs. »[336] Elle revient encore sur ce même thème un peu plus loin dans l'Avant-propos des *Institutions de physique* : « La physique est un bâtiment immense, qui surpasse les forces d'un seul homme ; les uns y mettent une pierre, tandis que d'autres bâtissent des ailes entières, mais tous doivent travailler sur les fondements solides qu'on a donnés à cet édifice dans le dernier siècle, par le moyen de la géométrie, et des observations ; il y en a d'autres qui lèvent le plan du bâtiment, et je suis du nombre de ces derniers. »[337]

Les ouvrages des transmetteurs n'ont pas tous une écriture fluide et enlevée, loin s'en faut, mais nécessitent des compétences certaines, et Pemberton analyse leur fonction avec beaucoup de lucidité : « … les grands génies sont sujets à de fréquentes distractions, non seulement dans le cours ordinaire de la vie, mais aussi par rapport à telle ou telle partie de la science dans laquelle ils ont le plus excellé. Les inventeurs semblent mettre en dépôt dans leur âme ce qu'ils ont inventé, tout autrement que ne font ceux qui manquent d'invention. Les premiers, quand ils sont obligés de communiquer à d'autres leurs connaissances, n'ont pas l'esprit aussi présent pour cela que ceux qui sont doués d'une forte mémoire : un homme qui retient bien ce qu'il fait, paraissant quelquefois mieux au fait de certaines découvertes, que les inventeurs eux-mêmes. »[338] Il explique plus loin qu'une des tâches qui leur sont assignées revient à mettre à disposition des lecteurs une présentation plus accessible :

> *La forme, sous laquelle Newton a publié ses découvertes philosophiques, empêche que ceux qui ne se sont point attachés particulièrement à l'étude des mathématiques, puissent s'en former une exacte idée.*
>
> *[…] Comme la nature de ses découvertes le mettait dans l'impossibilité de les démontrer autrement que par des principes géométriques, il craignit que ceux qui ne sentiraient pas toute la force de ses arguments, ne fussent guère disposés à épouser des opinions nouvelles, si différentes de celles qui étaient admises généralement. Ainsi il aima mieux ne s'adresser qu'à des lecteurs mathématiciens, et*

[336] Madame du Châtelet, préface à la traduction de *La Fable des abeilles*, cité dans Keiko Kawashima, « Les idées scientifiques de madame Du Châtelet dans ses *Institutions de physique* », *Historia scientiarum* 3, 1, 1993.
[337] Émilie du Châtelet, *Institutions de physique*, Paris, Prault fils, 1741, p 12.
[338] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, préface p X et XI.

renonça au projet de faire comprendre ses principes à ceux, qui n'entendant rien à sa méthode de raisonner, ne pouvaient pas, dès la première publication de ses découvertes, avoir été convaincus de leur vérité. Mais à présent que la doctrine du chevalier Newton est comme établie par l'approbation unanime de tous ceux qui sont en état de la comprendre, il y a lieu de souhaiter que les découvertes qu'il a faites en philosophie fussent universellement connues. C'est uniquement dans cette vue que j'ai composé et que je publie cet ouvrage.[339]

Quelques traités comme celui de Madame du Châtelet ont pour vocation de présenter la physique avec ses propriétés d'une manière générale, en décrivant les avis en présence, mais de nombreux auteurs sont aussi inspirés par l'un des deux objectifs suivants : défendre une thèse ou un savant dont ils se sentent proches, ou au contraire rejeter des contenus qu'ils n'acceptent pas. Dans le premier groupe on peut citer dans des genres différents les écrits de Voltaire et Pemberton, dans la deuxième catégorie les ouvrages de Sigorgne s'opposant aux tourbillons cartésiens défendus par Privat de Molières, ou encore celui de Castel refusant la physique de Newton.

Pour donner quelques exemples, on peut d'abord lire l'apologie de Newton par Voltaire, qui utilise ses grandes qualités d'écrivain pour les mettre au service de celui qu'il considère comme le plus grand des hommes célèbres :

Il n'y a pas longtemps que l'on agitait, dans une compagnie célèbre, cette question usée et frivole, quel était le plus grand homme, de César, d'Alexandre, de Tamerlan, de Cromwell, etc. Quelqu'un répondit que c'était sans contredit Isaac Newton. Cet homme avait raison ; car si la vraie grandeur consiste à avoir reçu du Ciel un puissant génie, et à s'en être servi pour s'éclairer soi-même et les autres, un homme comme monsieur Newton, tel qu'il s'en trouve à peine en dix siècles, est véritablement le grand homme ; et ces politiques et ces conquérants, dont aucun siècle n'a manqué, ne sont d'ordinaire que d'illustres méchants. C'est à celui qui domine sur les esprits par la force de la

[339] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, introduction, page 1 et 2.

vérité, non à ceux qui font des esclaves par la violence, c'est à celui qui connaît l'univers, non à ceux qui le défigurent, que nous devons nos respects.[340]

S'agissant de Voltaire, Véronique Le Ru montre, dans son ouvrage *Voltaire newtonien*[341], que plutôt que vulgarisateur, on peut considérer Voltaire comme un *passeur de savoir*. Ses *Éléments de la philosophie de Newton* ne constituent en tout cas pas un manuel destiné à l'étude, mais peuvent être lus comme un manifeste newtonien destiné à informer des lettrés.

Autre apologie, celle de Descartes, par Gamaches, un auteur beaucoup moins réputé que Voltaire, mais accompagnée cette fois d'une critique des opposants au philosophe français :

> *Ce grand homme [Descartes] entreprit de dévoiler la nature ; ce ne fut pas une petite entreprise. Il fallait convaincre le genre humain d'ignorance : aussi quelle contradiction n'eut-il pas à essuyer ? Ce ne fut pas simplement parmi le peuple qu'il trouva des obstacles à l'établissement de la vérité, ce fut principalement parmi les savants, parmi ceux qui se trouvaient en possession d'instruire les autres, et qui avaient réduit en dogmes les préjugés vulgaires. Ce sont presque toujours les savants, ceux qui le sont de profession, qui retardent le plus le progrès des sciences : ils ne veulent rien apprendre de leurs contemporains ; il en coûterait à leur vanité.*[342]

Après les compliments, nous pouvons passer aux critiques ; nous nous sommes fait l'écho en de nombreuses occasions de celles-ci, et nous pouvons y revenir, tout d'abord en citant une critique sur le fond de ce que l'auteur appelle le système de Newton : « Le système de M Newton, quoique parfaitement lié dans toutes ses parties, n'est point encore exempt de défauts ; ce n'est que sur des principes d'expérience qu'il est établi, et l'on sait que les

[340] Voltaire, *Lettres philosophiques*, Amsterdam, Lucas, 1734, 12e lettre, sur le chancelier Bacon.
[341] V Le Ru, *Voltaire newtonien*, Paris, Vuibert-Adapt, 2005.
[342] de Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, p 9.

inductions qui se tirent de ces sortes de principes sont toujours équivoques. »[343], mais aussi sur la forme du travail produit, comme le signale Pemberton à l'encontre des prédécesseurs de Newton, œuvrant selon lui avec une négligence étonnante :

> *Leur coutume était de faire des conjectures, qu'ils regardaient comme vraies, pourvu qu'ils trouvassent entre elles et les phénomènes quelque espèce de rapport. Cependant, quoique si peu en état de rendre raison d'une seule chose, ils n'entreprenaient pas moins que des systèmes entiers, et promettaient hardiment de sonder toutes les profondeurs de la nature.*
>
> *[…] Cette négligence à employer les moyens propres pour étendre nos connaissances, jointe à la témérité de l'entreprise même, a déjà été envisagée par le fameux Bacon comme un obstacle capable d'empêcher à jamais tout progrès dans l'étude de la nature (Nov Org aphor 9) Ce grand homme est le premier qui ait écrit positivement contre cette méthode de philosopher, dont il a démontré l'absurdité dans son admirable traité intitulé Novum Organum Scientiaeum. Il a établi dans ce traité la véritable méthode qu'il faut suivre.*[344]

Nous avons écrit dans notre partie consacrée aux hypothèses utilisées dans la physique avoir vu dans le *Traité des systèmes* de Condillac une partie concernant les *suppositions* ou *hypothèses* qui nous rappelait les idées professées par Madame du Châtelet dans ses *Institutions de physique*, sentiment accentué par la métaphore des échafaudages qu'on enlève quand ils ne servent plus. Or ce phénomène semble assez courant et relève peut-être d'une forme de plagiat mais aussi d'une idée qui se transmet d'un auteur à l'autre. On peut d'ailleurs lire dans les *Lettre philosophiques* de Voltaire, publié quelques années avant les deux autres ouvrages cités, une comparaison assez voisine au sujet dans ce cas du *Novum organum* de Bacon : « Le plus singulier et le meilleur de ses ouvrages est celui qui est aujourd'hui le moins lu et le plus inutile : je veux parler de son *Novum scientiarum organum*. C'est l'échafaud avec lequel on a bâti la nouvelle philosophie ; et, quand cet édifice a été élevé au moins en partie, l'échafaud n'a plus été d'aucun usage. »[345]

[343] de Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, Discours préliminaire, p III.

[344] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Introduction page 4 et 5.

[345] Voltaire, *Lettres philosophiques*, Amsterdam, Lucas, 1734, 12e lettre, sur le chancelier Bacon.

Traiter des transmetteurs de connaissance ne peut pas se faire en ignorant l'existence et l'importance de ceux qu'on appelle aujourd'hui les vulgarisateurs, qui, sans vouloir rendre accessible tout le contenu et les subtilités des découvertes récentes, tentent d'amener les lecteurs à une compréhension de leurs découvertes. Dufieu, que nous avons déjà rencontré, nous semble faire partie de ce genre, et nous terminerons en citant quelques lignes de cet auteur :

> *Pourquoi, tandis qu'un vaisseau vogue à pleines voiles, une balle tombe-t-elle de la hune au pied du mât par une ligne courbe aperçue de ceux qui regardent du rivage ?*
>
> *Rép. Parce que la balle a deux directions inégales, l'une horizontale ou parallèle à l'horizon, et qui vient du vaisseau ; l'autre perpendiculaire et plus forte, qui vient de la pesanteur. La balle se livrant à toutes les deux à proportion de leurs forces, avance avec le vaisseau par une ligne courbe qui la rend au pied du mât. Par la même raison, une balle jetée perpendiculairement du pied du mât, retombe au pied du mât, quoique le vaisseau soit emporté rapidement : la balle obéissant proportionnellement à ses deux impressions, à ses deux directions inégales, est rapportée par une ligne courbe au pied du mât.*
>
> *Il en est de même d'une orange qu'un cavalier courant à toute bride jette en l'air, et qui lui retombe dans la main. L'orange donne à ses deux impressions inégales ce qui leur convient selon l'inégalité de leurs forces, et par une ligne courbe vient retrouver la main qui l'a jetée.*
>
> *[…] Un noyau pressé obliquement et qui s'échappe des doigts, décrit la diagonale ; parce qu'étant pressé également par les deux doigts, il ne peut pas obéir à l'un préférablement à l'autre ; il faut qu'il prenne un parti moyen : ainsi c'est un mouvement composé de deux impulsions, dont les effets subsistent et conservent leurs rapports, quoique les causes aient cessé d'agir.*[346]

[346] Jean Ferapie Dufieu, *Manuel physique*, seconde édition, Regnault, Lyon, 1760, question XXIII, p 71 à 73.

Partie 3 : Les questions philosophiques

3.1 La question du temps et de l'espace ; les propriétés de la matière

Depuis les anciens Grecs on se pose la question de l'espace, du temps et de la matière. Selon Aristote, le lieu présuppose l'existence de corps, donc de matière, tout comme le temps qui est le nombre du mouvement. Sans transition, on peut noter une avancée notable sur le sujet qui a eu lieu avec Galilée et ses travaux sur la relativité du mouvement. Quand on fait dire au physicien italien « le mouvement est comme rien », c'est pour signifier que deux observateurs en mouvement rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre obtiennent les mêmes résultats dans toute expérience de mécanique. Cette découverte sur le mouvement entraîne l'adhésion de toute la communauté scientifique, ce qui n'est pas le cas en ce qui concerne la perception de la notion d'espace.

Les différences de position au 17e siècle concernent la possibilité de l'existence du vide, Descartes puis Newton en sont les principaux acteurs. Descartes identifie l'étendue et la matière. « L'espace, ou le lieu intérieur, et le corps qui est compris en cet espace, ne sont différents aussi que par notre pensée. » [347] La première conséquence est que le vide ne peut pas exister dans la nature, la deuxième est que si l'espace ne peut pas être indépendant de la matière, alors il ne peut y avoir de système absolu de référence. Pour lui le mouvement est essentiellement relatif, un même corps peut avoir divers mouvements en même temps (il

[347] Descartes, *Principes de la philosophie*, in Œuvres, IX-2, publiées par Adam et Tannery, Paris, Vrin, 1989, deuxième partie, article 10, p 68.

donne dans les *Principes de la philosophie* l'exemple des mécanismes de la montre d'un marinier marchant dans son bateau qui se déplace sur la rivière) « Mais cependant nous nous souviendrons que tout ce qu'il y a de réel … dans les corps qui se meuvent, en vertu de quoi nous disons qu'ils se meuvent, se trouve pareillement en ceux qui les touchent, quoi que nous les considérions comme en repos. »[348]

Newton distingue le temps et l'espace en absolus et relatifs. Le temps absolu, sans relation avec d'extérieur, s'écoule uniformément. Le temps relatif est variable. Il explique ces qualificatifs dans une scholie proposée juste après les définitions débutant les *Principia mathematica* : « Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, et s'appelle durée. Le temps relatif, apparent et vulgaire, est cette mesure sensible et externe d'une partie de durée quelconque (égale ou inégale) prise du mouvement : telles sont les mesures d'heures, de jours, de mois, et c'est ce dont on se sert ordinairement à la place du temps vrai. »[349] On retrouve les mêmes termes pour ce qui concerne l'espace : « L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire et immobile. L'espace relatif est cette mesure ou dimension mobile de l'espace absolu, laquelle tombe sous nos sens par sa relation aux corps, et que le vulgaire confond avec l'espace immobile. C'est ainsi, par exemple, qu'un espace, pris au-dedans de la Terre ou dans le ciel, est déterminé par la situation qu'il a à l'égard de la Terre. »[350]

Par ces définitions Newton s'oppose à la conception relative de l'espace qu'avait formulée Descartes. Pour lui, les espaces relatifs sont du type « apparent » ou « vulgaire », ils n'existent que par les mesures qu'on peut faire. Le temps absolu existe même sans les évènements qui se déroulent. Le temps possède une structure qui ne dépend pas des évènements. Comme il a défini le temps et l'espace absolu il définit un mouvement absolu.

---

[348] *Ibid*. p.79.
[349] Isaac Newton, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduit en français par la marquise Du Châtelet, Paris, Desaint et Saillant, 1759, tome premier, p 8.
[350] *Ibid*. p 8.

Il reconnaît que, puisque dans la vie courante (*la vie civile*), on ne peut pas distinguer les parties de l'espace par nos sens, il faut passer par des mesures sensibles ; cela ne peut se faire que par rapport à des corps qui sont pris comme références immobiles. Les mesures de mouvements, donc les vitesses, et les positions, se font par rapport à un corps de référence. «Nous nous servons donc des lieux[351] et des mouvements relatifs à la place des lieux et des mouvements absolus ; et il est à propos d'en user ainsi dans la vie civile. » [352] Il ajoute aussitôt que dans les matières philosophiques, on ne doit pas fonctionner ainsi, on doit faire abstraction des sens, « car il se peut faire qu'il n'y ait aucun corps véritablement en repos, auquel on puisse rapporter les lieux et les mouvements. »[353]

Que trouve-t-on sur ce thème dans les ouvrages du 18^e^ siècle ? On lit souvent des propos qui ne prennent pas en compte le débat qui, comme on va le voir, a lieu sur les absolus de l'espace et du temps. Tout semble évident, sans poser de questions, par exemple dans les *Institutions physico-mathématiques* de d'Antoni. Il rappelle d'abord l'exemple de la personne dans un bateau : il lui semble voir le rivage se déplacer alors qu'elle-même est au repos, alors qu'on sait bien que c'est le contraire qui se produit réellement. Cet exemple lui permet de distinguer le mouvement réel, qui indique la vérité du fait, et le mouvement apparent, qui fournit un jugement erroné. Il ajoute la définition des mouvements absolu et relatif, sans même évoquer une quelconque difficulté : « On appelle absolu, le mouvement réel d'un corps, et on nomme relatif, la comparaison faite du mouvement de deux ou de plusieurs corps. On dira, par exemple, que Titius se meut par un mouvement absolu, lorsqu'il va de Turin à Milan ; mais on nommera son mouvement relatif, si on s'aperçoit qu'il voyage plus vite ou plus lentement que Sempronius. »[354]

---

[351] Pour Newton, *le lieu est la partie de l'espace occupée par un corps, et par rapport à l'espace, il est ou relatif ou absolu.*

[352] *Ibid*. p 10.

[353] *Ibid*. p11.

[354] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 214.

Or, contrairement à ce qui est diffusé dans la plupart des manuels destinés aux écoles, la situation est beaucoup plus conflictuelle, et deux conceptions radicalement opposées s'affrontent. La première est celle de Newton et de ses absolus. La seconde est celle de Leibniz, pour qui l'espace et le temps ne sont pas indépendants de la matière. Il ne reprend pas en compte la totalité des idées de Descartes, il s'oppose même à lui en ce qu'il déclare que l'espace ne peut être considéré comme une substance. Mais il écrit que l'espace et le temps ne sont que des relations, l'espace est l'ordre des coexistants, et le temps est l'ordre des successions. Ce qui implique que, comme chez Galilée et Descartes, l'espace est relativiste (coexistence), et le temps est relativiste (succession). Il rejette l'existence du vide : « je ne crois pas qu'il y ait aucun espace sans matière. », Pour Leibniz, s'il n'y a point de créatures, il n'y a ni temps ni lieu.

Des échanges très intéressants ont lieu au début du 18e siècle. La discussion entre Newton et Leibniz sur ce sujet se fait par l'intermédiaire d'un débat resté célèbre à travers des lettres entre Leibniz et Clarke, qui représente Newton. Elle a lieu en 1715 et 1716, et s'achève avec le décès de Leibniz en 1716. Nous pouvons décrire quelques temps forts de ces lettres. Leibniz pointe une première contradiction dans la théorie des absolus. Il ne peut pas concevoir de temps sans changement, alors que c'est envisageable avec le concept newtonien d'espace et de temps absolu. Il donne l'exemple du déplacement du monde entier dans une direction donnée dans l'espace. Ce mouvement est inobservable. Donc un mouvement dans l'espace absolu, qui se ferait sans mouvement relatif de ses parties, n'existe pas. Une deuxième critique concerne l'absence d'un support empirique à la théorie de Newton sur l'espace, on ne peut rien mesurer dans l'espace absolu, on ne perçoit que des mouvements relatifs. Sur le rejet du vide par Leibniz, Clarke écrit que l'espace vide (impossible selon Leibniz) n'est pas un sujet sans attribut, mais un espace sans corps.

Le débat vient aussi très vite sur des contenus métaphysiques et religieux complexes. Une accusation de Leibniz est que le temps absolu de Newton est au même niveau que Dieu, sans commencement ni référentiel, ce n'est plus du temps. La réponse de Clarke est qu'il y a méprise et que le temps de Newton n'est pas d'essence divine, mais qu'il constitue avec l'espace absolu le cadre de l'action transcendante de Dieu sur le monde. Dans l'article *Espace* de l'*Encyclopédie*, d'Alembert écrit que « [Newton] croyait que l'espace était l'immensité de Dieu ; il l'appelle dans son *Optique* le *sensorium* de Dieu, c'est-à-dire ce par le moyen de quoi Dieu est présent à toutes choses. »

L'explication leibnizienne, très moderne, n'arrive cependant pas à s'imposer, pour plusieurs raisons, son décès avant la fin des débats en est une, le succès dont nous avons déjà parlé des thèses de Newton en optique et en dynamique quand on les confronte à l'observation, et aussi parce qu'il n'a pas pu apporter de réponse à ce qu'on a appelé l'argument dynamique de Newton, qui, par des expériences de pensée décrites dans ses *Principia mathematica*, pense avoir prouvé l'existence de l'espace absolu. Pemberton a résumé la deuxième expérience qui lui permet d'affirmer que le mouvement absolu et le mouvement relatif peuvent se distinguer par leurs effets : « Un des effets du mouvement est, que des corps qu'on fait tourner autour d'un centre ou d'un axe, acquièrent une certaine force, qui fait qu'ils tâchent de s'éloigner de ce centre ou de cet axe. C'est ainsi qu'une pierre mise dans une fronde, est prête à s'échapper aussitôt qu'elle ne sera plus retenue. Et cette force est proportionnelle au vrai mouvement du corps, et point à son mouvement relatif autour d'un pareil centre ou axe. »[355]

Il est particulièrement intéressant de citer les commentaires sur le sujet d'un auteur comme Gamaches qui essaie, dans son *Astronomie physique*, de retenir quelques résultats

[355] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, p 140.

newtoniens pour les intégrer dans ceux de Descartes. Il écrit que tout espace étant espace créé, nous pouvons admettre l'existence du vide, qui est la « matière dépouillée des qualités sensibles » (couleurs, sons, odeurs, force, tendance, …). Que reste-t-il alors ? « Une simple étendue, un espace divisible et mesurable. »[356]

Nous avons déjà relevé que les manuels destinés à l'enseignement font parfois l'impasse sur les polémiques et les débats de fond. C'est ce qui se passe dans les deux ouvrages que nous allons citer maintenant, la Physique du monde de Marivetz et Groussier, et les Institutions de d'Antoni que nous avons déjà rencontré.

Marivetz et Goussier réalisent une synthèse tout à fait acceptable entre les protagonistes de la lutte autour de l'espace et du temps. On peut lire dans leur ouvrage : « Le temps, co-éternel à l'espace et infini comme lui, n'est perceptible et calculable pour nous, que par la succession des phénomènes ou des existences. »[357] Ils écrivent ensuite que nous rapportons de façon naturelle toutes les durées à celle de la vie humaine. Ajoutons pour la petite histoire qu'ils poursuivent en mettant ce temps des vies humaines en perspective avec le temps du monde : « Que sont nos annales avec celles du monde ? » et comparent notre perception humaine du temps devant le temps de l'univers à celle de la rose éphémère devant la vie de son jardinier : « Un philosophe, qui réunissait les connaissances les plus profondes à l'esprit le plus agréable, faisait conclure à une rose l'immortalité des jardiniers, de ce que de mémoire de rose on n'avait jamais vu mourir de jardiniers. »[358]

[356] Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, p 27.
[357] Marivetz et Goussier, *Physique du monde*, Paris, Quillau, 1780, discours préliminaire, p VII.
[358] *Ibid*. p VII.

Moins léger, et dans un ordre d'idées nettement plus pratique, d'Antoni relie le temps qui passe à l'objet en mouvement. Par l'observation des phénomènes célestes, les levers et les couchers du soleil et de la lune, le cours des saisons, etc., nous pouvons nous former une idée du temps comme de quelque chose qui a un mouvement continu, égal et inaltérable. Il définit ainsi ce qu'il nomme le temps mathématique, donc absolu, par opposition à ce qu'on appelle souvent le temps métaphysique, le temps relatif du physicien : « Tel est le temps mathématique, dont on fait usage dans toutes les mécaniques. On en exprime ordinairement la durée ou les différentes valeurs avec les lignes, les nombres et les caractères algébriques. »[359]

On a souvent dénoncé l'inutilité des débats, par le fait que les intervenants, convaincus de leur bonne foi, ne modifient jamais leur position. Or, au 18e siècle, nous rencontrons plusieurs cas d'évolution dans la pensée par rapport aux théories en présence. Nous avons vu Privat de Molières accepter les lois de Newton, pour ensuite tenter de les concilier avec les thèses cartésiennes, Huygens et Leibniz ont montré tout au long de leur carrière qu'ils étaient à l'écoute et avaient fait évoluer leurs idées philosophiques et scientifiques. Euler est de ceux-là. Après avoir été fermement cartésien, il s'écarte de cette école de pensée pour se rapprocher de Newton. Il n'admet pas l'identification de l'étendue et de la matière, et croit à l'espace absolu, ses *Réflexions sur l'espace et le temps* en témoignent. Il revient en détail sur ce que nous venons d'esquisser à travers le texte de d'Antoni. Il oppose les métaphysiciens (sous-entendu les leibniziens) aux mathématiciens (sous-entendu les défenseurs de l'espace absolu).

Son Mémoire débute par l'énonciation des deux lois du repos et de l'inertie, qui ne font pas débat dans la communauté scientifique. Selon lui, les métaphysiciens reprochent aux mathématiciens de rattacher de manière incorrecte ces principes à leurs idées d'espace et de temps, qu'ils qualifient d'imaginaires et destituées de toute réalité. Il propose la comparaison entre les arguments des uns et des autres : « On me dira d'abord, que le lieu n'est autre chose

---

359 d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 216.

que la relation d'un corps par rapport aux autres qui l'environnent.[…] et partant quand le mathématicien dit, qu'un corps en repos reste dans le même lieu, par rapport à l'espace absolu, le métaphysicien dira, que ce corps se conserve dans la même relation par rapport aux autres corps qui l'environnent. »[360] Il montre ensuite l'indépendance de l'inertie d'un corps par rapport aux corps voisins, ce qui le conduit à conclure : « mais il est bien sûr, qu'elle se règle sur l'idée du lieu, que les mathématiciens regardent comme réelle, et les métaphysiciens comme imaginaire. […] Les métaphysiciens ont donc tort, quand ils veulent bannir entièrement du monde l'espace et le lieu, en soutenant que ce ne sont que des idées abstraites et imaginaires.»[361] Il poursuit en pointant les contradictions provenant des thèses leibniziennes :

> *Le principe du mouvement nous apprend que lorsqu'un corps parcourt des espaces égaux, l'égalité des espaces ne dépend nullement des autres corps qui l'environnent, et qu'elle demeure la même, à quelque changement que soient exposés les autres corps.*
>
> *Il en est de même de l'égalité des temps ; car si le temps n'est autre chose, comme on veut dans la métaphysique, que l'ordre des successions, de quelle manière rendra-t-on intelligible l'égalité des temps ?*[362]

La conclusion qu'il tire de cette intervention est que le temps absolu et l'espace absolu sont des réalités sur lesquelles on peut s'appuyer.

Les réflexions sur l'espace sont bien entendu liées au débat qui dure depuis des décennies sur l'existence du vide. Ce débat, qui a alimenté les travaux scientifiques au 17e siècle, n'est pas éteint, entre les cartésiens et les leibniziens d'un côté, partisans du plein, et les newtoniens de l'autre, partisans du vide.

[360] Euler, *Réflexions sur l'espace et le temps*, in Mémoires de l'Académie de Sciences de Berlin, 4, 1750, p 326.
[361] *Ibid*. pp 328 et 329.
[362] Euler, *Réflexions sur l'espace et le temps*, in Mémoires de l'Académie de Sciences de Berlin, 4, 1750, p 332.

Le Père Bertier[363], dans ses *Principes physiques* de 1744, s'étonne que « l'esprit humain soit si vaste et si limité tout ensemble. » Les grandes découvertes réalisées en astronomie ne peuvent nous empêcher de prendre conscience que nous ne pouvons pas savoir si les planètes, dont la terre, baignent dans un fluide, ou si elles se trouvent dans un espace vide. « Les plus grands génies se partagent sur ce point »[364]. Il s'agit de savoir si les espaces interplanétaires contiennent un fluide qui entraîne les planètes, ou s'ils sont entièrement vides. Il fournit en quelques phrases les arguments des vacuistes et ceux des pleinistes. Que disent les partisans du plein ? Comparant une planète ou une comète à une fronde retenue par un fil, ils estiment nécessaire de trouver ce qui retient les astres dans leur orbite. Il s'agit d'un fluide (ou éther) répandu dans l'univers, qui possède une certaine densité, puisqu'il entraîne les planètes. Cette présentation défend l'impulsion, et le mécanisme, et s'oppose à l'attraction.

Les partisans de l'attraction pensent que les astres ne pourraient pas se mouvoir dans un fluide de densité sensible, et donc qu'ils ne peuvent le faire que dans le vide. Comme il n'y a aucun autre corps qui puisse retenir les planètes dans leur orbite que celui qui est placé au centre de leur mouvement, ils concluent que c'est ce dernier qui « attire » les planètes par une mécanique différente de celle de l'impulsion.

Positionné dans le camp des attractionnistes, Pemberton décrit dans le chapitre 4 du livre 1 des *Éléments de la philosophie newtonienne* la démarche engagée par Newton pour prouver l'existence du vide dans l'espace. Il se défend ici de chercher une cause au phénomène qui retient les planètes dans leur orbite, il souhaite seulement montrer que l'opinion assez générale, qui est que tout espace contient de la matière, pose problème. Même dans les lieux ne contenant pas de matière sensible apparente, d'après cette opinion, il y aurait

[363] Oratorien, professeur dans plusieurs collèges, le père Bertier essaie dans cet ouvrage de décrire sans prendre parti les arguments des newtoniens et des cartésiens. Il ne faut pas le confondre avec le père Berthier, jésuite, rédacteur du journal de Trévoux, célèbre pour son opposition aux Encyclopédistes.

[364] Bertier, *Principes physiques*, pour servir de suite aux Principes mathématiques de Newton, Paris, Imprimerie royale, 1744, p 9.

un fluide qui remplit tous les espaces. Newton a donc étudié la résistance que les corps peuvent éprouver si on les immerge dans un fluide. Ses travaux ont été de trois ordres : il a d'abord établi la relation entre la résistance citée juste avant, l'espace parcouru, la vitesse et le temps de parcours. Il a ensuite étudié cette résistance pour des densités variables des corps immergés et des fluides. Il a enfin étudié la résistance éprouvée en fonction de la forme des corps immergés. Cette triple étude lui a permis, comme nous l'avons vu dans notre première partie, de réfuter la théorie des tourbillons, et de montrer qu'il ne peut pas y avoir de matière sensible dans l'espace interplanétaire, et donc de déclarer l'impossibilité du plein. Ces démonstrations n'ont pas désarmé les cartésiens, mais vont permettre de faire évoluer lentement certaines positions comme nous le verrons à la fin de ce chapitre.

Un autre sujet de querelle concernant la matière s'est fait jour entre newtoniens et cartésiens, pour lequel on accuse les disciples mais dont on absout le maître. Parmi les propriétés de la matière, une classe est privilégiée, c'est la classe des propriétés essentielles, celles qui ne proviennent pas de l'union de cette particule avec d'autres particules. Deux propriétés essentielles sont l'étendue et l'impénétrabilité. Les propriétés non essentielles dépendent de la structure et de la composition des particules. Newton a toujours soutenu que la gravité n'est pas une propriété essentielle, même s'il lui attribue le qualificatif de propriété universelle :

> *Le fait que cette gravité devrait être innée, inhérente et essentielle à la matière de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance dans un vide sans la médiation d'autre chose au moyen de quoi leur action ou force puisse être transmise de l'un à l'autre, est pour moi une absurdité si grande qu'à mon avis, qui possède une compétence de pensée en matière philosophique ne pourrait nullement y céder. La gravité doit être causée par un agent agissant constamment selon certaines lois, mais si cet agent est matériel ou immatériel, c'est une question que j'ai laissée à la considération de mes lecteurs.*[365]

[365] Newton, *lettre à Bentley*, 25 février 1693, in Richard Westfall, *Newton*, Paris, Flammarion, 1994, p 546.

La préface d'un ouvrage intitulé *La théorie des Tourbillons* (publié en 1752 sans nom d'auteur mais écrit par Fontenelle) se fait l'écho de ces remarques, d'abord en ce qui concerne Newton lui-même : « Newton suppose les corps célestes jetés dans le vide, tendant en même temps à chaque instant vers un centre, par une qualité qu'il ne définit point ; et le calcul qu'il en fait résulter, explique leurs mouvements dans la plus parfaite exactitude ; mais il déclare dans ses *Principes* mêmes, et dans d'autres ouvrages, que par cette qualité il n'entend que l'effet d'une cause quelconque (fût-ce l'impulsion) et qu'il ne met point la pesanteur (c'est la qualité dont il s'agit) au nombre des qualités essentielles aux corps. »[366]

C'est ensuite que, citant les disciples du savant anglais, il les accuse d'avoir détourné les idées de Newton: « Les Newtoniens, dès lors plus hardis que leur maître, vont bien plus loin que lui. Ils transportent des cieux dans le monde sublunaire cette prétendue qualité essentielle ; ils la font régner dans toute la nature sous le nom d'attraction. »[367] Un autre ouvrage, l'*Astronomie physique* de Gamaches, confirme les propos de Fontenelle, en soulignant d'abord que les critiques qu'il a pu formuler, concerne moins le savant anglais que ses partisans « outrés de sa philosophie ». Newton admet le vide, écrit-il, mais il n'a jamais affirmé que la gravitation soit un principe de la nature. « S'il fait attirer les corps, ce n'est que par supposition, et pour n'avoir rien à démêler avec les physiciens. »[368] Il ajoute que Newton a toujours dit qu'il n'utilise le terme d'attraction que pour désigner un fait, et non une cause.

Le reproche concerne donc ceux que Gamaches nomme les partisans de Newton ; ceux-ci traitent la pesanteur comme une propriété essentiellement attachée au corps. Pour convaincre, ils « insinuent » qu'il est possible que la matière possède d'autres propriétés que

[366] Fontenelle, *Théorie des tourbillons cartésiens,* avec des réflexions sur l'attraction, Paris, Guérin, 1752, p XII et XIII.
[367] Fontenelle, *Théorie des tourbillons cartésiens* avec des réflexions sur l'attraction, Paris, Guérin, p XV.
[368] de Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, Éclaircissements sur l'attraction newtonienne, p 348.

celles que nous connaissons. Il ajoute : « précaution dangereuse ; car que le doute dont ils font naître l'idée fût fondé, peut-être émanerait-il lui-même de quelqu'une des propriétés qu'aurait la matière à notre insu. »[369]

Cette accusation de traiter la gravitation comme une propriété essentielle de la matière est-elle fondée ? En tout cas, il est vrai que, dans les écrits des newtoniens, on lit plus des insinuations que des formulations franches à ce sujet. Pemberton est par contre très clair sur ce sujet. Il attribue bien le titre de propriété essentielle à la quantité de matière, mais pas à la gravitation. Il faut toujours référence à Newton en écrivant que ce dernier a démontré que la gravité est une propriété universelle, mais pas essentielle à la matière. Pemberton reprend à plusieurs reprises cette remarque de Newton. Newton a démontré, dit-il, que la gravité était une propriété universelle appartenant à tous les corps de l'univers qui sont à la portée de nos sens, et à chacune des particules de matière qui entrent dans la composition de ces corps. Mais cependant il n'affirme à aucun endroit, que cette propriété soit essentielle à la matière. « Et il était si éloigné d'affirmer quelque chose de pareil, qu'au contraire il a hasardé quelques conjectures touchant la cause de ce phénomène. (À la fin de son optique question 21) ; et il dit expressément, qu'il ne proposait ces conjectures, que pour faire voir son intention à cet égard (même traité avertissement 2). »[370]

Cette idée lui tient à cœur, il en parle souvent sans son ouvrage. Il revient sur les propriétés de la gravité. Cette force appartient à tous les corps observés jusqu'ici, elle ne dépend pas de la forme des corps, elle est toujours proportionnelle à la quantité de matière, on peut donc la classer comme une propriété universelle de la matière. Il insiste ensuite sur les découvertes étonnantes qu'elle a permis de faire, par exemple la détermination de la densité des différentes planètes. « Que ceux qui s'élèvent contre cette philosophie, considérant ici qu'il serait raisonnable d'abandonner ce principe, parce qu'il leur plaît de le désigner par les mots de miracle perpétuel, ou de qualité occulte ; puisque cette qualité, qu'ils appellent

[369] *Ibid*. p 348.
[370] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, Introduction p 26 et 27.

occulte, a fait découvrir des choses si fort au-dessus de nos conceptions, qu'on aurait pu taxer de folie celui qui se serait seulement imaginé que les facultés de notre esprit étaient capables d'atteindre jusque-là. »[371]

Nous avons dit plus haut que ces débats, souvent stériles, parce qu'ils n'entraînent pas la conviction, ou du moins l'écoute, de la partie opposée, vont peu à peu céder la place à une sorte de *statu quo*. On va même jusqu'à trouver des tentatives d'adaptation des théories physiques. Loin des invectives et des accusations pas toujours fondées, quelques ouvrages tentent de trouver des thèses conciliatrices, on observe alors une volonté d'apaisement, comme chez Vivens, dont les propos se cantonnent à un plan purement technique.

Il débute son argumentation par la possible existence du plein absolu, sans aucun vide entre les particules de matière. Mais les principes qui agissent sur les corps tendent soit à comprimer les particules, soit à les disperser « Cependant nous ne connaissons aucune espèce de corps qui ait une parfaite solidité ; d'ailleurs si nous supposons une infinité de principes de mouvement qui agissent à la fois, pendant qu'il y en a un certain nombre qui concourent à l'entassement des corps, il y en a d'autres qui tâchent de les disperser ; ainsi il est à présumer qu'on ne peut trouver nulle part aucun espace entièrement plein. »[372]Ce qui vient d'être dit pour des objets qui nous entourent, est encore plus évident pour l'univers entier, qui ne peut donc être absolument plein.

Vivens prend alors un autre point de départ. Dire que le vide est impossible, c'est dire que la matière est infinie, éternelle et nécessaire. Il ajoute que chaque école de pensée rejette

---

[371] *Ibid*. p 27.
[372] Vivens, *Nouvelle théorie du mouvement,* Londres, 1749, pp 28 et 29.

comme impossible la proposition de l'autre, alors qu'on pourrait peut-être dire que c'est non pas impossible que le vide absolu existe, ou que le plein absolu existe, mais seulement difficile physiquement. « Ni le plein absolu, ni le vide absolu ne sont impossibles en soi, mais ils sont l'un et l'autre très difficiles. Si l'on pouvait prêter du sentiment à la Nature, les Anciens auraient fort bien dit qu'elle a de la répugnance pour le vide ; et les Modernes pourraient dire qu'elle n'en a pas moins pour le plein, à supposer l'un et l'autre. »[373]

Les questions concernant l'espace, le temps, et la matière ne sont pas des questions particulières du 18e siècle ; comme beaucoup d'autres, elles ont parcouru les siècles précédents, et elles continuent d'alimenter les réflexions des scientifiques d'aujourd'hui. Il existe pourtant un débat, non pas inédit dans la physique, mais en tout cas qui a permis des mises au point et des éclaircissements profonds dans la période que nous étudions, c'est le débat concernant l'utilisation de principes en physique.

[373] Ibid. p 30.

3.2 Les principes

Depuis les temps anciens, les principes constituent un des piliers du raisonnement et de la connaissance. Un principe est admis par tous, il ne se démontre pas. Descartes ne démontre pas non plus ses principes, même s'il fournit des arguments métaphysiques pour convaincre son lecteur, mais on a vu que le principe d'inertie a été transformé en loi par d'Alembert qui propose une démonstration dans son Traité de dynamique. Dans ce chapitre nous nous proposons de traiter de deux principes qui ont eu un rôle important dans la physique du 18e siècle, le *principe de simplicité* prolongé par le *principe de moindre action,* et le *principe de raison suffisante*.

Le premier principe dont il sera question ici est le principe de simplicité ou *Rasoir d'Ockham*, qui demande de ne pas admettre plus de causes qu'il n'est nécessaire pour expliquer les phénomènes, et dont la formulation a pu être modifiée en « entre deux hypothèses celle qui est la plus vraisemblable est la plus simple. » Galilée utilise ce principe à un moment crucial de ses découvertes sur le mouvement accéléré ; quand il s'agit de se poser la question de savoir quelle forme prend la loi de chute libre, son choix se porte sur le plus simple :

> *Nous avons été conduit comme par la main en observant la règle que suit habituellement la nature dans toutes ses autres opérations où elle a coutume d'agir en employant les moyens les plus ordinaires, les plus simples.[…] Quand j'observe une pierre tombant d'une certaine hauteur à partir du repos en recevant continuellement de nouveaux accroissements de vitesse, pourquoi ne croirais-je pas que ces additions ont lieu selon la proportion la plus simple et la plus évidente ? Or, tout bien*

considéré, nous ne trouverons aucune addition, aucun accroissement plus simple que celui qui toujours se répète de la même façon.[374]

Alors que sur presque tous les sujets rencontrés jusqu'ici nous avons observé une opposition entre les cartésiens et les newtoniens, nous constatons cette fois dans les deux écoles de pensée une utilisation du principe de simplicité, par exemple chez le cartésien Du Roure, au sujet de la justification de l'inertie par la simplicité des actions de Dieu : « … tout corps qui est dans le mouvement tend à le continuer en ligne droite. La raison de cette règle ne se prend pas seulement de ce que Dieu qui agit d'une façon très simple ne conserve le mouvement, que comme il est précisément dans l'instant auquel il le conserve, et non pas dans la courbure, où il était avant cet instant ; elle se prend encore de l'expérience qui nous montre que lorsqu'une pierre sort de la fronde, où elle était mue circulairement, elle ne continue de se mouvoir qu'en ligne droite. »[375], puis chez le newtonien Sigorgne qui, dans la préface de sa seconde édition des *Institutions newtoniennes*, écrit que Newton voit, entre le système qu'il propose, et celui des tourbillons, « la même différence qui se trouve entre la féconde simplicité du ciel de Copernic, et la complication énorme, par là même stérile, du ciel de Tycho et de Ptolémée, où tout ne va qu'à force de machines, et qu'à l'aide d'une dépense immense de mouvements et d'épicycles. »[376] Si on lit bien, il n'y a pas de meilleure preuve que la simplicité pour confirmer une théorie physique.

C'est également ce que pense Condillac quand il nous donne, dans son *Traité des systèmes*, son sentiment sur le lien entre simplicité et vérité : « Faut-il donc bannir de la physique toutes les hypothèses ? Non, sans doute : mais il y aurait peu de sagesse à les adopter sans choix; et on doit se méfier surtout des plus ingénieuses. Car, ce qui n'est qu'ingénieux, n'est pas simple ; et certainement la vérité est simple. »[377] Cette opinion est certainement non seulement très implantée dans les esprits du 18e siècle, d'après ce qu'on

[374] Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, première édition 1638, traduction Maurice Clavelin, PUF, Paris, 1995, p 131.

[375] Jaques Du Roure, *La physique expliquée* suivant le sentiment des anciens et nouveaux philosophes, et principalement de Descartes, Paris, chez l'auteur, 1653, p 49

[376] Sigorgne, *Institutions newtoniennes*, Paris, Guillyn, 1769, seconde édition, préface pp XXVI et XXVII.

[377] Condillac, *Œuvres complètes*, tome II, Traité des systèmes, Houel Paris, Levrault Strasbourg, 1798, p 344.

vient de lire, mais aussi utilisée dans les arguments développés comme on va l'observer dans des mémoires de l'Académie des sciences.

C'est dans cette institution qu'un échange très intéressant a lieu dans la deuxième moitié des années 1740 entre Buffon et Clairaut. Il nous permet de montrer la mise en œuvre des idées scientifiques nouvelles que nous avons pu croiser jusqu'ici. Un des principaux intérêts de ces échanges est qu'ils sont intégralement retranscrits, avec une foule de détails, et qu'on peut ainsi, ce qui est rare à cette époque, suivre très précisément l'avancée des débats. On voit apparaître dans un premier temps un doute exprimé par une première personne sur une loi de la physique, puis un rejet de ce doute par une deuxième personne pour plusieurs raisons qu'on détaillera, et enfin une mise au point issue de longs échanges qui contribuera aux modifications irréversibles de la pratique de la nouvelle physique dans la deuxième moitié du 18e siècle.

En 1749 l'Académie des sciences rend compte d'une polémique qui a opposé Clairaut, grand mathématicien et physicien, reconnu comme tel, et Buffon, qui deviendra célèbre pour son *Histoire naturelle* dont la publication commence à cette époque. Buffon a traduit la *Méthode des fluxions* de Newton en français, a formulé une loi de probabilité géométrique (le fameux problème de l'aiguille), a expérimenté en de nombreuses occasions, nous avons montré l'exemple des miroirs ardents d'Archimède dans notre deuxième partie, mais en réalité il n'est ni un mathématicien ni un physicien actif ; il va cependant s'opposer à Clairaut au sujet d'un problème physico-astronomique. La polémique va durer de 1747 à 1749, l'ensemble des comptes rendus et des mémoires seront regroupés et publiés ensemble par l'Académie en 1749 dans le tome consacré à l'année 1745.

L'histoire débute par la présentation par Clairaut du fruit de ses dernières recherches dans un mémoire à l'Académie. Il se montre tout d'abord gêné de devoir douter d'un grand homme comme Newton, mais il se résout à le faire pour rejoindre le chemin de la vérité qui seule doit nous guider. Il décrit alors les éléments constitutifs du problème rencontré. Il se propose de vérifier la validité de la théorie de la gravitation universelle avec des observations astronomiques. La connaissance du mouvement de la lune lui semble très importante, des inégalités dans ce mouvement ont été observées, en particulier dans le mouvement de l'apogée, et Newton n'a pas expliqué ces inégalités de manière claire. L'observation précise indique que l'apogée de la lune n'est pas un point fixe dans le ciel, il se déplace avec régularité selon une période mesurée d'un peu moins de neuf années. Or les calculs effectués à partir de la loi de gravitation conduisent à un résultat double pour la durée de révolution de l'apogée, environ dix-huit ans.

Clairaut se trouve donc conduit à devoir choisir entre deux alternatives : rejeter la loi de Newton, ce qu'il s'est d'abord proposé de faire avant d'y renoncer, ou modifier l'expression de la loi, puisqu'il y a « une infinité de lois à donner à l'attraction, qui différeront très sensiblement de la loi du carré pour de petites distances, et qui s'en écarteront si peu à de grandes, qu'on ne pourra pas s'en apercevoir par les observations. »[378] Cette méthode lui semble donc pouvoir être envisagée sereinement. Il fournit alors un exemple pour ceux qui ont « l'analyse familière » : pour la loi de gravitation, imaginons une nouvelle formule composée de deux termes, l'un ayant le carré de la distance au diviseur, et l'autre ayant la puissance quatrième au diviseur, on obtiendra, en comparant les effets de l'attraction à deux distances, « dont l'une est au moins cent fois plus petite que l'autre, telles que la distance de la lune à la terre, et celle de Mercure au soleil, on verra, dis-je, que pour la première distance l'attraction sera sensiblement différente de ce qu'elle serait dans la loi du carré, et que pour la seconde la différence sera au moins dix mille fois plus faible. » Appliquée au problème qui nous concerne, cette modification de formule pourrait produire cette différence énorme de neuf ans pour l'apogée, alors qu'il ne se produirait aucun changement sensible avant des siècles pour Mercure.

[378] Clairaut, *Du système du monde dans les principes de la gravitation universelle,*. (*Lu à l'Assemblée publique du 15 Nov. 1747.*) *Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année 1745, avec les Mémoires etc*. A Paris, de l'Imprimerie Royale, 1749.

La proposition de Clairaut est inattendue : modifier la grande loi de Newton par des termes correctifs doit sembler à beaucoup une atteinte inacceptable au grand œuvre qu'ils soutiennent sans réserve. Buffon est de ceux-là et va répondre rapidement. Mais il ne conteste pas les résultats des mesures et des calculs, il ne réagit que sur la proposition de modification de la formule. Un newtonien tel que lui ne peut pas accepter un tel accroc à la thèse newtonienne. Il répond donc par les mêmes voies que Clairaut et donne à son tour à l'Académie un mémoire en guise de réponse. Il ne peut pas croire que les observations contredisent la loi de Newton. Il est inutile selon lui de chercher à le prouver, il lui suffit d'annoncer qu'il va montrer que la loi de Clairaut implique contradiction. Pour se convaincre de la validité de celle de Newton, il suffit de rappeler le nombre très important de cas où elle s'accorde avec les observations, ce qui nous renvoie à une utilisation habituelle de l'induction, mais il se différentie des utilisateurs de la méthode inductive en ce que ceux-ci rejettent une proposition si un seul contre-exemple est présenté, alors que Buffon met ce seul cas de l'apogée de la lune qui contredit la loi en balance avec toutes les observations qui suivent cette loi, et conclut par la victoire de l'écrasante majorité. La loi n'étant pas en cause, il faut donc se pencher sur ce cas particulier, et trouver les raisons de l'écart constaté. On pourrait imaginer par exemple que le magnétisme terrestre peut influencer la lune, et agir sur l'apogée, il y aurait donc bien deux termes à utiliser pour calculer le mouvement de l'apogée, le premier provenant de la loi de Newton, et le deuxième issu de la force magnétique de la terre.

Après cette avancée, Buffon va annoncer son argument principal, concernant la simplicité des lois naturelles : « Une loi en physique n'est loi que parce que sa mesure est simple, et que l'échelle qui la représente est non seulement toujours la même, mais encore qu'elle est unique, et qu'elle ne peut pas être représentée par une autre échelle. »[379]

[379] Buffon, *Réflexions sur la loi de l'attraction*, Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année 1745, avec les Mémoires etc, à Paris, de l'Imprimerie Royale, 1749.

Comment la simplicité énoncée par Buffon va-t-elle se concrétiser dans le cas qui nous concerne ? C'est ce qu'il détaille dans la suite de son exposé : « De quelque façon que nous puissions supposer qu'une qualité physique puisse varier, comme cette qualité est une, sa variation sera simple et toujours exprimable par un seul terme, qui en sera la mesure ; et dès qu'on voudra employer deux termes, on détruira l'unité de la qualité physique ; […] et, si on admet deux termes pour représenter l'effet de la force centrale d'un astre, il est nécessaire d'avouer qu'au lieu d'une force, il y en a deux, dont l'une sera relative au premier terme, et l'autre relative au second terme. »[380] Buffon ajoute que Clairaut doit donc admettre l'existence d'une autre force que l'attraction, puisqu'il emploie deux termes pour représenter l'effet total.

Sans nier la possibilité d'une influence de la force magnétique de la terre sur la lune, Clairaut déclare dans sa réponse qu'il lui paraît douteux qu'elle soit suffisante pour fournir un tel écart entre les résultats mesurés et calculés de l'apogée de la lune. Il demande néanmoins aux contestataires de vérifier la justesse de ses calculs, ajoutant une allusion aux compétences limitées de Buffon pour les mathématiques qu'il a utilisées, Buffon qui « lui fait l'honneur de le croire sur parole » dans ses calculs, et à qui il demande de faire de même avec ses explications.

D'après Clairaut, Buffon utilise des analogies en toute confiance : il cite des forces centrales (avec comme exemples lumière et odeur) qui agissent en raison inverse du carré des distances, et il estime qu'on peut généraliser aux autres forces issues d'un centre comme la gravitation. Clairaut est favorable à l'utilisation d'analogies, utiles à la découverte, mais il faut pouvoir vérifier les propositions qu'elles entraînent : « Mais que l'on prenne pour vrai dans tous les cas ce qu'on a reconnu seulement dans quelques cas particuliers, qu'on se repose sur de pareilles preuves, c'est ce qu'il ne me parait pas permis de faire, à moins qu'on ne veuille s'exposer à tomber dans les plus grandes erreurs. La métaphysique est sans contredit bien propre à nous éclairer et à faire valoir les secours réels que nous fournissent la physique

[380] *Ibid.*

et la géométrie, mais si nous nous laissons conduire par son seul flambeau, nous pouvons nous égarer à tout moment. […] »[381] Analogie et induction, issues de la métaphysique, ne peuvent pas être utilisées sans précaution, il faut fournir des garanties en vérifiant les résultats à l'aide de procédures issues de la physique et des mathématiques.

Il intervient ensuite sur le deuxième argument de Buffon, celui de la simplicité. Il rappelle la définition d'une fonction (quantité composée d'une autre suivant une formule quelconque), il reconnaît que la représentation d'une loi par une fonction apparaît moins simple que l'utilisation des puissances, et ajoute que la nature peut sembler composée pour qui la connait mal, et que si on doit utiliser des fonctions pour exprimer une loi, cela ne provient pas du manque de simplicité de la nature, mais de l'imperfection de l'algèbre qui peine à exprimer simplement la loi. Utiliser une fonction à la place des puissances peut correspondre à une formule moins simple, mais en même temps à une courbe plus facile à réaliser. Clairaut ne conteste pas la demande de simplicité de Buffon, il s'interroge seulement sur ce qui doit être simple dans la loi elle-même.

Et, s'agissant de la loi des forces, dont la formulation est recherchée ici, il finit par conclure sur l'ambiguïté du mot simple dans le domaine étudié ici :

> *M. de Buffon dit qu'il faut que la loi soit une et non arbitraire, en cela je suis de son avis, je pense comme lui que la force doit être donnée aussitôt que la distance l'est. Mais n'y a-t-il que les courbes exprimées par deux termes qui puissent donner cette propriété ? M. de Buffon doit savoir que toutes les courbes qui n'ont qu'un paramètre, sont dans ce cas, et le nombre en est infini. Dans toutes les courbes de cette espèce, le paramètre servira d'intensité à la force, et la progression des ordonnées représentera la loi de cette force. Toute la différence de ces lois aux simples puissances, c'est que peut-être il nous faudra un peu plus de mots lorsque nous voudrons exprimer ce qui en constitue l'essence. […]*[382]

[381] Clairaut, *Réponse aux Réflexions de M. de Buffon*, sur la Loi de l'Attraction & sur le mouvement des Absides, Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année 1745, avec les Mémoires etc, à Paris, de l'Imprimerie Royale, 1749.
[382] *Ibid*.

Buffon ne s'avoue pas vaincu, et réagit dans une addition à son précédent mémoire. Estimant que Clairaut n'a pas compris ses critiques, il va traduire mathématiquement ses objections pour prouver que la loi de l'Attraction par rapport à la distance, ne peut pas être exprimée par deux termes. La démonstration qui fait intervenir les puissances dont il a été question depuis le début est la suivante :

> *Supposons que $\frac{1}{x^2} \pm \frac{1}{x^4}$ représente l'effet de cette force par rapport à la distance x, ou, ce qui revient au même, supposons que $\frac{1}{x^2} \pm \frac{1}{x^4}$ qui représente la force accélératrice, soit égale à une quantité donnée A pour une certaine distance ; en résolvant cette équation la racine x sera ou imaginaire ou bien elle aura deux valeurs différentes : donc à différentes distances, l'Attraction serait la même, ce qui est absurde : donc la loi de l'Attraction par rapport à la distance ne peut pas être exprimée par deux termes. C.Q.F.D.*[383]

La démonstration donnée étant applicable à toute expression composée de plusieurs termes, Buffon en déduit que, quelle que soit la proposition formulée, elle serait rejetée, car la loi d'attraction ne doit comporter qu'un terme.

L'histoire se poursuit en 1749 par une déclaration de Clairaut à l'Académie des sciences qui annonce qu'après de nouveaux calculs et deux ans de travail ininterrompu, il est parvenu à rectifier ses anciens résultats et à concilier de façon acceptable la loi de Newton utilisant l'inverse du carré de la distance avec les observations. Cette déclaration pourrait faire croire que l'histoire est terminée, mais des additions aux mémoires présentés vont encore se succéder des deux côtés. La conclusion de Buffon est simple, il avait raison depuis le début : « […] Dès le temps que M. Clairaut proposa pour la première fois de changer la loi de l'attraction et d'y ajouter un terme, j'avais senti l'absurdité qui résultait de cette supposition, et j'avais fait mes efforts pour la faire sentir aux autres […] Les raisons métaphysiques,

[383] Buffon, *Addition au Mémoire qui a pour titre :* Réflexions sur la loi de l'attraction, Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année 1745, avec les Mémoires etc, à Paris, de l'Imprimerie Royale, 1749.

mathématiques et physiques, s'accordent donc toutes à prouver que la loi de l'attraction ne peut être exprimée que par un seul terme, et jamais par deux ou plusieurs termes, c'est la proposition que j'ai avancée et que j'avais à démontrer. […] »[384]

Quant à Clairaut, s’il ne remet pas en cause les idées qui ont été à l’origine de la polémique, ni les propositions qu’il avait faites, puisque sa méthode a permis de trouver la bonne réponse, il regrette seulement cet échange inutile : « […] Au reste, je répéterai ici ce que j'ai dit plusieurs fois dans l'Académie. Je regarde l'idée que j'ai eue de choisir une loi complexe pour réunir les différentes espèces de lois qu'on a employées, comme un de ces expédients qui viennent si facilement à l'esprit, que je n'y attache aucun mérite ; je ne l'ai soutenue que parce que M. de Buffon la prétendait absurde, et il m'a engagé malgré moi dans une dispute qui ne faisait rien au fond de la question. »[385]

Cet exemple a été l’occasion de nous montrer que si le débat n’avait en réalité certainement pas lieu d’être, en tout cas pas de cette façon, il nous a en tout cas permis de voir un échange riche faisant intervenir des méthodes utilisées couramment (utilisation d’hypothèses, induction, analogie) et le principe de simplicité qui n’est finalement pas contesté. C’est aussi la dernière fois que Buffon intervient dans un débat sur un sujet de physique ; il a été un peu malmené sur ses compétences mathématiques, et se consolera en se consacrant à son *Histoire naturelle*, dont la qualité et la quasi-exhaustivité suffisent largement pour justifier une célébrité encore vivace de nos jours.

[384] Buffon, *Seconde addition au Mémoire qui a pour titre : Réflexions sur la loi de l'attraction*, Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année 1745, avec les Mémoires etc, à Paris, de l'Imprimerie Royale, 1749.
[385] Clairaut, *Réponse au nouveau Mémoire de M. de Buffon*, Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Année 1745, avec les Mémoires etc, à Paris, de l'Imprimerie Royale, 1749.

La formulation du principe de simplicité peut varier selon les auteurs, et selon les époques, on disait autrefois que la nature agit toujours par les voies les plus courtes, ou encore, si on voulait faire intervenir le Créateur, Dieu agit toujours de la façon la plus simple. C'est Pierre de Fermat qui vers 1660 utilise le principe en physique, pour une démonstration d'optique géométrique. Descartes a déjà établi les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière à l'aide d'analogies mécaniques, et Fermat va les retrouver à partir de données différentes de celles de Descartes. Il s'explique à ce sujet dans une lettre à Marin Cureau de la Chambre, où il dévoile la conséquence qu'il a déduite du principe de simplicité : la lumière se déplace dans le temps le plus court, et non pas par le chemin le plus court : « La nature agit toujours par les moyens les plus aisés, c'est-à-dire, ou par les lignes les plus courtes, lorsqu'elles n'emportent pas plus de temps, ou en tout cas par le temps le plus court, afin d'accourcir son travail et de venir plus tôt à bout de son opération. »[386] C'est la deuxième solution, celle du temps le plus court, qui est retenue. Les informations de Fermat sur le sujet ont circulé, les réactions ont été rapides, telle, quelques mois après, celle de Clerselier, défenseur de Descartes qu'il sent attaqué. Il écrit à Fermat le 6 mai 1662 son opposition à l'utilisation de son principe, alléguant que c'est un principe moral, et non point physique, et qu'on ne peut pas l'utiliser comme cause d'un effet de la nature.

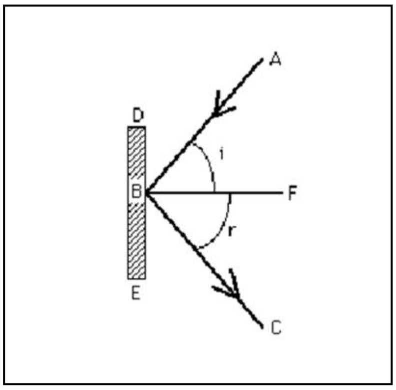
La réponse de Fermat ne se fait pas attendre, et, deux semaines après il répond avec beaucoup d'humour en transformant son principe physique en principe mathématique ; il n'a jamais prétendu être dans la confidence secrète de la nature, qui a « des voies obscures et cachées que je n'ai jamais entrepris de pénétrer ; je lui avais seulement offert un petit secours de géométrie au sujet de la réfraction, si elle en eût eu besoin. Mais puisque vous m'assurez, monsieur, qu'elle peut faire ses affaires sans cela et qu'elle se contente de la marche que M Descartes lui a prescrite, je vous abandonne de bon cœur ma prétendue conquête de physique, et il me suffit que vous me laissiez en possession de mon problème de géométrie tout pur et *in*

[386] Fermat, *Lettre à C de la Chambre*, dimanche 1er janvier 1662, *Œuvres*, Paris, Gauthier-Villars, 1844, tome deuxième, p 458.

abstracto, par le moyen duquel on peut trouver la route d'un mobile qui passe par deux milieux différents et qui cherche d'achever son mouvement le plus tôt qu'il pourra. »[387]

Dans l'article *Réflexion* de l'*Encyclopédie* écrit par d'Alembert, on peut lire une utilisation de ce principe dans le cas de la réflexion de la lumière :

Les anciens auteurs d'optique, pour prouver l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, se sont fondés sur ce principe, que la nature agit toujours par les voies les plus courtes ; et ils prétendent qu'un rayon de lumière AB se réfléchit suivant la ligne BC, parce que le chemin le plus court pour aller du point A au point C en frappant le plan DE, est de passer par le point B, tel que l'angle ABF d'incidence, soit égal à l'angle CBF de réflexion ; en sorte que si le corps ou point A passait par tout autre point que B du plan DE pour arriver en C, il y arriverait par un chemin plus long que ABC. ; […][388]



D'Alembert fait suivre cette explication de trois critiques concernant ce principe, en qualifiant celui-ci de peu solide. La première remarque concerne la présentation du principe fondée sur la métaphysique, on ne peut pas dire que le rayon prend le chemin AB dans le but d'arriver en C, mais plutôt qu'il arrive en C parce qu'il a pris le trajet AB. Et, deuxième remarque, si le rayon lumineux choisit la voie la plus courte, il devrait plutôt aller directement de A en C, sans passer par le miroir. La troisième critique, la plus solide scientifiquement, rappelle que si la loi s'applique bien à un miroir plan ou sphérique convexe, elle ne se vérifie pas dans le cas d'un miroir sphérique concave, pour lequel c'est le chemin le plus long qui est parcouru. Cette dernière remarque est justifiée, l'énoncé du principe sera modifié pour la

[387] Fermat, *Lettre à Clerselier*, dimanche 21 mai 1662, *Œuvres*, Paris, Gauthier-Villars, 1844, tome deuxième, p 483.

[388] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, tome 13, article *Réflexion*.

prendre en compte, et on énoncera un trajet maximal ou minimal, exprimé par le terme extrémal.

En réalité Fermat a écrit un principe de temps *minimum* et non de moindre trajet, mais cela revient au même dans un milieu homogène, la vitesse de la lumière restant constante. Les résultats ne diffèrent que quand il y a au moins deux milieux différents dans lesquels circule la lumière, comme dans le cas de la réfraction de la lumière d'un milieu dans un autre, et c'est ce dernier cas qui est utilisé par Fermat dans sa démonstration.

On en restera là pour pendant de longues années, Huygens évoque plus tard le principe de Fermat lors de ses travaux en optique (qui s'appuient sur des ondes lumineuses) en écrivant que ses démonstrations et ses résultats confirment les thèses de celui-ci, et Leibniz est favorable à ce principe qui confirme sa conception d'un monde régi par la perfection de Dieu. Les résultats d'optique publiés par Newton, sans contredire ceux de Fermat, ne s'appuient pas sur les mêmes hypothèses (désaccord sur la vitesse de la lumière dans des milieux différents par exemple), et la majorité des newtoniens n'acceptent pas le principe énoncé par Fermat. Dans l'introduction de ses *Éléments de la philosophie newtonienne*, Pemberton signale l'opinion d'un philosophe (sans le nommer), que la lumière, en traversant différents milieux, devait éprouver la réfraction qui devait le plus faciliter son mouvement. Ce qui est important à signaler est que cette opinion est classée par lui dans les fausses notions qu'il entend dénoncer.

En 1744, Pierre-Louis Moreau de Maupertuis prolonge la proposition contenue dans le principe de moindre temps que Fermat a utilisé en optique. Il explique son idée dans une intervention à l'Académie des sciences le 15 avril 1744, qu'il intitule *Accord de différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici paru incompatibles*. Ayant fait le point sur les connaissances acquises en optique à l'heure où il parle, et qui font consensus dans le monde scientifique, il en vient aux différentes explications fournies pour expliquer la réflexion et la réfraction de la lumière. On peut les ranger dans trois classes différentes. La première provient de ceux qui s'appuient sur la mécanique, on reconnaît là les cartésiens. La deuxième est issue de ceux qui acceptent les principes de la mécanique, mais en plus utilisent un principe d'attraction de la matière, il s'agit donc des newtoniens. La troisième classe comprend les explications des utilisateurs de principes métaphysiques, tel le principe de simplicité. Dans cette dernière catégorie sont les idées associées aux travaux de Fermat et de ceux qui l'ont suivi. C'est bien entendu cette dernière qui va avoir les faveurs de Maupertuis. Il souligne la fécondité du principe de Fermat, et rappelle le soutien apporté par Leibniz qui a fourni une analyse plus élégante de ce problème. Les tenants du dernier groupe sont opposés à ceux des deux premiers sur un point que nous avons déjà rencontré, il s'agit de la vitesse de la lumière.

Pour les cartésiens et les newtoniens, dont l'avis est contraire à ceux de Fermat, Huygens et Leibniz, la lumière se propage plus vite dans les milieux denses que dans l'air. Ce débat a déjà eu lieu entre Descartes et Fermat, sans trouver de vainqueur, et Maupertuis présente alors les arguments qui lui permettent d'émettre son principe. Il rejette la position de Fermat sur la vitesse de la lumière parce qu'il est sensible aux arguments avancés par Newton, et, s'il veut conserver un principe de *minimum* ou de *maximum*, il lui faut modifier la grandeur considérée, qui était le temps pour Fermat :

> *En méditant profondément sur cette matière, j'ai pensé que la lumière, lorsqu'elle passe d'un milieu dans un autre, abandonnant déjà le chemin le plus court, qui est celui de la ligne droite, pouvait bien aussi ne pas suivre celui du temps le plus prompt : en effet, quelle préférence devrait-il y avoir ici du temps sur l'espace ? La lumière ne pouvant plus aller tout à la fois par le chemin le plus court, et par celui du temps le plus prompt, pourquoi irait-elle plutôt par un de ces chemins que par l'autre ? Aussi ne suit-elle aucun des deux, elle prend une route qui a un avantage plus réel : le chemin qu'elle tient est celui par lequel la quantité d'action est la moindre.*[389]

[389] Maupertuis, *Accord de différentes lois de la nature* qui avaient jusqu'ici paru incompatibles, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, année 1745, à Paris, de l'Imprimerie Royale, p 423.

Le terme quantité d'action demande définition, et Maupertuis y répond, en argumentant du fait que l'action nécessaire pour déplacer un corps d'un point à un autre dépend de sa vitesse et de l'espace qu'il parcourt. La quantité d'action est donc proportionnelle à la somme des espaces parcourus multipliés chacun par la vitesse respective.

Il fournit ensuite une utilisation mathématique de son principe pour retrouver la loi de la réfraction de la lumière lors du passage d'un milieu dans un autre, à l'aide du calcul infinitésimal, par une méthode semblable à celle qui a été présentée dans le cadre de notre partie consacré à la mathématisation de la physique, à l'intérieur du paragraphe sur le calcul différentiel et intégral. Il peut alors conclure que c'est « cette quantité d'action qui est ici la vraie dépense de la nature, et ce qu'elle ménage le plus qu'il est possible dans le mouvement de la lumière. »[390] Il ajoute que le principe de Fermat se retrouve être une suite de la plus petite quantité d'action.

Dans l'*Encyclopédie*, d'Alembert reprend les explications de Maupertuis sur un ton assez favorable dans l'article *Action*. Il rappelle la publication de 1744, ajoute en complément une seconde intervention en 1746 dans les Mémoires de l'Académie de Berlin, où une définition plus précise de la quantité d'action est fournie : c'est le produit de la masse d'un corps par l'espace qu'il parcourt et par sa vitesse. Il ajoute plus loin que Maupertuis a cherché à concilier l'explication de M. Newton avec les principes métaphysiques : « Cette quantité d'action, dit-il, est la vraie dépense que la nature ménage. Par ce principe philosophique, il trouve que non seulement les sinus sont en raison constante, mais qu'ils sont en raison inverse des vitesses (ce qui s'accorde avec l'explication de M. Newton) et non pas en raison directe, comme le prétendaient MM de Fermat et Leibniz. »[391]

[390] *Ibid*.
[391] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, tome 13, article *Action*.

Maupertuis, soutenu par Euler, va poursuivre, en utilisant le principe pour d'autres applications que l'optique, comme la dynamique des forces centrales, et les chocs. Euler lui-même se différencie de Maupertuis, en ce qu'il déclare que les effets de la nature suivent quelque loi de *maximum* et de *minimum* et qu'il utilise à la place de l'action une grandeur qui est l'ancêtre de notre travail mécanique. Euler soutiendra néanmoins Maupertuis dans une querelle de paternité pour sa loi de moindre action que Koenig voulait attribuer à Leibniz. Utilisant une étude mathématique complexe de recherche des *extrema* d'une formule intégrale, il applique ce qu'on appelle son calcul variationnel à des questions de mécanique et rejoint à l'aide de ses résultats le principe de Maupertuis. Comme ce dernier il a utilisé une méthode décrivant l'évolution d'un système entre deux instants donnés en deux positions successives, méthode qui se différencie de celle du principe fondamental de la dynamique qui fournit une loi locale à un instant donné et en un point donné.

Les thèmes métaphysiques à l'origine du principe de moindre action de Maupertuis et de son prolongement par Euler, seront à nouveau abordés dans notre chapitre consacré aux causes finales et dans celui consacré à la place de Dieu dans les débats des physiciens. Signalons simplement ici qu'à partir des années 1750 et jusqu'à la fin des années 1780, Lagrange renouvelle les idées issues du principe de Maupertuis. Il déclare dans sa *Mécanique analytique* de 1788 qu'il a réduit toute la dynamique à une formule générale qui renferme à la fois les principes ou théorèmes de conservation des forces vives, de conservation du mouvement du centre de gravité, de conservation des mouvements de rotation, et du principe de moindre action ; il démontre ce dernier sans faire appel à une quelconque considération métaphysique sur les voies les plus simple suivies par la nature : « Ces principes doivent être regardés plutôt comme des résultats généraux des lois de la dynamique, que comme des principes primitifs de cette science. »[392] Il revient plus loin sur le principe utilisé, presque identique à celui énoncé par Euler, en écrivant que la somme des produits des masses par les intégrales des vitesses multipliées par les éléments des espaces parcourus, est constamment un *maximum* ou un *minimum*. Il rappelle alors sa position devant l'utilisation de principes métaphysiques dont, en paraphrasant Laplace, il n'a pas eu besoin dans ses hypothèses : « Tel

[392] Lagrange, *Mécanique analytique*, tome premier, nouvelle édition, 1811, p 241.

est le principe auquel je donne ici, quoique improprement, le nom de moindre action, et que je regarde non comme un principe métaphysique, mais comme un résultat simple et général des lois de la mécanique. »[393]

Tout ce qui est a sa raison d'être. Il est difficile de ne pas accepter cette affirmation qui peut même sembler d'une évidence sans grand intérêt. Et pourtant de cette phrase est issu un des grands principes leibniziens dont nous allons rendre compte maintenant. Pour comprendre l'intérêt d'un tel principe nous pouvons nous appuyer sur les premiers chapitres des *Institutions de physique* d'Émilie du Châtelet.

Dans les *Institutions de Physique* Madame du Châtelet se réfère à la physique de Leibniz, les conceptions de ce dernier y sont à l'honneur, particulièrement dans la première moitié qui est consacrée à la métaphysique. Elle fait explicitement référence à Leibniz et à Wolf, ce dernier ayant élaboré un système issu de celui de Leibniz. Elle a été initiée à leur philosophie par Samuel Koenig, mathématicien allemand, qui a joué un rôle dans la formation philosophique et scientifique de la marquise comme elle le laisse entendre dans sa préface. Le premier chapitre présente les principes fondateurs de nos connaissances. Le premier d'entre eux est celui de contradiction : une chose ne peut être et ne pas être en même temps. Applicable aux vérités nécessaires (« déterminables d'une seule manière »), il ne suffit plus pour les vérités contingentes (« lorsqu'il est possible qu'une chose existe de différentes manières »). Il faut alors lui adjoindre un second principe : « Ce principe duquel toutes les vérités contingentes dépendent, et qui n'est ni moins primitif, ni moins universel que celui de contradiction, est le principe de raison suffisante : tous les hommes le suivent naturellement ; car il n'y a personne qui se détermine à une chose plutôt qu'à une autre, sans une raison suffisante qui lui fasse voir que cette chose est préférable à l'autre. »[394]

[393] Lagrange, *Mécanique analytique*, tome premier, nouvelle édition, 1811, p .246.
[394] Madame du Châtelet, *Institutions de Physique*, Paris, Prault fils, 1740, p 22.

Madame du Châtelet s'appuie tout au long de son ouvrage sur ce principe, qui d'après elle est pour la métaphysique « une boussole capable de nous conduire dans les sables mouvants de cette science » ; nous pouvons montrer à travers plusieurs exemples consacrés à la physique qu'elle le propose souvent pour démontrer un résultat. Le premier d'entre eux est issu des travaux d'Archimède : « Archimède passant de la géométrie à la mécanique, reconnut bien le besoin de la raison suffisante ; car voulant démontrer qu'une balance à bras égaux chargée de poids égaux restera en équilibre, il fit voir que dans cette égalité de bras et de poids la balance devait rester en repos, parce qu'il n'y aurait point de raison suffisante, pourquoi l'un des bras descendrait plutôt que l'autre. »[395]

Elle ajoute que Leibniz fut le premier à décrire, développer et utiliser le principe de la raison suffisante en sciences, ce qui permit, écrit-elle, d'éviter tant d'erreurs de raisonnement ; ce principe lui fournit en outre les arguments lors de sa prise de position sur la querelle fameuse déjà rencontrée entre Leibniz, qui disait que l'espace n'était que l'ordre des choses coexistantes et Clarke, porte-parole de Newton, qui défendait l'espace absolu :

> *Il est certain que si on consulte le principe de la raison suffisante que j'ai établi dans le premier chapitre, on ne peut se dispenser d'avouer que M. de Leibniz avait raison de bannir l'espace absolu de l'univers, et de regarder l'idée que quelques philosophes croient en avoir, comme une illusion de l'imagination ; car non seulement il n'y aurait, comme on vient de le voir, aucune raison de la limitation de l'étendue, mais si l'espace est un être réel et subsistant sans les corps, et qu'on puisse les y placer, il est indifférent dans quel endroit de cet espace similaire on les place, pourvu qu'ils conservent le même ordre entre eux : ainsi il n'y aurait point eu de raison suffisante pourquoi Dieu aurait placé l'univers dans la place où il est maintenant, plutôt que dans tout autre, puisqu'il pouvait le placer dix mille lieues plus loin, et mettre l'orient où est l'occident ; ou bien il pouvait le renverser, faisant garder aux choses la même situation entre elles.*[396]

[395] *Ibid* p 25.
[396] *Ibid* p 93.

Voltaire, qui fut un newtonien inconditionnel toute sa vie, propose une vision un peu différente de ce principe et de ce débat Leibniz-Clarke ; d'après lui, Newton croyait en un Dieu infiniment libre et infiniment puissant, les choses qui nous entourent n'existent que par sa seule volonté. Fidèle à un ton polémiste qui a fait une partie de son grand succès, il propose un raccourci sur les débats houleux qui eurent lieu entre Leibniz et Clarke :

> *Le célèbre Leibniz prétendait le contraire, et se fondait sur un ancien axiome employé autrefois par Archimède : « Rien ne se fait sans cause ou sans raison suffisante », disait-il, et Dieu a fait en tout le meilleur, parce que s'il ne l'avait pas fait comme meilleur, il n'eût pas eu raison de le faire. Mais il n'y a point de meilleur dans les choses indifférentes, disaient les newtoniens ; mais il n'y a point de choses indifférentes, répondent les leibniziens. Votre idée mène à la fatalité absolue, disait Clarke ; vous faites de Dieu un être qui agit par nécessité, et par conséquent un être purement passif : ce n'est plus Dieu. Votre Dieu, répondait Leibniz, est un ouvrier capricieux, qui se détermine sans raison suffisante. La volonté de Dieu est la raison, répondait l'Anglais. Leibniz insistait, et faisait des attaques très fortes en cette manière. »*[397]

Les *Institutions de physique* font intervenir le principe de raison suffisante dans la définition des grandeurs physiques, mais aussi pour valider une loi. Il est à la base de la définition d'une force, qui est « le principe qui contient la raison suffisante de l'actualité d'une action quelle qu'elle soit. »[398], expliquant que pour qu'un être agisse il lui faut une raison suffisante, et la force met en œuvre la puissance qu'a l'être d'agir. De plus, non seulement utilisé comme nous venons de le voir dans les définitions, il est également à l'œuvre dans l'énoncé de la seconde des trois lois générales du mouvement : « Le changement qui arrive dans le mouvement d'un corps, est toujours proportionnel à la force motrice qui agit sur lui ; et il ne peut arriver aucun changement dans la vitesse, et la direction du corps en mouvement que par une force extérieure ; car sans cela ce changement se ferait sans raison suffisante. »[399]

---

[397] Voltaire, *Éléments de la philosophie de Newton*, in *Œuvres complètes*, Physique, Paris, P Dupont, 1825, chapitre III, pp 52 et 53 (1ère édition 1740).
[398] Madame du Châtelet, *Institutions de Physique*, Paris, Prault fils, 1740, p 137.
[399] *Ibid* p 222.

Du principe de raison suffisante est issu un autre principe, le principe de continuité, lui aussi établi par Leibniz, et qui a un grand intérêt en physique : « c'est lui qui nous enseigne que rien ne se fait par saut dans la nature, et qu'un être ne passe point d'un état à un autre, sans passer par tous les différents états qu'on peut concevoir entre eux. »[400] Quelle justification donne-t-elle ? La raison d'être dans un état donné ne peut se trouver que dans l'état précédent. L'état précédent et l'état actuel sont tellement proches qu'on ne peut mettre un autre état entre les deux. Si c'était le cas, et qu'il y ait un état entre les deux, l'être aurait quitté le premier état sans avoir encore atteint le second. Il n'y aurait donc pas de raison suffisante pour passer du premier au second état. Donc, comme pour aller d'une ville à une autre il faut passer par tous les points du trajet, un être ira d'un état à un autre en passant par tous les états intermédiaires.

Prolongement du principe de raison suffisante, le principe de continuité permet aussi de finaliser la démonstration des lois du mouvement : « un corps qui se meut dans une direction quelconque, ne saurait se mouvoir dans une direction opposée, sans passer de son premier mouvement au repos par tous les degrés de retardation intermédiaires, pour repasser ensuite, par des degrés insensibles d'accélération, du repos au nouveau mouvement qu'il doit éprouver. »[401]

Madame du Châtelet entre à cette occasion dans le débat autour des erreurs de Descartes dans les énoncés de ses lois des chocs ; elle met en évidence leur accord ou leur opposition avec les principes de raison suffisante et de continuité :

---

[400] *Ibid* p 30.
[401] *Ibid* p 34.

Descartes, par exemple, aurait réformé ses lois du mouvement, s'il avait fait plus d'attention à cette règle ; il commença par établir pour première loi, que deux corps égaux qui se choquent avec des vitesses égales doivent retourner en arrière avec la même vitesse, et cela est très vrai, car n'y ayant point de raison pourquoi l'un des deux continuerait son chemin plutôt que l'autre, et ces corps ne pouvant pénétrer les dimensions l'un de l'autre, ni demeurer en repos, parce que la force se perdrait, ce qui ne peut arriver, il faut nécessairement qu'ils retournent tous deux en arrière avec la même vitesse avec laquelle ils s'étaient choqués.[402]

Elle poursuit en écrivant que la seconde loi du mouvement de Descartes (si un grand corps rencontre un autre plus petit, seul le petit retournera en arrière, le grand continuera son mouvement, tous deux avec la vitesse qu'ils avaient avant le choc) est en contradiction à la fois avec la première loi du mouvement et avec le principe de continuité.

Le principe de raison suffisante, s'il a été mis en avant par plusieurs auteurs au 18^e^ siècle après Leibniz, n'aura pas une grande postérité, et après les moqueries de Voltaire, des savants comme d'Alembert et Euler le rejetteront comme un principe inefficace et inutile. D'Alembert, dans le *Discours préliminaire* de l'*Encyclopédie*, propose un avis nuancé sur Leibniz et son principe : « Son principe de la raison suffisante est très beau, très vrai en lui-même, ne paraît pas devoir être fort utile à des êtres aussi peu éclairés que nous le sommes sur les raisons premières de toutes choses. »[403]

Quelques années plus tard, Leonhard Euler maniera l'ironie pour rejeter les principes démonstratifs leibniziens, en particulier celui de la raison suffisante. Dans une des *Lettres à une princesse d'Allemagne*, datée de 1761, il fait référence aux partisans des monades, qu'il nomme aussi philosophes modernes : « … leur plus fort appui est le grand principe de la raison suffisante, dont ils savent se servir si adroitement, que par son moyen ils sont en état de démontrer tout ce qui leur convient, et de détruire tout ce qui s'oppose à leurs sentiments. La

[402] *Ibid* pp 36 et 37.
[403] D'Alembert, *Discours préliminaire*, in Encyclopédie, 1751, p XXVIII.

plus heureuse découverte qu'on ait faite est donc que rien ne saurait être sans une raison suffisante ; et c'est aux philosophes modernes que nous en sommes redevables. »[404] Un peu plus loin dans la même lettre, il veut cette fois montrer la vanité d'une recherche de réponses en utilisant ce principe qui n'en apporte aucune :

> *V. A. [Votre Altesse] pensera peut-être que les philosophes modernes, qui se vantent tant du principe de la raison suffisante, ont découvert celle de toutes choses, et sont en état de répondre à tous les pourquoi qu'on pourrait leur demander ; ce qui serait sans doute le plus grand degré de nos connaissances : mais ils sont à cet égard aussi ignorants que tous les autres : tout leur mérite ne consiste qu'en ce qu'ils prétendent avoir démontré que, partout où l'on peut demander pourquoi, il doit y avoir une réponse suffisante, quoiqu'elle nous soit cachée.*[405]

Les principes sont donc toujours utilisés à cette époque de façon régulière par les physiciens pour conduire leurs recherches afin d'expliquer les phénomènes. Mais on constate au 18e siècle une diminution progressive dans la présentation des références métaphysiques au profit de principes physiques, les exemples étudiés nous ont permis de le constater. Nous allons voir s'il en est de même lors de l'intervention de la notion de causes dans l'argumentation, causes qui, comme les principes, sont omniprésentes dans les textes scientifiques depuis très longtemps. Platon, par exemple avait écrit dans le Timée que tout ce qui naît, naît nécessairement d'une cause.

[404] Euler, *Lettres de M. Euler à une princesse d'Allemagne*, tome second, Paris, Royez, 1788, p 221.
[405] *Ibid* p 221.

3.3 Les causes

Pour expliquer l'état obtenu par une chose, Aristote distingue quatre causes, la cause formelle (qui répond à la question qu'est-ce que c'est ?), la cause matérielle (de quoi la chose est-elle faite ?), la cause efficiente ou motrice (par quel agent ? ou par quelle action ?), et la cause finale, objet de la téléologie (dans quel but la chose existe-t-elle ?). Nous n'aborderons ici que les deux dernières qui ont alimenté de nombreux échanges au 18^{e} siècle. Aristote illustre ses définitions dans la *Métaphysique* en écrivant que le père est la cause efficiente de l'enfant, et la santé la cause finale de la promenade.

Pour nous limiter aux personnages qui ont inspiré l'époque qui nous intéresse, nous pouvons citer Bacon et Descartes. Bacon est opposé aux causes finales, qui d'après lui prennent trop d'importance par rapport aux causes efficientes (qu'il nomme causes physiques), nuançant toutefois ses propos en écrivant qu'il peut y avoir cohabitation entre les deux, suggestion qui, nous le verrons, sera reprise plus tard :

> *Ce n'est pas que les causes finales nous paraissent n'avoir aucune réalité, et ne mériter aucunement nos recherches dans les spéculations métaphysiques, mais c'est que, dans les excursions et les irruptions continuelles que font les causes finales dans les possessions des causes physiques, elles ravagent et bouleversent tout dans ce département ; autrement ce serait se tromper lourdement que d'imaginer que les causes finales, une fois bien circonscrites dans leurs limites, puissent combattre et lutter contre les causes physiques ; car l'explication qui consiste à dire que les paupières sont le rempart des yeux n'a rien d'incompatible avec cette autre qui dit que les poils naissent ordinairement près des orifices des parties humides.[…] Ces deux espèces de causes*

s'accordent parfaitement bien, avec la différence pourtant, que l'une désigne une intention, et l'autre un simple effet.[406]

Quant à Descartes, bien qu'il ne s'oppose pas à l'idée que Dieu a créé un monde dans un but, il ne peut accepter que l'entendement fini de l'homme puisse accéder aux fins poursuivies par un Dieu infini. De plus, l'utilisation des causes finales, qui concerne le général et non le particulier, n'a pas de place dans sa méthode qui décompose tout problème en notions simples, avant de les reprendre selon une complexité de plus en plus grande.

Jacques Duroure, fidèle cartésien, va jusqu'à écrire, dans son ouvrage *La physique expliquée*, que les causes finales sont inutiles à la physique. Il poursuit en donnant une explication à ce sentiment : « Les corps ne se proposent point de fin pour agir ; et Dieu qui en est l'auteur ne nous a pas fait connaître ses éternels et secrets desseins touchant la production des choses et le concours qu'il leur donne. Ceux qui opposent que le soleil, par exemple, a été fait indubitablement pour éclairer, ne sauraient désavouer que la lumière ne soit l'effet du même astre dont ils croient qu'elle est encore la fin. »[407] Cet exemple du soleil et de sa lumière, avec quelques variantes, a été souvent utilisé dans la littérature scientifique de l'époque.

La plupart des auteurs du 18e siècle ont eu des avis moins tranchés. Leibniz a accepté les causes finales en pensant au principe de moindre action. Il dit que la nature suit les voies les plus simples, que l'action est minimale lors du trajet, donc que la trajectoire est déterminée par une fin. Il ajoute que l'on n'a pas à mettre dos à dos les partisans des causes finales et ceux des causes efficientes. Les mêmes effets, écrit-il dans le *Discours de métaphysique* de

---

406 Bacon, *De la dignité et de l'accroissement des sciences*, in œuvres de Bacon ,traduit par F Riaux, Paris, Charpentier, 1852, p 231.

407 Jacques Duroure, *La physique expliquée* suivant le sentiment des anciens et nouveaux philosophes, et principalement de Descartes, Paris, chez l'auteur, 1653, p 46.

1686, peuvent parfois s'expliquer aussi bien par les causes efficientes et par les causes finales. Le paragraphe XXII est intitulé *Conciliation des deux voies par les finales et par les efficientes pour satisfaire tant à ceux qui expliquent la nature mécaniquement qu'à ceux qui ont recours à des natures incorporelles*. Les deux chemins sont bons, les deux peuvent être utiles, « non seulement pour admirer l'artifice du grand ouvrier, mais encore pour découvrir quelque chose d'utile dans la physique et dans la médecine. Et les auteurs qui suivent ces routes différentes ne devraient point se maltraiter. »[408] Il développe ses arguments dans un autre texte où il compare l'utilisation de méthodes différentes pour résoudre un même problème de géométrie avec l'utilisation des causes efficientes et des causes finales pour expliquer un phénomène :

> *Comme tout se peut expliquer dans la géométrie par le calcul des nombres et aussi par l'analyse de la situation, mais que certains problèmes sont plus aisément résolus par l'une de ces voies, et d'autres par l'autre, de même je trouve qu'il en est ainsi des phénomènes. Tout se peut expliquer par les efficientes et par les finales ; mais ce qui touche les [hommes] [esprits] [âmes raisonnables] substances raisonnables s'explique plus naturellement par la considération des fins, comme ce qui regarde les [corps] autres substances s'explique mieux par les efficientes.*[409]

Dans un autre chapitre du *Discours de métaphysique*, intitulé *Utilité des causes finales dans la physique*, Leibniz refuse de blâmer les opposants aux causes finales, mais ces derniers ont selon lui selon lui une attitude qu'il faudrait éviter. Quand on voit l'admirable structure des animaux on doit reconnaître la sagesse de Dieu. Leibniz conseille de s'éloigner de ceux qui disent qu'on voit parce qu'on a des yeux, sans que les yeux aient été faits pour voir. Il cite quelques pages plus loin Fermat qui se sert des causes finales alors qu'il recherche le chemin le plus aisé pour qu'un rayon lumineux aille d'un point à un autre.

Leibniz précise encore qu'on peut même trouver un avantage à commencer une recherche en utilisant les causes finales : « […] je trouve que la voie des causes efficientes,

[408] Leibniz, *Discours de Métaphysique*, Paris, Gallimard, Folio essais, 2004, p 189.
[409] Leibniz, *Opuscules et fragments inédits*, Paris, Alcan, 1903, p 329.

qui est plus profonde en effet et en quelque façon plus immédiate et a priori, est en récompense assez difficile quand on vient au détail, et je crois que nos philosophes le plus souvent en sont encore bien éloignés. Mais la voie des finales est plus aisée, et ne laisse pas de servir souvent à deviner des vérités importantes et utiles qu'on serait bien longtemps à chercher par cette autre route plus physique, […]. »[410]

Dans la citation de Voltaire que nous avons proposée dans notre étude sur le principe de raison suffisante, une allusion à la thèse leibnizienne du meilleur des mondes en lien avec les causes finales apparaît. Dans les *Institutions de physique*, Madame du Châtelet prend nettement position en faveur du philosophe allemand dont elle résume la position dans les lignes suivantes :

> *C'est de cette sagesse infinie du Créateur que les causes finales, ce principe si fécond dans la physique, et que quelques philosophes en ont voulu bannir bien mal à propos, tirent leur origine ; tout marque un dessein, et c'est être aveugle, ou vouloir l'être, que de ne pas apercevoir que le Créateur s'est proposé dans le moindre de ses ouvrages des fins, qu'il obtient toujours, et que la nature travaille sans cesse à exécuter : ainsi, cet univers n'est point un chaos, une masse désordonnée, sans harmonie et sans liaison, comme quelques déclamateurs voudraient le persuader ; mais toutes les parties y sont arrangées avec une sagesse infinie, et aucune ne pourrait être transplantée ni ôtée de sa place, sans nuire à la perfection du tout.*[411]

Ce plaidoyer en faveur du finalisme la montre, loin des réflexions ironiques de Voltaire sur le sujet, en total désaccord à la fois avec les scientifiques cartésiens encore puissants à l'Académie des Sciences, et avec certains newtoniens qui refusent l'utilisation des causes. Elle écrit par exemple, reprenant la thèse du meilleur des mondes et le principe de simplicité : « Ce monde ci est donc le meilleur des mondes possibles, celui où il règne le plus

[410] Leibniz, *Discours de métaphysique*, Paris, Gallimard, Folio essais, 2004, pp 51 et52.
[411] Madame du Châtelet, *Institutions de Physique*, Paris, Prault fils, 1740, p 48.

de variétés avec le plus d'ordre, et où le plus d'effets sont produits par les lois les plus simples. »[412]

Voltaire, facilement moqueur, ne nie pourtant pas le finalisme (il écrit même : « Newton croyait aux causes finales ; j'ose y croire comme lui ; car enfin la lumière sert à nos yeux, et nos yeux semblent faits pour elle. »[413]), mais en même temps il rejette toute explication qui rend compte d'un fait particulier par les causes finales. L'occasion d'exprimer sa position sur les faits particuliers lui est donnée lors du tremblement de terre suivi d'un tsunami qui a détruit la ville de Lisbonne en 1755, et tué des dizaines de milliers de personnes. Il refuse d'accepter que tout soit pour le mieux en ajoutant qu'il est difficile de deviner comment les lois du mouvement peuvent être cause de tels désastres dans le meilleur des mondes possibles. Et Maupertuis, tout à fait conscient des controverses liée à l'utilisation des causes finales en physique, va jusqu'à comprendre la répugnance de certains physiciens : « [je] l'approuve même jusqu'à un certain point ; j'avoue que ce n'est pas sans péril qu'on les introduit. »[414]

Euler, qu'on a vu prolonger les travaux de Maupertuis sur le principe de moindre action, décrit l'alternative à laquelle doit faire face le physicien pour résoudre un problème de mécanique, utiliser les causes efficientes (première méthode) ou les causes finales (deuxième méthode) : « Par là on voit qu'il doit y avoir une double méthode de résoudre les problèmes de mécanique ; l'une est la méthode directe, qui est fondée sur les lois de l'équilibre, ou du mouvement ; mais l'autre est celle dont je viens de parler, où, sachant la formule, qui doit être un *maximum*, ou un *minimum*, la solution se fait par le moyen de la méthode de *maximis* et *minimis*. »[415] Les deux méthodes doivent conduire à la même solution, ce qui nous convainc

---

[412] *Ibid* p 49.

[413] Voltaire, *Œuvres complètes*, tome LXXII, Paris, Baudouin, 1828, Lettre à M. Dionis du Séjour, 18 janv. 1775, p 177.

[414] Maupertuis, *Accord de différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici paru incompatibles,* Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 15 avril 1744, page 417.

[415] Euler, *Recherche sur les plus grands and plus petits qui se trouvent dans les actions des forces,* Mémoires de l'Académie de Sciences de Berlin, 4, 1750, p 151.

de valider ce résultat. Or nous sommes très souvent confrontés à la difficulté de trouver la formule représentant la quantité d'action qui doit être *maximum* ou *minimum*. Les moyens basés sur des principes métaphysiques mis en œuvre pour connaître le but que la nature se propose, afin d'être conduit à la connaissance de la quantité d'action, sont la plupart du temps très éloignés de nous permettre d'obtenir un résultat. Or la méthode directe (première méthode) peut nous permettre d'obtenir les solutions, ce qui entraîne pour nous la possibilité de connaître la formule recherchée de la quantité d'action, « et alors il ne sera plus si difficile d'en démontrer la vérité par les principes connus de la métaphysique. »[416]

D'Alembert a consacré un article de l'*Encyclopédie* aux causes finales qui, pour lui, nous ramènent à trouver des lois par des principes métaphysiques. En introduction il reprend pour la rejeter l'affirmation bien connue qui dit que l'eau monte dans les pompes, parce que la matière a horreur du vide, ajoutant que l'horreur du vide est un principe absurde. Parmi les opposants aux causes finales, d'Alembert cite Bacon : « Bacon avait bien senti que nous voyons la nature trop en petit pour pouvoir nous mettre à la place de son auteur ; que nous ne voyons que quelques effets qui tiennent à d'autres, et dont nous n'apercevons pas la chaîne ; que la fin du Créateur doit presque toujours nous échapper, et que c'est s'exposer à bien des erreurs que de vouloir la démêler, et surtout expliquer par là les phénomènes. »[417] Il ajoute que Descartes était dans les mêmes sentiments que Bacon sur le sujet. Il expose alors la position favorable de Leibniz envers les causes finales (La nature, dit-il, agit toujours par les voies les plus simples et les plus courtes), et rappelle son utilisation par Fermat lors de la réflexion de la lumière, ce qui lui permet de reprendre ici le cas du miroir concave pour lequel c'est le chemin le plus long, et non le plus court, qui est emprunté, ce qui l'autorise à écrire que l'usage des causes finales est dangereux. Ce n'est pas tout, puisque les problèmes sont encore plus importants pour la réfraction : au lieu de suivre le trajet le plus court, la lumière suit le trajet du plus court temps : « On dira qu'il a fallu choisir ; parce que dans le cas de la réfraction, le plus court temps et le plus court chemin ne peuvent s'accorder ensemble. A la

[416] Euler, *Recherche sur les plus grands et plus petits qui se trouvent dans les actions des forces*, Mémoires de l'Académie de Sciences de Berlin, 4, 1750, p 152.
[417] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article *Causes finales*.

bonne heure: mais pourquoi préférer le temps au chemin? »[418] Il poursuit en évoquant la loi de réfraction pour laquelle selon Fermat les sinus sont en raison directe des vitesses, au lieu qu'ils doivent être en raison inverse. D'Alembert conclut donc cette première partie de son étude par une mise en garde contre une utilisation abusive du principe des causes finales.

C'est dans une deuxième partie qu'il rejoint les idées d'Euler en ce qu'il trouve utile (et au moins curieux) de confronter les principes des causes finales avec les lois déterminées à partir des principes de la mécanique, qui eux sont clairs et incontestables. Cette dernière remarque nous montre que, même si les principes physiques s'accordent avec les principes métaphysiques, ils en sont indépendants pour d'Alembert. Et il présente le travail de Maupertuis qui d'après lui a appliqué des réflexions très judicieuses et très philosophiques sur les causes finales. Et il conclut par une citation de Fontenelle : « Ce qui appartient à la sagesse du Créateur, dit M. de Fontenelle, semble être encore plus au-dessus de notre faible portée, que ce qui appartient à sa puissance. »[419]

Dans les *Pensées sur l'interprétation de la nature*, Diderot consacre un chapitre aux causes finales. Avec les qualités littéraires qu'on lui connaît, il s'oppose d'emblée à l'idée même de chercher à comprendre la nature par une telle méthode : « Qui sommes-nous pour expliquer les fins de la nature ? »[420]. Utiliser les causes finales, « c'est substituer la conjecture de l'homme à l'ouvrage de Dieu; c'est attacher la plus importante des vérités au sort d'une hypothèse. »[421] Il illustre son propos en considérant un physicien interrogé sur la nature du lait. Le finaliste répond que c'est un aliment qui se prépare dans la femelle et qui est destiné à la nourriture du nouveau-né. Diderot souligne alors la pauvreté d'une telle information, puisqu'on ne dit rien sur la formation du lait, ses propriété physiologiques, ses conditions de

[418] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article *Causes finales*.
[419] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1765, article *Causes finales*.
[420] Diderot, *Pensées sur l'interprétation de la nature*, 1754, paragraphe 56, p 83.
[421] *Ibid*, p 84.

production chez les animaux et les hommes, etc. Il insiste sur les objectifs du physicien, qui doivent être d'instruire et non d'édifier, et qui lui permettront d'abandonner « le pourquoi, et [de] ne s'occuper que du comment. Le comment se tire des êtres ; le pourquoi, de notre entendement; il tient à nos systèmes ; il dépend du progrès de nos connaissances. »[422] Il va terminer son propos en insistant sur les dérives de l'utilisation de principes métaphysiques (« Combien d'idées absurdes, de suppositions fausses, de notions chimériques dans ces hymnes que quelques défenseurs téméraires des causes finales ont osé composer à l'honneur du Créateur ? […]Au lieu d'adorer le Tout-Puissant dans les êtres mêmes de la nature, ils se sont prosternés devant les fantômes de leur imagination.[423]) et en assénant une conclusion très dure : « L'homme fait un mérite à l'Éternel de ses petites vues ; et l'Éternel qui l'entend du haut de son trône, et qui connaît son intention, accepte sa louange imbécile et sourit de sa vanité. »[424]

Maclaurin a apporté son témoignage du soutien de Newton aux causes finales, en disant que ce dernier a eu plaisir à les faire considérer par le milieu scientifique, alors que Descartes a essayé de les faire rejeter. Il reproche à Descartes la justification qu'il a donnée (petitesse de l'homme devant la grandeur des desseins de Dieu) pour ce rejet, alors qu'il s'est montré présomptueux dans la conception de sa théorie physique : « Il est surprenant que cet auteur regarde comme une plus grande présomption de prétendre à la connaissance des causes finales, que de vouloir déduire un système complet de l'univers de la nature de la divinité considérée comme la souveraine cause efficiente, ou, après avoir rejeté les causes mentales et finales, rendre raison de tout par un mécanisme ou une nécessité métaphysique ou matérielle. »[425]

[422] *Ibid*, p 85.
[423] *Ibid*, pp 85 et 86.
[424] Ibid, p 86.
[425] Maclaurin, *Exposition des découvertes philosophiques de M le Chevalier Newton*, Paris, Durand et Pissot, 1749, p 29.

Pemberton, newtonien comme Maclaurin, semble s'intéresser plus aux causes efficientes, qu'il nomme tout simplement causes, qu'aux causes finales. Il s'intéresse à la théorie de la gravitation et remonte jusqu'à Galilée. Chacun s'accorde à reconnaître à Galilée la découverte de la loi du mouvement accéléré de chute libre des corps, du mouvement parabolique d'un projectile, mais tous acceptent cette ignorance de la cause de la gravitation. Par contre il est possible de connaître ses effets. « […] Newton nous a appris de plus, que cette force de gravitation s'étend jusqu'à la lune, et fait que cette planète gravite autant vers la terre, que ferait aucun des corps qui nous environnent s'ils étaient placés à la même distance ; il a démontré aussi, que toutes les planètes gravitent vers le soleil, et l'une vers l'autre ; et que leurs mouvements respectifs dépendent de cette gravitation. Il a prouvé toutes ces vérités par des principes géométriques, qui ne perdent rien de leur force, parce qu'on ignore la cause qui fait que deux corps gravitent mutuellement l'un vers l'autre. »[426]

Nous avons déjà rencontré cette mise en relation d'une cause et d'un effet avec d'Alembert qui, se montrant réticent sur l'utilisation du concept de force, souhaiter concentrer ses efforts sur la seule recherche des effets de celle-ci. Le philosophe écossais David Hume, un des promoteurs de l'empirisme, a longuement abordé cette question dans plusieurs de ses ouvrages. Il estime que les raisonnements sur les questions de fait ou d'existence se fondent sur la relation de cause à effet. Cette relation ne peut être connue a priori, elle ne peut pas être une relation déductive, c'est-à-dire qu'il faut nécessairement s'appuyer sur l'expérience (la cause empiriste : « Là où il n'y a pas d'expérience, il n'y a pas d'idée »). Il reprend à son compte dans son discours la conception newtonienne de la science, partir de l'expérience pour arriver à énoncer des lois : « Comme le pouvoir par lequel un objet en produit un autre n'est jamais discernable à partir de leur idée seule, nous sommes évidemment avertis des relations de cause à effet par l'expérience et non par quelque réflexion ou raisonnement abstraits. »[427] Mais avant de prêter foi à une relation de cause à effet, il faut avoir mis en œuvre une répétition des expériences, ce n'est qu'après l'observation de cette répétition qu'on pourra proposer une propriété causale : « Quand beaucoup de cas semblables se présentent et que le même objet est toujours suivi du même événement, nous commençons alors à concevoir la

[426] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, introduction p 20.
[427] Hume, *Traité de la nature humaine*, Aubier, Paris, 1983, Livre I, troisième partie, section I, p.141.

notion de cause et de connexion. »[428] Ayant cette idée de cause, nous pouvons alors élaborer une prédiction des événements associés : « La seule utilité immédiate de toutes les sciences est de nous enseigner comment nous pouvons régler les événements futurs par leurs causes. »[429]

Hume cite Newton qui a écrit dans le scholie général du livre III des *Principia mathematica* la célèbre phrase « J'ai expliqué les phénomènes du ciel et de notre mer par la force de gravitation, mais je n'ai pas encore assigné la cause de ce pouvoir. » Il veut ainsi montrer que la physique peut se contenter d'utiliser les principes de l'inertie et les lois de la mécanique, sans aborder la question difficile de la relation de cause à effet (il fournit une définition peu exploitable comme : « nous pouvons définir une cause comme un objet suivi d'un autre objet […] tel que, si le premier objet n'avait pas existé, le second n'aurait jamais existé. »[430]) Pour Hume on peut ramener la relation de cause à effet à une relation temporelle de succession d'événements liés.

Nous venons de voir les cas de personnages qui suivent les conceptions newtoniennes, en limitant l'utilisation des principes métaphysiques, que ce soit par conviction, ou pour ne pas risquer d'entrer dans des conflits de fond. Mais ce comportement n'a pas pu empêcher et a au contraire favorisé des attaques de certains auteurs, qui sont pour la plupart cartésiens, dont le reproche principal sera la fuite devant les responsabilités en occultant le problème des causes. L'un des plus virulents d'entre eux est Gamaches. Il commence par vouloir examiner les principes utilisés par Newton dans les *Principia mathematica*. Dans notre chapitre consacré à la complexité de la situation, nous avons cité le rejet du nationalisme scientifique exprimé par la marquise du Châtelet. Nous voyons dans les propos qui suivent que cette mise en garde avait une réelle actualité :

[428] Hume, *Enquête sur l'entendement humain*, Paris, GF Flammarion, 1983, p 145.
[429] *Ibid*, p 143
[430] Hume, *Enquête sur l'entendement humain*, Paris, GF Flammarion, 1983, p 144.

Avant que de faire usage des principes qu'on vient d'établir, je crois qu'il ne sera pas hors de propos d'entrer dans l'examen de ceux que M Newton fait servir de fondement à son système. Ce nouveau philosophe, déjà illustré par les rares connaissances qu'il avait puisées dans la géométrie, souffrait impatiemment, qu'une nation étrangère à la sienne, pût se prévaloir de la possession où elle était d'enseigner les autres, et de leur servir de modèle : excité par une noble émulation, et guidé par la supériorité de son génie, il ne songea plus qu'à affranchir sa patrie de la nécessité où elle croyait être, d'emprunter de nous l'art d'éclairer les démarches de la nature, et de la suivre dans ses opérations.[431]

Ayant mélangé les reproches injustes (*rares connaissances en géométrie*) à un nationalisme mal placé, il poursuit en reprochant à Newton de ne plus faire de physique, d'avoir transformé les causes des phénomènes en lois primordiales ; « par là toute difficulté fut aplanie, son travail ne roula plus que sur des sujets traitables qu'il sut assujettir à ses calculs ; un phénomène analysé géométriquement, devint pour lui un phénomène expliqué ; ainsi cet illustre rival de M Descartes eut bientôt la satisfaction singulière de se trouver grand philosophe par cela seul qu'il était grand géomètre. »[432] Nous n'insisterons pas sur ce qu'on ne peut pas appeler des arguments, mais il est utile de signaler que ce genre de littérature ne constitue pas une rareté, et qu'on assiste assez souvent à de tels propos, où des considérations extra-scientifiques viennent compléter, voire remplacent les propos de fond.

Avant d'observer à travers des exemples l'évolution de la pratique de la physique, nous devons nous arrêter un instant sur une théorie qui a connu un succès assez important au 17e et au 18e siècle, il s'agit de l'occasionnalisme. Théorie embrassant tout le champ métaphysique, elle s'applique aussi en ce qui nous concerne à la physique par l'intermédiaire des causes occasionnelles. Disons pour résumer que tous les mouvements et les pensées dépendent en premier lieu de la volonté de Dieu, ce qui exclut dans un certain sens l'existence des causes efficientes. Donc les mouvements, et les événements ne sont, les uns à l'égard des

---

[431] de Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, troisième dissertation, Principes de la philosophie de M Newton, p 67.

[432] de Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, troisième dissertation, Principes de la philosophie de M Newton, p 68.

autres, que des occasions, ou des causes occasionnelles (qui peuvent jouer le rôle des causes efficientes).

Jean Bernoulli, sans être un défenseur des causes occasionnelles, propose leur intervention au sein d'une réflexion. Dans son *Essai d'une nouvelle physique céleste*, il présente la recherche de la cause des faits, qui nécessite une utilisation de principes clairs et intelligibles, et compare le principe d'impulsion et le principe d'attraction. Pour un esprit mécaniste comme le sien, le principe d'impulsion peut tout à fait s'admettre, le choc causant une action sur l'objet qui le reçoit, ce qui entraîne son déplacement. C'est, dit-il, une action dont il résulte un effet. Il ajoute : « Qui veut concevoir une action sans effet, il veut concevoir une chimère. »[433] Cette dernière remarque anticipe bien sûr les arguments qu'il va développer au sujet de l'attraction. Comme l'action d'un corps dépend uniquement de son mouvement (tout se fait par contact pour le partisan du mécanisme), il est impossible qu'un corps en repos puisse agir sur un autre. « Ainsi je ne vois pas comment deux corps éloignés et en repos peuvent s'attirer mutuellement, c'est-à-dire, se mettre en mouvement d'eux-mêmes ; ce serait un effet sans cause, et une action sans principe d'agir. »[434] Comment peut-on remédier à cette contradiction ? Faire appel à la cause première (Dieu) et aux causes secondes (causes occasionnelles) pourrait être une solution, mais qui ne satisfait pas grand monde selon Bernoulli, et nous nous trouvons donc conduits à la perplexité devant l'utilisation de la force à distance qui ne le satisfait pas :

> *Vouloir recourir à la volonté immédiate de Dieu, et dire que Dieu les pousse l'un vers l'autre avec une certaine force, lorsqu'ils sont à une certaine distance de l'un à l'autre, ce serait bannir les causes secondes de la nature ; il vaudrait autant dire que tous les phénomènes, et tout ce qui arrive dans l'univers, s'exécute immédiatement par la cause première, je veux dire, par la volonté divine, et que les causes secondes n'y contribuent que comme des occasions qui déterminent l'être souverain à*

[433] Jean Bernoulli, *Essai d'une nouvelle physique céleste*, in *Pièces qui ont remporté le prix double de l'Académie Royale des Sciences en 1734*, Paris, Imprimerie Nationale, 1734, p3.
[434] *Ibid*, p 4.

agir d'une telle ou telle manière selon les diverses contingences : mais ce serait introduire de nouveau le système des causes occasionnelles, qui n'a guère contenté les Philosophes de bon goût.[435]

Nous pouvons compléter le texte de Bernoulli par celui d'un réel partisan de l'occasionnalisme, Gamaches, qui, cette fois, ne profite pas de ses explications pour avancer des commentaires personnels et bien peu scientifiques. Il considère le principe du mouvement d'un corps, en soulignant qu'il n'est pas une qualité inhérente au corps. Comme le mouvement est respectif, si deux corps sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, « la vertu motrice n'est pas plus la qualité de l'un que la qualité de l'autre, et qu'ainsi elle n'est la qualité ni de l'un ni de l'autre. »[436] Cette considération nous conduit à penser que le principe du mouvement est un principe général, qu'on doit chercher dans « la volonté toute puissante d'un Être supérieur, qui range à son gré toutes les parties de l'univers, et qui met entre elles tous les rapports que bon lui semble. »[437] La conclusion est immédiate : puisqu'un corps ne peut en mouvoir un autre, il ne peut que lui occasionner du mouvement. Il reste à déterminer comment le premier corps occasionnera du mouvement au second. Il montre que seule la rencontre des deux corps peut occasionner le mouvement du second :

Cependant regardons-y de près, nous nous apercevrons bientôt que la rencontre des corps peut seule être la cause de la distribution du mouvement, du moins s'il faut que cette cause soit générale. En effet, supposons qu'il y eût une loi par laquelle tous les corps dussent ou s'attirer ou se repousser en se présentant simplement les uns aux autres ; il est clair que comme l'attraction ou l'expulsion serait réciproque de toute part, tout demeurerait en équilibre, et qu'ainsi le mouvement serait détruit par la loi même, suivant laquelle nous voudrions qu'il se communique.[438]

L'utilisation des causes occasionnelles donne donc à Gamaches, et aux cartésiens en général, l'opportunité de rejeter une fois de plus la loi d'attraction à distance.

[435] *Ibid*, p 4.
[436] De Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, p 36.
[437] *Ibid* p 37.
[438] *Ibid* p 37.

L'utilisation des causes finales, ou d'autres principes métaphysiques, n'étant pas satisfaisante pour l'esprit selon un certain nombre de savants, on assiste à des tentatives d'explications des phénomènes physiques par des causes efficientes. Les seules lois de la mécanique interviennent. Deux exemples seront présentés ici, qui illustrent des tentatives d'explication mécanique de la loi de gravitation, le premier par Vivens, le second par Lesage.

François de Vivens, économiste, agronome, expérimentateur scientifique, et intéressé par la science de son temps, a écrit deux ouvrages de physique. Peu mathématisés par choix, ses ouvrages souhaitent expliquer les principes de la physique. Dans son livre *La nouvelle théorie du mouvement*, il explique les travaux de Galilée, Kepler, Descartes, Fermat, Newton, Leibniz, Maupertuis, Clairaut, Mairan, des Bernoulli, il utilise les principes métaphysiques comme la raison suffisante et la moindre quantité d'action. La principale originalité de son travail consiste en une explication de la gravitation par l'action de la lumière qui agit sur les corps.

Dans le chapitre XXIII, intitulé *Du mouvement des astres*, il recherche dans le problème V la cause générale et physique du mouvement des astres. En trois phrases, il « résout » le problème étudié :

> *I. Le Soleil est une masse immense toujours interposée entre les Planètes et les Rayons qui partent continuellement des Etoiles.*
>
> *II. Les Planètes interceptent aussi une partie des Rayons Stellaires ; donc les Planètes, en raison directe de leur densité et inverse de leur éloignement, doivent être poussées l'une vers l'autre, et toutes ensemble vers le Soleil, et le Soleil doit se mouvoir un peu vers elles ; c'est-à-dire que son centre sera déplacé.*

III. Mais le Soleil étant beaucoup plus près des Planètes qu'elles ne le sont des Etoiles, sa lumière, dans la même proportion plus dense, aura une force capable de soutenir les Planètes et de les empêcher de tomber tout à fait sur lui, comme elles seraient s'il était absolument sans lumière.[439]

Il conclut sur cette dernière phrase que la lumière est la cause générale et physique du mouvement des astres. Il poursuit sur le même sujet dans le problème VI pour justifier que les planètes ont une trajectoire elliptique.

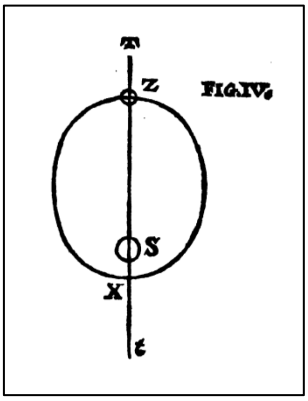


Fig.IV. Une Planète A continuerait à tomber perpendiculairement sur le Soleil S, selon la direction de la force équilibrante interceptée Tt, qui leur est commune, si le Soleil était sans lumière.

Mais la Planète A tombant par la ligne Tt, et commençant à trouver de la résistance au point Z, elle se détourne de sa chute perpendiculaire, et elle décrit en tombant la ligne courbe ZX, en accélérant toujours son Mouvement jusqu'au point le plus bas X ; et par les vitesses acquises au point X, elle décrit en remontant la courbe semblable XZ, en ralentissant son Mouvement jusqu'au point le plus élevé Z.[440]

Vivens fait suivre cette explication d'une scholie, dans laquelle il écrit que le corps, tombant librement, décrit plus naturellement une courbe rentrante, telle qu'une ellipse.

Nous avons annoncé deux tentatives d'explication de la gravitation par des causes mécaniques. Nous n'insisterons pas sur la première, anecdotique et facilement contestable, mais la deuxième est beaucoup plus solide, et, même si elle n'a pas été retenue par les scientifiques, elle a été reprise par plusieurs auteurs des 19e et 20e siècles. La thèse de Lesage peut être résumée très simplement. Un flot de très petits corpuscules venant de l'extérieur de

[439] Vivens, *Nouvelle théorie du mouvement*, Londres, 1749, p 142.
[440] Vivens, *Nouvelle théorie du mouvement*, Londres, 1749, p 147.

notre monde et par tous les côtés, pousse les corps les uns contre les autres. Un corps isolé est en équilibre puisque les flux de corpuscules venant de tous sens se compensent. Quand deux corps sont en face l'un de l'autre, ils se font écran, ce qui les entraînent l'un vers l'autre, et explique la gravitation. Lesage retrouve la loi inverse du carré de Newton par un raisonnement qui utilise la densité des corpuscules variant selon la distance. Les corpuscules utilisés dans cette théorie ont été nommés corpuscules ultra-mondains ou corpuscules gravifiques.

La théorie des corpuscules ultra-mondains a fait l'objet de publications, Lesage a eu un certain nombre de correspondants, et il a beaucoup échangé avec eux, en particulier avec Sigorgne, newtonien bien connu. Dans une lettre inédite en date du 21 septembre 1771, Lesage écrit à Sigorgne : « je suis charmé pour mes corpuscules gravifiques, que tous les jours vous vous éloigniez de plus en plus des causes occasionnelles et de l'harmonie établie. »[441] Cet extrait laisse entendre que Sigorgne est séduit par les corpuscules ultra-mondains et la théorie mécanique plutôt que par des principes métaphysiques. Nous avons trouvé à la bibliothèque municipale de Mâcon un manuscrit inédit de Sigorgne intitulé *De l'efficace des causes secondes, avec une explication physique de l'attraction*. Nous devinons quelle est l'explication physique de l'attraction indiquée dans le titre, elle concerne Lesage et ses corpuscules, le chapitre IV du manuscrit leur est entièrement consacré.

Il annonce la méthode de Lesage qui selon lui va permettre de répondre à la grande opposition que subit la notion de gravitation universelle. Il situe le lieu où les corpuscules ont été créés par Dieu, loin de l'espace où notre monde a été créé, et évoque le moment où ils ont été lancés à une vitesse prodigieusement supérieure à celle de la lumière vers l'espace intra-mondain. « or ces conditions possibles suffisent pour expliquer la loi, la réciprocité, l'universalité de la gravitation, et tous les phénomènes que la pesanteur nous montre dans les cieux et sur la Terre. »[442] Le lien avec la pesanteur est établi qualitativement, mais comme on

[441] Dossier Sigorgne, manuscrit 201, Bibliothèque municipale de Mâcon, feuillet 40.

[442] Sigorgne, *de l'Efficace des Causes Secondes, avec une explication physique de l'attraction*, Chapitre IV, de la Cause physique de l'attraction, BM Mâcon, Manuscrit 201, feuillets 141 à 166.

peut retrouver mathématiquement la loi des inverses carrés, il est obtenu aussi quantitativement : « La pesanteur […] agit très prochainement sur les corps mus comme sur les corps en repos, dans un milieu qui n'oppose aux projectiles célestes aucune résistance qu'on puisse apercevoir. Or ces phénomènes dérivent sans aucun effort de l'hypothèse que je viens de transcrire. »[443] Sigorgne réfute un argument qui consiste à reprocher de perdre un grand nombre de corpuscules, qui vont « se mettre en embuscade dans une infinité de lieux, où ils n'auront jamais l'occasion d'exercer leurs forces, faute de corps qui y arrivent, ou qui y soient placés. »[444] Sa réponse est que le même phénomène existe pour la lumière du soleil et des étoiles qui se dirige dans quantité d'endroits où il n'y aura jamais d'observateurs. Il ne lui reste plus qu'à conclure que l'explication par les corpuscules de Lesage est acceptable sans hésitation : « Et l'attraction ne pouvant en soi être aussi mécanique que l'impulsion, dès que celle-ci, comme nous l'avons prouvé, est une cause physique, et non simplement occasionnelle, il nous paraît qu'il n'y a plus lieu à aucune hésitation. »[445]

La théorie des corpuscules ultra-mondains, insuffisamment mathématisée à une époque où la physique quantitative règne sur le monde scientifique, ne sera pas reprise mais sera régulièrement évoquée, par Maxwell, ou encore par Henri Poincaré en 1918, ou Jean-Marc Lévy-Leblond en 1996. Pour en terminer avec le débat sur la cause de la gravitation, nous avons d'Alembert qui, dans l'article *Attraction* de l'*Encyclopédie*, estime injuste le rejet du principe d'attraction, sur la seule raison qu'on ne peut concevoir qu'un corps puisse agir à distance sur un autre. Il est donc plus sage de ne pas chercher à trouver la nature de la force de pesanteur. D'une manière générale, si la cause est inconnue, on peut ne pas chercher à la trouver (« ce serait nous exposer à faire un roman, que de vouloir raisonner sur des causes qui nous sont inconnues. »), mais il ne faut pas se dispenser d'étudier les effets. Il faut donc poursuivre nos recherches. D'après d'Alembert, Newton lui-même a été hésitant sur les causes de la gravitation qu'il a regardée parfois comme matérielle, et d'autres fois comme immatérielle. Il conclut son propos : « L'origine de l'attraction à distance reste mystérieuse

443 *Ibid*.
444 *Ibid*.
445 *Ibid*.

mais la question passe au second plan. La gravitation est un fait, elle cesse d'être un problème. »[446]

On pressent ainsi que la communauté scientifique va se diriger lentement vers un consensus au sujet de la méthode à mettre en pratique en physique. D'Antoni nous donne un résumé assez fidèle de ce qui sera préconisé. Selon lui, l'expérience nous permet d'observer des effets, l'analyse de ceux-ci nous conduit à des causes particulières. De celles-ci on cherche à connaître des causes plus générales. Mais il ne faut pas oublier de redescendre à partir de ces causes pour développer la théorie et prédire les phénomènes. « Il est évident que si on néglige l'emploi des deux méthodes dans l'ordre qui leur est propre, non seulement on sera perpétuellement dans l'incertitude sur l'existence de nos principes dans la nature, ainsi que sur leur combinaison de la manière indiquée ; mais on sera continuellement exposé à ne recueillir, après maintes fatigues, que des songes et de pures illusions, pour fruit de ses recherches et de ses méditations. »[447]

La méthode à utiliser dans la recherche en sciences ne semble pas avoir besoin d'autre chose que ce qui est décrit par d'Antoni, or on constate que la référence à Dieu continue à alimenter les contenus scientifiques, même si la part qu'elle y tient évolue un peu.

[446] Diderot et d'Alembert, *Encyclopédie* ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris, 1751-1772, article *Attraction*.
[447] d'Antoni, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777, p 14.

3.4 La place de Dieu dans la physique du 18e siècle

Nous avons eu plusieurs occasions de constater dans les précédents chapitres que Dieu est très présent dans les écrits scientifiques du 17e siècle, et que le débat sur le rôle qu'on entend lui faire jouer au 18e siècle est important, nous allons essayer de le montrer ici. Nous pouvons commencer avec Descartes qui nous conduit à considérer deux éléments dans cette réflexion.

Il avance tout d'abord ce qu'on a appelé la preuve ontologique de l'existence de Dieu. À partir de notre pensée finie, nous pouvons imaginer quelque chose qui nous dépasse infiniment, qui est du domaine de la perfection ; une perfection doit nécessairement inclure l'existence, donc nous pouvons en déduire l'existence de Dieu. C'est par exemple ce qu'il écrit dans la cinquième méditation métaphysique : « Car encore qu'il ne soit pas nécessaire que je tombe jamais dans aucune pensée de Dieu, néanmoins, toutes les fois qu'il m'arrive de penser à un être premier et souverain, et de tirer, pour ainsi dire, son idée du trésor de mon esprit, il est nécessaire que je lui attribue toutes sortes de perfections […] Et cette nécessité est suffisante pour faire que par après (sitôt que je viens à reconnaître que l'existence est une perfection) je conclus fort bien que cet être premier et souverain existe. »[448] La preuve de Descartes sera mise en discussion en de nombreuses occasions, mais l'idée même de preuve continue au 18e siècle d'alimenter les réflexions, et plusieurs auteurs présentent à cette époque des arguments prouvant selon eux cette existence.

[448] Descartes, *Méditations métaphysiques*, notes et commentaires de A Vergez, Paris, Nathan, 1983, cinquième méditation p 96.

Le deuxième élément retenu chez Descartes concerne l'utilisation de Dieu dans les explications ou les justifications qu'il a pu fournir dans sa physique. Le principe d'inertie est énoncé clairement par le philosophe français en 1644 ; il constitue pour lui la seconde loi de la nature, et dit que tout corps qui se meut, tend à continuer son mouvement en ligne droite. Il ajoute : « Cette règle [...] dépend de ce que Dieu est immuable, et qu'il conserve le mouvement en la matière par une opération très simple.[449] »

Nous allons essayer de reprendre ces deux idées pour l'époque qui nous concerne, cela nous conduit à proposer deux parties dans ce chapitre, qui répondront à ces questions : trouve-t-on dans les textes de physique du 18e siècle des démonstrations de l'existence de Dieu ? Comment la référence à Dieu évolue-t-elle dans les ouvrages de physique ? Nous étudierons d'abord la deuxième question.

[449] Œuvres de Descartes, publiées par Charles Adam & Paul Tannery, tome IX, Méditations et Principes, librairie philosophique J. Vrin, 1996, ISBN 2 7116 1267 8, page 85.

3.4.1. L'utilisation de Dieu dans la physique

Dans la physique proposée par Leibniz, Dieu est omniprésent. Notre monde est le meilleur des mondes possibles, il fonctionne selon des principes établis par le Créateur : simplicité, économie, raison suffisante, … : « Ainsi, on peut dire que, de quelque manière que Dieu aurait créé le monde, il aurait toujours été régulier et dans un certain ordre général. Mais Dieu a choisi celui qui est le plus parfait, c'est-à-dire celui qui est en même temps le plus simple en hypothèses et le plus riche en phénomènes, comme pourrait être une ligne de géométrie dont la construction serait aisée et les propriétés et effets seraient fort admirables et d'une grande étendue. »[450]

Le Hollandais Musschenbroek a une position très voisine de celle de Leibniz. Tout-puissant, Dieu aurait pu mettre en place d'autres lois dans le monde que celles qui nous régissent. « Notre esprit est si borné, que nous ne voyons pas bien les raisons, pour lesquelles l'être suprême a fait ce choix et tout réglé de cette manière ; mais il nous suffit de savoir, qu'il a tout fait et tout disposé avec beaucoup de sagesse. »[451] Musschenbroek, partisan des causes finales (« l'Être suprême n'a rien fait sans s'être proposé un certain but »[452], estime que le devoir de l'homme est de chercher les causes finales des choses qui nous entourent. Il propose alors plusieurs questions pour illustrer son propos. Il se demande par exemple pourquoi nous avons des yeux et apporte la réponse : « Il est certain que les yeux nous ont été donnés, afin que nous puissions voir et connaître les corps qui sont hors de nous, leur figure, leur couleur, leur situation, leur grandeur et tout ce qui se manifeste en eux ; afin que nous puissions aussi les faire servir à notre usage, et reconnaître par là la magnificence, la puissance, et la sagesse

[450] Leibniz, *Discours de Métaphysique*, Paris, Folio Essais, Gallimard, 2004, p 157.
[451] Musschenbroek, Essai de physique, Samuel Luchtmans, 1739, tome I, p 9.
[452] *Ibid*. p 3.

de notre Créateur. »[453] Il se demande encore pourquoi il pleut, et apporte une triple réponse. C'est pour qu'il y ait sur terre des fontaines et des rivières, c'est aussi pour que les plantes poussant à des altitudes élevées puissent être humectées et grandir, c'est aussi « afin que l'air soit purifié de toutes les mauvaises exhalaisons qui sortent de la terre, et qui par leur infection corrompent ce même air, et le rendent par conséquent nuisible à la santé et à la vie des animaux. »[454]

L'action de Dieu est permanente, il est à l'origine des mouvements, ce qui explique la difficulté que nous rencontrons pour en comprendre la cause, selon Fontenelle : « La matière ne se meut point par elle-même, et il n'y a qu'un être étranger et supérieur à elle qui puisse la mouvoir. Tout mouvement est une action de Dieu sur la matière ; et il n'est pas étonnant que nous n'ayons pas une idée claire de cette action prise en elle-même mais nous avons une idée très claire de ses effets. »[455]

Nous venons de rencontrer plusieurs auteurs qui font fréquemment appel à Dieu dans leurs ouvrages, souvent pour démontrer métaphysiquement une propriété, mais aussi, nous le verrons plus loin, pour justifier son existence par ses œuvres. Ce n'est pas le cas des *Principia mathematica* de Newton qui sont dans l'ensemble exempts de référence à Dieu et ne font appel pour l'essentiel qu'aux mathématiques. Seul le scholie général qui a été tellement étudié fait référence au Créateur et aux causes finales, Newton y parle du dessein de Dieu quand il a créé le monde, par exemple pour éviter un effondrement du monde sur lui-même grâce à la gravitation universelle :

[453] *Ibid*. p 3.
[454] *Ibid*. p 3.
[455] Fontenelle, *Théorie des tourbillons cartésiens* avec des réflexions sur l'attraction, in Œuvres, Paris, Salmon, 1825, p 70.

> *Or, cet arrangement aussi extraordinaire du Soleil, des planètes et des comètes n'a pu avoir pour source que le dessein et la seigneurie d'un être intelligent et puissant. Si de plus les étoiles «fixes» sont les centres de systèmes semblables, toutes dépendront de la seigneurie d'un Seul, puisqu'elles seront construites selon le même dessein : d'autant plus que la lumière des fixes est de même nature que la lumière du Soleil et que tous les systèmes se renvoient à tous mutuellement la lumière. Et, afin que les systèmes des fixes ne tombent pas les uns sur les autres à cause de leur gravité, cet Être a placé ces systèmes à une immense distance les uns des autres.* [456]

Un peu plus loin il revient sur les qualificatifs attribués à Dieu, en particulier sur son rapport à l'infini, à l'espace et au temps absolus : « Il n'est pas l'éternité ni l'infinité, mais il est éternel et infini ; il n'est pas la durée ni l'espace, mais il dure et est présent. Il dure toujours et est présent partout, et, en existant toujours et partout, il constitue la durée et l'espace. »[457] MacLaurin, disciple de Newton, souligne dans un ouvrage intitulé *Exposition des découvertes philosophiques de M. le chevalier Newton*, la prudence et la circonspection de son maître sur les problèmes métaphysiques, et il justifie cette attitude comme Newton l'avait fait : « Comme un aveugle ne connaît pas les couleurs, et n'a aucune idée de la sensation de ceux qui voient, de même nous n'avons pas de notion de la manière dont Dieu connaît et agit. »[458]

Sur le plan de l'espace et du temps on retrouve chez Gamaches les mêmes préoccupations que celles énoncées précédemment. Dans les commentaires qu'il donne à l'intérieur de la partie consacrée à la définition de l'espace et du temps, il écrit en note de bas de page sa vision de la relation de Dieu avec le temps, en résonance avec le scholie général de Newton : « On se figure par une erreur d'imagination qu'indépendamment de l'existence des créatures, il y a une certaine durée successive, qui n'a point eu de commencement, et qui ne peut avoir de fin. C'est même de cette durée qu'on forme l'éternité de Dieu ; comme si l'être

[456] Newton, Isaac, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle,* traduction de madame la Marquise du Châtellet, Paris, 1756, scholie général.

[457] *Ibid*.

[458] MacLaurin, *Exposition des découvertes philosophiques de M. le chevalier Newton*, traduit par Lavirotte, Paris, Durand et Pissot, 1749, p 414.

infiniment parfait pouvait éprouver quelque succession, lui qui possède son être tout à la fois. Ayons des idées plus saines, Dieu n'a point été, il ne sera point, mais il est. Pour la créature, elle ne jouit de son existence qu'en détail : nous n'existons pas encore pour l'avenir, et nous ne sommes pour le présent, qu'en cessant d'être pour le passé ; nous nous succédons continuellement à nous-mêmes. »[459]

D'Alembert a une explication de l'absence quasi générale de références métaphysiques dans les ouvrages scientifiques de Newton. Il écrit dans le *discours préliminaire* de l'*Encyclopédie* que Newton ne négligeait pas la métaphysique, et connaissant son importance pour l'accès à la connaissance, puisqu'elle seule peut nous conduire à des notions exactes de tout. S'il s'est abstenu d'en parler dans ses ouvrages célèbres, c'est soit parce que la métaphysique est trop souvent « incertaine et contentieuse »[460], soit qu'il « craignît qu'à l'ombre de son autorité on n'abusât de sa métaphysique comme on avait abusé de celle de Descartes pour soutenir des opinions dangereuses ou erronées, il s'abstint presque absolument d'en parler dans ceux de ses écrits qui sont le plus connus. »[461] Il termine en écrivant que pour connaître ses positons sur ce sujet, il faut consulter les ouvrages de ses disciples. Pourtant, ce que laisse entendre d'Alembert, qu'on puisse connaître la pensée de Newton sur la métaphysique par les écrits de ses disciples, a été plusieurs fois contesté, par le fait qu'on reproche à ces disciples d'aller plus loin que leur maître, et ainsi de déformer sa pensée. Cela a été le cas avec les opinions affichées par les Newtoniens sur l'attraction, en tant que qualité inhérente, ou universelle, ou essentielle de la matière, alors que Newton avait pris beaucoup de précautions pour présenter cette notion.

Fontenelle s'est exprimé sur cette dérive constatée des newtoniens au sujet de l'attraction. Puisque les corps ne se déplacent que par la volonté de Dieu, ils peuvent affirmer

[459] Gamaches, *Astronome physique*, ou Principes généraux de la nature, Paris, Jombert, 1740, p 28, note de bas de page.
[460] Termes repris de Fontenelle. Signifie incertaine et remplie de litiges.
[461] D'Alembert, *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*. , p XXVII.

que les corps peuvent aussi s'attirer par la même volonté de Dieu. Or, selon Fontenelle, il y a une grande différence entre les deux affirmations :

> *Dans le premier cas, la volonté de Dieu ne fait que mettre en œuvre une propriété essentielle de la matière, sa mobilité, et déterminer au mouvement l'indifférence naturelle qu'elle a au repos ou au mouvement. Mais, dans le second cas, on ne voit point que les corps aient par eux-mêmes aucune disposition à s'attirer : la volonté de Dieu n'aurait aucun rapport à leur nature, et serait purement arbitraire, ce qui est fort contraire à tout ce que nous offre de toutes parts l'ordre de l'univers.*[462]

Fontenelle ajoute que si on admet un tel arbitraire, la preuve philosophique de la spiritualité de l'âme tomberait, « Dieu aurait aussi bien pu donner la pensée à la matière que l'attraction. »[463]

Les critiques pleuvent, mais des deux bords. Les newtoniens ne sont pas en reste, Sigorgne n'hésite pas à opposer Descartes et Newton pour critiquer le premier. Selon Sigorgne, la pratique de Descartes consiste à fermer les yeux et à essayer de comprendre comment les choses ont été faites, ou « comment l'univers est gouverné. » Newton a suivi la route contraire, « l'Être Suprême étant souverainement libre, on ne peut connaître ses ouvrages que par le témoignage des sens, qui nous tiennent lieu d'une révélation naturelle. »[464] Il va jusqu'à accuser Descartes de faire injure à Dieu, et de prendre le chemin de l'erreur, comme ce fut le cas lors du débat sur la conservation de la force entre cartésiens et leibniziens. La mauvaise utilisation du principe de simplicité est la cause des erreurs rencontrées. Il cite Malebranche, qui « a prudemment remarqué que ce principe est de pure théorie et nullement de pratique : nous savons, dit-il, que Dieu agit toujours par les voies les plus simples et les plus fécondes ; mais nous ne sommes point en état de déterminer quelles elles sont. »[465] La conclusion de Sigorgne concerne la nécessité de réaliser des expériences, il

---

[462] Fontenelle, *Théorie des tourbillons cartésiens* avec des réflexions sur l'attraction, in Œuvres, Paris, Salmon, 1825, p 71.
[463] *Ibid*. p 71.
[464] Sigorgne, *Institutions newtoniennes*, Paris, Quillau, 1747, p 71.
[465] *Ibid*. p 72.

ajoute « qu'une plus grande simplicité apparente n'en est point toujours une ; par là les fautes de ceux qui nous ont précédé, ne seront pas perdues pour nous, et nous ne craindrons pas de nous égarer dans la recherche que nous allons faire des lois de l'attraction. »[466]

Voltaire, dans les *Éléments de la philosophie de Newton*, participe également à cette critique du comportement de quelques auteurs. Prenant pour appui l'idée que le mouvement doit prendre son origine dans une cause immatérielle, qui est Dieu, il nous invite à prendre garde à ne pas tomber, comme certains, dans l'erreur qui consiste à attribuer à Dieu ce qui relève de causes physiques, quand on n'a pas trouvée celles-ci. « Par exemple, je veux expliquer pourquoi un poids de quatre livres est contrepesé par un poids d'une livre ; si je dis que Dieu l'a ainsi réglé, je suis un ignorant ; mais je satisfais à la question si je dis que c'est parce que le poids d'une livre est quatre fois autant éloigné du point d'appui que le poids de quatre livres. »[467]

Dans ce dernier extrait, Voltaire se moque des personnages qui, comme Trabaud, se contentent effectivement d'affirmations telles que celle qu'il dénoncée ; Trabaud écrit par exemple : « La résistance que les corps font au mouvement, est l'effet immédiat de la volonté très libre du Créateur, qui a établi la loi des chocs. »[468] Mais Voltaire ne rejette pas nécessairement la référence à Dieu quand on fait intervenir les premiers principes : « c'est alors que ne pas recourir à Dieu est d'un ignorant ; car ou il n'y a point de Dieu, ou il n'y a de premier principe que dans Dieu. »[469] D'Alembert est presque dans les mêmes dispositions quand il déclare dans le *discours préliminaire* de l'*Encyclopédie* qu'une religion révélée est nécessaire pour combler les manques constatés dans notre connaissance de la nature de l'homme. La raison seule ne peut nous éclairer sur cette nature. Il ajoute qu'on peut dire la

[466] *Ibid*. p 73.

[467] Voltaire, *Éléments de la philosophie de Newton*, in *Œuvres complètes*, tome dix-neuf, Paris, Lefèvre et Deterville, 1818, p 58.

[468] Trabaud, *Principes sur le mouvement et l'équilibre*, Paris, Desaint et Saillant, premier traité, 1741, p 214.

[469] Voltaire, *Éléments de la philosophie de Newton*, in *Œuvres complètes*, tome dix-neuf, Paris, Lefèvre et Deterville, 1818, p 59.

même chose de l'essence de l'être auquel nous devons notre existence, et du genre de culte qu'il exige de nous. Pemberton confirme ces doubles propos par la déclaration suivante : « Les principes de cette philosophie sont de ne jamais, sous quelque prétexte que ce soit, ouvrir la porte aux conjectures concernant les puissances et les lois de la nature, mais de s'attacher avec tout le soin possible à rechercher les lois réelles et véritables par lesquelles Dieu gouverne le monde. »[470]

Pemberton nous permet de clore cette partie consacrée à l'intervention de Dieu dans la physique. Il rapporte une réflexion de Newton, issue de son *Traité d'Optique*, permettant de conclure contre l'éternité du monde. Les inégalités dans les mouvements des planètes vont en augmentant, « jusqu'à ce qu'elles rendent la présente contribution de la nature incapable de répondre au but que Dieu s'est proposé jusqu'ici en la formant. »[471] C'est pour lui une preuve que notre monde n'est pas éternel, puisqu'il doit s'arrêter au bout de quelques siècles. Pemberton est conscient du fait que cette affirmation de Newton lui a valu des accusations d'impiété, « comme si c'était taxer le Créateur du monde d'avoir manqué de sagesse en formant un ouvrage périssable. »[472] Or, ajoute Pemberton, si ce que Newton a conclu est vrai au sujet de l'irrégularité croissante des mouvements des corps célestes, et c'est le cas, l'accusation d'impiété doit retomber sur l'accusateur. « Il ne nous est sûrement pas possible de connaître tous les desseins qu'une intelligence sans bornes a eus en créant ce monde, et par conséquent nous ne sommes nullement qualifiés à déterminer combien de temps il doit durer. »[473] La durée du monde doit être celle que Dieu a voulue. Il termine en donnant un exemple qui lui semble significatif. Le corps d'un animal montre encore mieux la sagesse de Dieu que ne pourrait le faire l'ensemble des planètes, et pourtant ils disparaissent tous au bout de quelques années.

[470] Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, introduction p 16.
[471] *Ibid*. p 218.
[472] *Ibid*. p 218.
[473] *Ibid.* p 219.

Utilisé pour convaincre les lecteurs, en appuyant une démonstration, en intervenant dans le cadre des principes utilisés, ou lors de la recherche des causes, Dieu reste présent dans les écrits scientifiques. Les remarques faites précédemment montrent néanmoins une utilisation de Dieu qui n'est plus systématique. Depuis Newton, sans les occulter complètement, un certain nombre d'ouvrages sépare les questions métaphysiques des questions purement scientifiques. Mais on continue pourtant à mettre en relation les phénomènes scientifiques et l'existence de Dieu, voire justifier cette dernière par quelques manifestations des phénomènes, comme nous allons le voir.

3.4.2. La physique prouve l'existence de Dieu

Un grand nombre d'auteurs se retrouvent pour inférer l'existence de Dieu à partir des phénomènes observés dans la nature ou l'univers. Fontenelle par exemple dans sa *Préface sur l'utilité des mathématiques et de la physique*, estime que ce qu'il appelle le grand ouvrage (qui constitue l'univers), dont la connaissance nous montre les merveilles, « nous donne une si grande idée de son Ouvrier, que nous en sentons notre esprit accablé d'admiration et de respect. »[474] Il insiste en particulier sur les deux sciences que sont l'astronomie et l'anatomie ; la première par les distances et le grand nombre de corps célestes nous montre l'immensité de Dieu, la seconde par la constitution des animaux son intelligence infinie. Il conclut alors sur ces mots : « La véritable physique s'élève jusqu'à devenir une espèce de théologie.[475] »

L'abbé Nollet, un des promoteurs de la physique expérimentale en France, ne néglige pourtant pas le volet métaphysique et religieux. Dans le tome 1 de ses *Leçons de physique expérimentale*, il considère que l'étude de la nature nous oblige à reconnaître partout la présence de l'Être suprême : « Plus on avance dans cette étude, plus on est convaincu que ce qui en fait l'objet, n'est point une production du hasard ; tout y annonce une puissance infinie qui étonne, une sagesse profonde qu'on ne peut assez admirer, des intentions et une bonté qui méritent toute notre reconnaissance. »[476] Musschenbroek déclare que c'est la physique qui nous conduit à la connaissance de l'Être souverain, et qu'elle nous démontre « d'une manière claire qu'il doit y avoir nécessairement un tel Être, et qu'il existe en effet. »[477]

---

[474] Fontenelle, *Œuvres*, tome premier, Préface sur l'utilité des mathématiques et de la physique, Paris, Salmon et Peyrieux, 1829.
[475] *Ibid*.
[476] Nollet, *Leçons de physique expérimentale*, tome 1, Paris, Guérin et Delatour, 1764, préface, p XII.
[477] Musschenbroek, *Essai de physique,* Samuel Luchtmans, 1739, tome I, p 21.

Nous pourrions multiplier les exemples de ce type. Chacun s'extasie sur la beauté de la nature, et même sur sa perfection (apparition des symétries, des formes esthétiques, des couleurs étonnantes), ainsi que, paradoxalement, sur sa simplicité pour certains, et sur sa complexité pour d'autres. Mais tous, cartésiens, leibniziens, newtoniens, ou même sans bannière particulière, insistent sur le fait que cette vision nous impose d'y voir la main de Dieu.

Newton déjà, s'exprimait de cette façon dans son *Traité d'optique*. Dans la question XXVIII, il réfléchit sur l'œil, les animaux, les étoiles, etc. Les phénomènes étudiés lui indiquent qu'il doit exister un « être incorporel, vivant, intelligent, tout-présent »[478] Suit un commentaire énonçant la grandeur de Dieu et les limites de notre entendement, mais encourageant les hommes à poursuivre la réflexion sur ce sujet : « Quoique chaque pas que nous faisons réellement dans cette philosophie, ne nous conduise pas immédiatement à la connaissance de la cause première, il nous en approche toujours plus ; et par cette raison, c'est une manière de philosopher très estimable. »[479] MacLaurin, fidèle newtonien, écrit que le grand argument en faveur de l'existence de Dieu provient de la structure admirable du monde. Il détaille les phénomènes importants de cette structure admirable, la simplicité des lois qui gouvernent le monde, « l'excellente disposition des choses pour les meilleures fins »[480], et la beauté de la nature. Il rappelle la remarque de Newton sur le *sensorium dei*, que nous avons déjà rencontré au début de cette troisième partie, et que d'Alembert définit comme ce par le moyen de quoi Dieu est présent à toutes choses. MacLaurin ajoute que Newton, pour expliquer l'omniprésence de Dieu, disait qu'il perçoit tout ce qui se passe dans l'espace, « comme dans son *sensorium* ». Cette phrase lui attira les critiques de ses opposants, « comme s'il voulait dire que l'espace fut à Dieu, ce que le *Sensorium* est à nos âmes. »[481]Or, ne doit-on pas considérer sans préjugés que cette expression donne une forte idée de l'omniprésence de Dieu, « et de la faculté qu'il a de percevoir tout ce qui arrive de la manière la plus complète,

[478] Newton, *Traité d'optique*, reproduction de l'édition de 1722, traduction Coste, Paris, Montalant, 1722, réédité Gauthier-Villars et Blanchard, 1955, p 445.
[479] *Ibid* p 445.
[480] MacLaurin, *Exposition des découvertes philosophiques de M. le chevalier Newton*, traduit par Lavirotte, Paris, Durand et Pissot, 1749, p 409.
[481] *Ibid*. p 411.

sans se servir d'aucun agent ou instrument intermédiaires, et que M. Newton n'en a fait usage que dans cette vue. »[482] Comme MacLaurin, Voltaire dans ses *éléments de la philosophie de Newton* propose une description de cette philosophie newtonienne : elle conduit nécessairement à l'existence de Dieu. Avec un monde fini, dans lequel le vide existe, la matière n'existe pas nécessairement. Elle n'existe que parce qu'il y a une cause libre. Il revient sur le reproche de plusieurs auteurs dont Leibniz dont nous avons déjà parlé, qui provient des calculs de Newton le conduisant à prévoir la mort de l'univers à cause du ralentissement inexorable des astres. « Il est trop clair, par l'expérience, que Dieu a fait des machines pour être détruites. Nous sommes l'ouvrage de sa sagesse, et nous périssons ; pourquoi n'en serait-il pas de même du monde ? Leibnitz veut que ce monde soit parfait ; mais si Dieu ne l'a formé que pour durer un certain temps, sa perfection consiste alors à ne durer que jusqu'à l'instant fixé pour sa dissolution. »[483]

Deux physiciens méritent une attention particulière en raison de l'originalité de leur approche. Tous deux estiment que leur résultat est une réelle preuve de l'existence de Dieu. Le premier, Maupertuis, important pour sa formulation du principe de moindre action, a écrit à plusieurs reprises sur le sujet qui nous intéresse ici, en apportant plusieurs arguments, afin de convaincre ses lecteurs. La première publication a lieu en 1744 dans les Mémoires de l'Académie royale des sciences de Paris, sous le titre *Accord de différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici parues incompatibles*. Il écrit qu'on ne peut pas douter de l'existence de Dieu, par le fait qu'il a réglé tout le fonctionnement du monde, en imprimant à la matière des forces montrant sa puissance, pour obtenir des effets qui mettent en évidence sa sagesse. « Une mécanique aveugle et nécessaire suit les desseins de l'Intelligence la plus éclairée et la plus libre. »[484]

---

[482] *Ibid*. p 411.

[483] Voltaire, *Éléments de la philosophie de Newton*, in *Œuvres complètes*, tome dix-neuf, Paris, Lefèvre et Deterville, 1818, pp 36 et 37.

[484] Maupertuis, *Accord de différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici parues incompatibles,* 15 avril 1744, *in* Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1746, p 417.

Dans le deuxième article qu'il présente deux ans plus tard (1746), *Les lois du mouvement et du repos déduites d'un principe métaphysique*, toujours dans les Mémoires de l'Académie, Maupertuis insiste cette fois sur le fait que le principe de moindre action, qu'il a énoncé un peu plus tôt, prouve, selon lui, l'existence de Dieu. Le premier paragraphe s'intitule *Examen des preuves de l'existence de Dieu tirées des merveilles de la nature*. Il commence par rappeler que Newton était plus sensible aux preuves issues de la contemplation de l'univers, que par d'autres qui auraient pu provenir de sa réflexion. Les preuves qu'il retenait étaient la concentricité des orbites planétaires et le mouvement dans le même sens des planètes. « Il n'était pas possible qu'un destin aveugle les fit toutes mouvoir dans le même sens, et dans des orbes à peu-près concentriques. »[485] Newton ajoutait à cette uniformité du mouvement des planètes, le fait qu'il s'effectue dans un même plan, ce que le hasard seul ne peut avoir réalisé. Pour Maupertuis, ces preuves n'en sont pas absolument, parce qu'on retient ce qu'on décide de retenir, et « qu'on abuse de ces preuves, les uns en leur donnant plus de force qu'elles n'en ont ; les autres en les multipliant trop. »[486].

Il pense que ce n'est point dans les petits détails comme ceux qu'on vient d'évoquer qu'il faut rechercher des preuves de l'existence de Dieu, mais dans les lois mathématiques qui s'appliquent à la nature, dans les règles universelles qui régissent notre monde. C'est l'objet de sa deuxième partie, intitulée *Qu'il faut chercher des preuves de l'existence de Dieu*. On pourrait penser aux lois de conservation qui pourraient mettre en évidence la suprême intelligence qui les a mises en place. Mais « la conservation du mouvement n'est vraie que dans certains cas. La conservation de la force vive n'a lieu que pour certains corps. »[487] Il nous faut donc chercher ces preuves ailleurs. C'est là que Maupertuis déclare qu'il a trouvé le principe universel, le principe de la moindre quantité d'action, « si sage, si digne de l'Être suprême, et auquel la nature paraît si constamment attachée, qu'elle l'observe non seulement dans tous ses changements, mais que dans sa permanence, elle tend encore à l'observer. »[488]

485 Maupertuis, *Les Loi du mouvement et du repos déduites d'un principe métaphysique*, 1746, Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres, p 296.
486 *Ibid* p 299.
487 *Ibid* p 311.
488 *Ibid*. p 312.

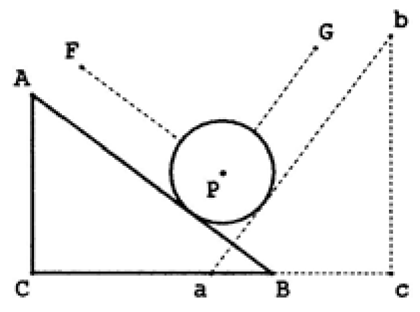
Maupertuis réaffirme sa thèse en 1750 dans son fameux *Essai de cosmologie* ; Il annonce qu'il a découvert un principe métaphysique sur lequel toutes les lois du mouvement et du repos sont fondées. Il écrit qu'il a montré que ce principe est conforme avec la « puissance et la sagesse du créateur et de l'ordonnateur des choses. » Cette loi et ses conséquences prouvent l'existence et la perfection de l'Être suprême : « Toutes choses sont tellement ordonnées qu'une mathématique aveugle et nécessaire exécute ce que l'intelligence la plus éclairée et la plus libre prescrivait. »[489]

Le second scientifique présentant, à partir de lois physiques, des preuves de l'existence de Dieu, n'est pas un inconnu pour nous, il s'agit de Privat de Molières, dernier grand défenseur des tourbillons cartésiens, qui publie dans la conclusion générale du tome IV de ses *Leçons de physique,* une *Nouvelle démonstration de l'existence de Dieu*. Nous donnons l'intégralité de la conclusion générale en annexe 2, et nous commenterons la partie physique consacrée à sa preuve. Privat souhaite d'abord évoquer « cet Être que j'ai d'abord désigné sous le nom de Force, ou d'Agent général, qui divise la matière, qui la met en mouvement et l'entretient dans cet état. »[490] Quand il en vient à la présentation de sa preuve, il rappelle que nous connaissons les lois du mouvement avec une grande précision, sans risque d'erreur, et que si ces lois subsistent depuis l'éternité dans la matière, c'est par l'opération « présente, perpétuelle et permanente d'un Être tout-puissant et souverainement intelligent. »[491] Il rappelle ensuite qu'il y a dans la nature une loi établie « qui demande qu'il y ait tantôt autant, tantôt moins, et tantôt plus de mouvement après le choc qu'avant le choc ; sans qu'on puisse en aucune sorte attribuer cette augmentation de mouvement à aucune cause physique. »

[489] Maupertuis, *Essai de cosmologie,* Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris, 1750, 1ère partie, p. 24.
[490] Privat de Molières, *Leçons de physique*, Paris, Brocas, 1740, Tome IV, p. 566 à la fin.
[491] *Ibid*.

Il souhaite alors décrire deux expériences venant étayer cette dernière affirmation.

Fig. 59



Résumons la première expérience. On considère un plan incliné AB (fig. 59) long de cinq pieds, tel que le point A soit à une hauteur AC de trois pieds. Le triangle ABC étant rectangle en C, CB sera égal à 4 pieds. On pose alors un globe P pesant P = 5 livres sur AB ; il est retenu par une force F parallèle à AB.

En appliquant les lois de la mécanique on voit que $F = P \sin(ABC) = 5 \times \frac{3}{5} = 3$ livres. La force pressante sur le plan AB (égale à la réaction du support) est $R = P \cos(ABC) = 5 \times \frac{4}{5} = 4$ livres.

Privat constate alors que $P \cos(ABC) + P \sin(ABC) = 7$ livres, ce résultat étant supérieur à P qui vaut 5 livres. Il y a donc plus de force dans le globe P quand il est sur un plan incliné (7 livres) que quand il est placé sur un plan horizontal (5 livres).

Il donne alors un exemple illustrant ce résultat : « Si un Architecte mal avisé construisait une voûte AB de 5 toises de long inclinée d'un angle ABC dont le sinus AC serait de 3 toises, pour soutenir un poids de 500 mille livres ; et qu'à cause de cette inclinaison, raisonnant selon le principe de la nécessité, il ne donnât à sa voûte qu'une force de 200 à 300 mille livres ; la voûte s'écroulerait ; et l'Architecte et ceux qui y seraient dessous en seraient écrasés ; car la voûte serait réellement chargée de 400 mille livres. »[492]

Cette expérience, et la suivante que nous ne détaillerons pas, lui permettent de crier victoire devant les incroyants, puisque les résultats qu'il vient de présenter lui ont permis de montrer la nécessité d'une intervention extérieure dans les cas où interviennent des forces :

[492] *Ibid*.

C'en est donc fait de l'Athéisme : nous lui avons ôté sa dernière ressource. Le mouvement, cause de tous les effets de la nature, ne peut subsister dans la matière tel qu'il est en effet, sans l'opération actuelle et perpétuelle d'un Agent tout-puissant et souverainement intelligent qui, suivant les lois qu'il a établies, conserve, diminue, augmente absolument et par son seul et unique vouloir, la force mouvante dans ses parties, selon qu'elles se choquent d'une façon ou d'une autre.[493]

Cette démonstration est rapidement contestée dans *l'Examen et réfutation des leçons de physique expliquées par M de Molières*, écrit par Sigorgne en 1741. Ce dernier anticipe une critique qui pourrait lui être faite. Sa critique de la démonstration de l'existence de Dieu par Privat de Molières donnerait des armes à l'impiété. Or, répond-il par avance, il n'est pas difficile d'écarter cette critique. « Depuis quand en effet est-ce fournir des armes à l'impiété que de faire connaitre le défaut d'une démonstration vicieuse ? N'est-ce pas au contraire ôter aux impies toute occasion de mordre sur notre croyance, que de reconnaître nous-mêmes que telle ou telle démonstration n'est pas exacte. »[494]

Les débats subsistent donc en ce milieu du 18e siècle, mais sont de plus en plus limités. En effet, Joseph Privat de Molières et Jean Bernoulli, les derniers cartésiens d'envergure scientifique importante, décèdent à cette époque, le premier en 1742, le deuxième en 1748. On assiste à un retrait lent mais progressif des thèses métaphysiques dans les ouvrages scientifiques. Pemberton a montré la voie ; en newtonien orthodoxe, il rappelle, dans la conclusion de ses *Éléments de la philosophie newtonienne*, les pensées religieuses de Newton. « Il observe d'abord à cet égard, que toutes les parties de l'univers forment un seul tout, et par cela même sont gouvernées par un seul Être Suprême, créateur du monde, qui manifestement a été fait avec choix et avec dessein. »

---

[493] *Ibid*.

[494] Sigorgne, *Examen et réfutation des leçons de physique expliquées par M de Molières au Collège royal de France*, Paris, Clousier, 1741, p 405.

Pemberton formule aussi dans ses *Éléments* une critique de l'esprit de système, demandant si nous avons la sagesse requise pour concevoir un monde et pour remonter aux premiers principes des choses (naturellement, la réponse est dans la question), et évoque les nombreuses chimères produites par cette méthode, « Chaque pas qu'on fait dans l'admirable science de la nature, nous fait voir de plus en plus la vanité de nos conjectures. »[495] On assiste ainsi au 18e siècle chez beaucoup d'auteurs à un effort non pour éliminer l'élément théologique, qu'on évoque encore, mais pour le dissocier de l'élément physique. L'aspect théologique sera de plus en plus limité, on le retrouve de plus en plus souvent dans les introductions ou dans les conclusions des ouvrages.

495 Pemberton, *Éléments de la philosophie newtonienne*, traduit par E Joncourt, Amsterdam et Leipzig, 1755, introduction page 12 et 13.

Conclusion

La physique se met en place au cours du 18e siècle, à la fois à partir de notions et de critères hérités du siècle précédent, mais aussi et surtout à travers une suite ininterrompue d'adaptations, de modifications et de débats. Nous évoquions dans l'introduction l'importance des quelques génies du 17e siècle qui ont joué un rôle essentiel, et ont causé les bouleversements qu'on connaît. Si on demande à un jeune lycéen de notre entourage, il connaît probablement Galilée, Descartes, Pascal et Newton, mais il n'est pas du tout certain qu'il pourra citer un seul des grands savants de la période qui concerne cette thèse. D'Alembert, Lagrange et Laplace, inconnus pour la plupart des lycéens, le sont peut-être un peu moins pour des étudiants en sciences, car chacun de ces noms est associé à un opérateur qu'ils utilisent en physique, mais que dire de Maupertuis, Clairaut, Euler, Condorcet, Bernoulli, Varignon ? Parmi les personnages rencontrés ici, les moins « physiciens » d'entre eux, si on m'autorise cette expression, sont certainement paradoxalement les plus connus, il s'agit de Buffon et Diderot.

Ce qui pour nous caractérise le plus ce premier dix-huitième siècle, est certainement la structuration de la physique. Les débats sur la formulation des lois et des propriétés s'appuyant sur des grandeurs physiques définies montrent une volonté d'un consensus qui se dessine, mais qui n'a encore pas vraiment vu le jour. Ce consensus débouche inévitablement sur Newton, ou plutôt sur l'adaptation des travaux de Newton, par les modifications de Varignon (à partir du calcul différentiel de Leibniz), de d'Alembert, d'Euler, de Clairaut, puis plus tard de Laplace et de Lagrange. C'est pourtant un paradoxe qu'il nous faut citer, avec l'aboutissement des travaux de mécanique théorique de ce siècle dans un ouvrage qui refuse l'utilisation de la pièce maîtresse de la théorie de Newton, la force d'attraction universelle, s'appuie sur une application du principe de moindre action, et utilise essentiellement les mathématiques de Leibniz améliorées dans les décennies précédentes. Cet ouvrage est la *Mécanique analytique* de Lagrange de 1787. Mais pour le reste, Newton triomphe en mécanique, en optique et en astronomie, pour ce dernier domaine à travers la *Mécanique céleste* de Laplace.

Les faits sont pourtant là, un pan entier de la physique va être occulté par la victoire des newtoniens, l'optique ondulatoire de Huygens, qui ne reprendra du service qu'au cours du 19e siècle avec Young et Fresnel. Le cas de la force newtonienne est plus nuancé, comme nous avons pu l'évoquer plus haut. On continue d'utiliser la force d'attraction, mais on travaille de plus en plus sur les effets des phénomènes que sur les causes, et pour beaucoup l'attraction reste une cause à utiliser précautionneusement. On suit plutôt d'Alembert et la méthode analytique, qui s'attache à déterminer les effets que sont la trajectoire, la vitesse et l'accélération, et on travaille sur le concept d'énergie, embryonnaire au 18e siècle, qui va peu à peu émerger, pour dominer au 19e siècle.

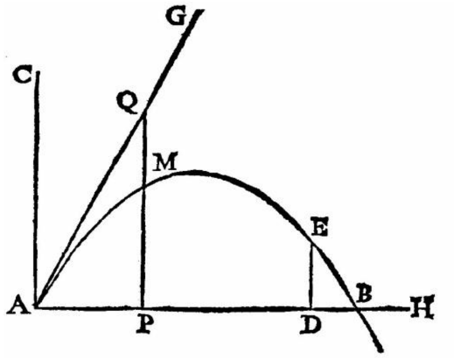
Nous avons également montré une lente diminution de l'importance de la métaphysique dans les textes de physique. On dira plutôt que la métaphysique n'est pas rejetée brutalement, on se contente de privilégier la physique mathématique, on s'intéresse au comment, les causes passent au second plan. Le Monde de Descartes ne fait plus rêver, la physique devient « sérieuse » en se mathématisant, et en mettant les thèmes métaphysiques et religieux à la marge, voire en les séparant de la partie calculatoire. On isole progressivement la réflexion sur la physique de la physique elle-même, ce qui débouchera au 19e siècle sur le positivisme.

Un exemple marquant de cette laïcisation de la physique est le statut du principe de moindre action, principe métaphysique pour son créateur Maupertuis, comme l'avait été avant lui le principe de moindre temps, et qui deviendra un pur principe mathématique de moindre quantité d'action avec Euler puis Lagrange. On peut rappeler à cette occasion notre réflexion sur la complexité observée chez les physiciens, Maupertuis nous en donne l'occasion, lui qui, newtonien de la première heure, est resté métaphysicien, et a utilisé son principe de moindre action pour démontrer l'existence de Dieu. Il est intéressant aussi de comparer les propos attribués à Laplace et à Euler à propos de Dieu. On a déjà rappelé la remarque de Laplace qui n’avait pas eu besoin de « l’hypothèse de Dieu », on peut citer la formule célèbre d’Euler, $e^{i\pi} + 1 = 0$, pour laquelle Euler aurait dit qu’elle montrait la présence de la main de Dieu.

Pour conclure, nous pouvons rappeler renvoyer notre lecteur aux deux textes presque contemporains (publiés tous deux vers 1740) fournis en annexes ; l’un, de Privat de Molières, montre une physique issue du 17^e^ siècle, cartésienne, emplie de références métaphysiques et religieuses, et l’autre, de Maupertuis (encore peut-être un paradoxe de sa part pour montrer sa complexité), présente une physique du 18^e^ siècle, sans référence métaphysique ou religieuse, et fortement mathématisée.

Annexe 1

Balistique arithmétique, par M. de Maupertuis, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, année 1731, Paris, 1733, Pages 297 et 298.



Quoiqu'on ait déjà un grand nombre de traités de balistique, j'ai cru qu'on ne serait pas fâché de voir tout cet art dans une page, qui contient, je l'ose dire, tout ce que contiennent les plus gros traités, et le contient d'une manière plus directe, et plus commode pour l'exécution, que les constructions géométriques qui dépendent des propriétés du cercle et de la parabole.

I. Soit la vitesse de la bombe égale à celle qu'elle aurait acquise en tombant de la hauteur CA, c'est-à-dire = $\sqrt{a}$, AQ = t, QM = z ; la bombe sortant dans la direction AG, l'on aura t . 2z :: $\sqrt{a}\,.\sqrt{z}$, ou tt = 4az. Pour rapporter cette parabole à la ligne horizontale AH qui fait avec AG un angle, dont le rayon étant = 1, la tangente = n ; soit AP = x, PM = y, PQ = nx ; l'on a QM = PQ – PM (z = nx – y) et $AQ^2 = AP^2 + PQ^2$ (tt = xx + nnxx). Et chassant z et t de la première équation tt = 4az, l'on trouve (nn + 1) xx = 4nax - 4ay.

II. Pour frapper le point donné E avec une charge de poudre donnée.

Soit AD = b, ED = c ; il faut que lorsque x devient b, y devienne c ; l'on a donc (nn + 1)bb = 4nab – 4ac.

D'où l'on tire pour la direction du mortier $n = \frac{2a}{b} \pm \frac{1}{b}\sqrt{(4aa - 4ac - bb)}$. D'où l'on voit que pour frapper E avec une charge donnée, il y a deux positions du mortier.

Coroll. 1. Afin que n soit possible, il faut que 4aa = ou > 4ac + bb.

Coroll 2. Lorsque E est sur l'horizontale, l'on a $n = \frac{2a}{b} \pm \frac{1}{b}\sqrt{(4aa - bb)}$.

Coroll. 3. Lorsque E est au-dessous, l'on a $n = \frac{2a}{b} \pm \frac{1}{b}\sqrt{(4aa + 4ac - bb)}$.

III. Pour frapper le point donné E sous une direction donnée.

L'on a $a = \frac{nn+1}{4nb-4c}\ bb$. Ce qui détermine la charge.

Coroll. On voit par là que pour une situation constante de mortier, la longueur horizontale du jet est proportionnelle à la ligne CA, qu'on prend pour la force du jet. Car c étant = 0, l'on a $b = \frac{4n}{nn+1}\ a$.

IV. Pour trouver la direction du plus long jet possible.

L'on a AB = $x = \frac{4n}{nn+1}\ a$, qui doit être un Max. Différentiant donc cette quantité, ou simplement $\frac{n}{nn+1}$, et faisant la différence = 0, l'on trouve n = 1. D'où l'on voit que l'angle demi-droit donne le plus long jet horizontal possible.

V. Pour trouver la plus petite charge qui puisse frapper E.

L'on a $a = \frac{nn+1}{4nb-4c}\ bb$, qui doit être un Min. Différentiant donc cette quantité, en faisant n variable, ou différentiant simplement $\frac{nn+1}{nb-c}$, l'on trouve $n = \frac{c}{b} \pm \frac{1}{b}\sqrt{(bb+cc)}$; substituant la valeur positive pour n dans $a = \frac{nn+1}{4nb-4c}\ bb$, l'on trouve $a = \frac{1}{2}c + \frac{1}{2}\sqrt{(bb+cc)}$.

Annexe 2

Leçons de Phisique, contenant les Elémens de la Phisique, déterminés par les seules loix des Mécaniques, expliquees au College Royal de France, par Joseph Privat de Molieres, Professeur Royal en Philosophie, de l'Académie des Sciences, & Membre de la Société Royale de Londres

A Paris, chez la Veuve Brocas, ruë S. Jacques, au Chef S. Jean.

Musier, à l'entrée du Quai des Augustins, du côté du Pont S. Michel, à l'Olivier.

Pissot, à la scente du Pont-Neuf.

Bullot, Imprimeur-lib ruë des Prêtres, près S. Severin, à l'image S. Joseph.

MDCCXL.

(BM de Lyon, fonds ancien 398267.)

Tome IV, p. 566 à la fin.

CONCLUSION GENERALE

Où l'on donne une nouvelle démonstration de l'existence de Dieu.

Je n'entrerai pas dans un plus grand détail d'explication des phénoménes de la Nature, car je n'ai pas entrepris de tout dire. Je crois néanmoins en avoir dit assez, pour que ceux qui liront les Ouvrages de M. Newton ne soient pas portés à croire que tout ce qu'il a observé tant sur la lumiere & les couleurs, que sur les autres objets de la Nature, ne puisse s'expliquer par les loix du mouvement, & ne soient autant de conséquences du mouvement circulaire que M. Newton n'a pas assez approfondi.

Je remarquerai seulement que suivant les maximes de M. Newton qui veut qu'on ne fasse point d'hypothese, quand on étend par induction les conséquences que l'on tire d'un Phénomene certain, les Neutoniens ne peuvent sans injustice m'attribuer d'avoir fait aucune hypothese dans l'explication que j'ai donnée des effets généraux de la Nature. Car :

1°. Il est évident que de tous les Phénomenes, celui qui est sans contredit le plus généralement connu, & que personne ne conteste, est l'effet de l'impulsion ou du choc accompagné des loix les plus générales du mouvement, telles que M. Newton même les a données au commencement de ses Principes, & que j'ai expliquées dans ma premiere Leçon. Or je n'ai fait dans le cours de mon Ouvrage autre chose que de me procurer tous les moyens d'étendre solidement l'effet de ces loix. C'est même en partie pour cette raison que j'ai exclu le Vuide du nombre des Principes de la Phisique. Or

2°. Il est évident qu'en cela même je n'ai point fait d'hypothese, puisqu'au contraire j'ai été plutôt au rabais de suppositions, étant beaucoup plus simple de ne supposer l'univers composé que d'un seul genre d'espace, que de le supposer composé de deux espaces totalement différens par leur nature. Mais comme je crois avoir démontré que dans le Plein toutes les parties de la matiere peuvent se mouvoir directement & en tous sens, il est encore évident,

3°. Que je n'ai point fait d'hypothese en disant : que les moindres parties de la matiere ont toutes dès le commencement reçu immédiatement de Dieu un mouvement orbiculaire qui les a transformées en Tourbillons à peu près sphériques ; ayant démontré que ce mouvement étoit le seul qui puisse être permanent dans le Sistême du Plein. De sorte que ce n'est qu'étendre le même principe de dire : que Dieu a ensuite formé de l'amas de ces très-petits tourbillons des tourbillons beaucoup plus grands, & de ceux-ci des tourbillons encore beaucoup plus grands que les précédens, & ainsi de suite. D'ailleurs quand on fait tant que de nous défier, comme les Newtoniens l'ont fait par la bouche de M. Clarck, d'expliquer les effets de la Nature par la matiere & les seules loix du mouvement, sans doute qu'il doit nous être permis de tourner ces principes comme il nous plaira pour satisfaire à ce défi ; sans qu'on doive y trouver à redire : comme on permet aux Géométres de se servir de leurs lignes & de leurs superficies, pourvû qu'ils resolvent les problêmes qu'on leur propose.

Mais ce que je ne puis oublier de remarquer encore en finissant cet ouvrage, qui ne doit contenir que les élémens de la Phisique, c'est de dire un mot sur la nature de cet Etre que j'ai d'abord désigné sous le nom de Force, ou d'Agent général, qui divise la matiere, qui la met en mouvement & l'entretient dans cet état.

Si l'on a consideré attentivement les loix du choc, dont l'experience nous a rendus certains, & par le moyen desquelles nous venons de rendre raison, non-seulement de tous les mouvemens celestes, mais encore des efforts généraux de la nature ; on aura vû que ces loix prises dans toute leur généralité, & dont l’exécution actuelle est attestée par toutes les expériences, demandent à chaque instant qu’il y ait tantôt autant, tantôt moins & tantôt plus de force mouvante après le choc qu’avant le choc, sans qu’on puisse absolument parlant, attribuer cette variété à aucune autre cause qu’à l’Agent général qui a mis & met la matiere en mouvement.

Or il s’ensuit de là évidemment que cet Agent opere continuellement dans la matiere avec une puissance infinie, une sagesse profonde & une intelligence sans bornes. Car à chaque instant, il faut qu’il soit nécessairement attentif, soit à augmenter, soit à diminuer la force qu’il emploie à mouvoir les parties de la matiere selon une loi constante & invariable, & qui est si nécessairement la baze & le fondement de toute la mécanique, que si les loix de la nature sont autres que celles que nous avons décrites, toute cette science est renversée. Ce n'est plus que par hazard qu'Archimede & les autres Mécaniciens ont prédit les effets surprenans du Lévier, des Poulies, des Rouës, des Plans inclinés, du Coin, de la Vis, &c. On ne pourra compter sur rien dans la vie ; l'Architecte qui bâtira une maison selon toutes les régles de son art, ne pourra répondre qu'elle n'écroulera pas, & il n'y aura jamais de sureté pour ceux qui l'habiteront ; les ouvriers qui s'échaffaudent selon cette loi n'oseront plus se fier à leurs machines ; s'il n'est vrai que cette loi ne soit exécutée.

Aucune intelligence bornée ne peut certainement ni nombrer, ni prévoir, encore moins exécuter, toutes les diversités qui arrivent dans le choc des particules de l'air au moindre coup d'aîle d'une mouche. Or il faut après le choc augmenter le mouvement qui étoit avant le choc, là il faut le diminuer, ailleurs il ne faut ni l'augmenter ni le diminuer, & l'expérience nous est garant que tout cela s'exécute avec une promptitude, une fidelité & une précision parfaite ; & sans qu'il soit possible de concevoir que ce mouvement nouveau puisse provenir d'aucune cause physique, ni d'ailleurs de la puissance de l'Agent général qui divise la matiere.

Cet Agent général de la nature, que nous avons jusqu'à présent tenu pour ainsi dire comme caché, sous le nom spécieux de Force mouvante, pour ne pas distraire le Lecteur & ne pas lui offrir un objet trop vaste qui l'auroit empêché de s'appliquer aux moindres choses, qu'il étoit néanmoins d'abord nécessaire qu'il considerât. Cette Force mouvante, dis-je, est donc l'action d'un Etre souverainement intelligent, & dont la puissance est égale à l'intelligence.

Or nous sommes de nécessité obligés d'admettre l'existence d'un Etre éternel ; car si rien n'avoit été il y a dix mille ans, par exemple, rien ne seroit encore, puisque ce que nous désignons par le mot de rien n'ayant point de propriétés, il est impossible, je ne dis pas de comprendre ; car notre intelligence étant bornée, il y a bien des choses que nous ne comprenons pas, & qui ne laissent pas d'être : mais de concevoir d'affirmer sans nous contredire, que le rien puisse jamais devenir quelque chose.

Les Anciens Philosophes ne faisoient aucune difficulté d'attribuer l'Eternité, cet attribut absolument incompréhensible, mais qu'il faut néanmoins nécessairement accorder à quelque Etre, ils ne faisoient, dis-je, aucune difficulté d'attribuer cette éternelle durée à la Matiere ; quoiqu'ils la regardassent comme un Etre passif, destitué de toute intelligence, & conduit absolument par la nécessité, par une puissance aveugle, dans tous les divers mouvemens qu'ils remarquoient en ses parties.

Il y a, disoient-ils, des Atomes, ou si vous voulez, une Matiere premiere, indifférente à tout & susceptible de toutes sortes de formes. Cette matiere est éternelle, & contient en soi de toute éternité une force mouvante qui, demeurant toujours la même, se distribuë dans ses parties à chaque fois qu'elles se choquent, selon une certaine loi, qui n'est pas moins nécessaire, & c'est de cela seul, disoient quelques uns, que tous les évenemens naturels procedent.

D'autres plus raisonnables, envisageant de plus près le bel ordre qui régne dans l'Univers, quoiqu'ils convinssent du Principe précédent, jugeoient avec plus de fondement que ce Principe aveugle ne suffisoit pas, & qu'il y avoit dans le monde une Intelligence qui dirigeoit les operations de la nature à de certaines fins ; formant ainsi un composé monstrueux de la Puissance & de l'Intelligence suprême avec le Destin ; Puissance aveugle qu'ils faisoient dominer sur tout, & à laquelle les Dieux mêmes étoient assujettis.

Mais les premiers repliquoient : que ce bel ordre pouvoit fort bien n'être qu'un effet nécessaire des loix éternelles du mouvement : que cet ordre n'étoit survenu dans la matiere qu'après une succession de tems infinie, & qu'il n'y n'étoit pas moins nécessaire qu'il y survint que tout autre ordre plus confus. Que d'ailleurs l'ordre actuel des choses n'étoit pas si parfait que l'on n'y remarquât mille & mille incongruités sensibles, qui prouvoient que la perfection que l'on y admiroit, n'étoit qu'une perfection accidentelle. Que l'Univers changeant continuellement d'état en quelque chose, nous faisoit comprendre qu'il ne s'étoit formé & perfectionné que peu à peu, &c.

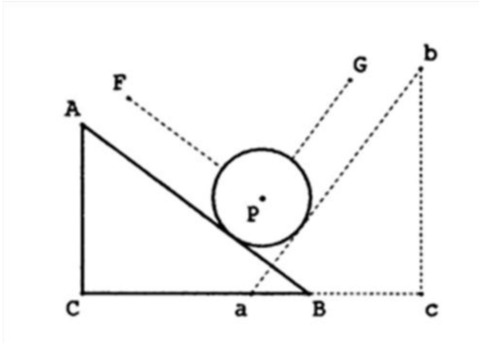
Vous prétendez, disent encore les libertins de nos jours, qu'il y ait un Etre éternel, tout puissant, souverainement intelligent, & doué de toutes les perfections infinies. Mais vous multipliez par là les incompréhensibilités ; il est plus simple de n'admettre que la seule éternité de la matiere & du mouvement, que les anciens Philosophes ont admise, & d'où tout peut éclore ; que d'admettre l'éternité d'un Etre qui renferme toutes les perfections, & qui jette les esprits foibles dans des craintes & des effrois terribles, pour le présent & pour l'avenir. Tout arrive nécessairement, & il n'y a aucune intelligence qui gouverne le monde à qui nous devions nous adresser, soit pour nous plaindre de sa conduite, soit pour l'en remercier & lui en rendre graces.

Quoique tous ces raisonnemens impies ayent été de tous tems solidement réfutés, par tout ce qu'il y a jamais eu de grands hommes qui ayent vêcu sur la terre ; & qu'il n'y ait qu'un aveuglement total d'esprit, & une corruption entiere de cœur, qui puisse faire méconnoître une Providence qui brille par tout, & jusques dans les moindres parties de l'Univers ; je pense qu'il ne faut pas néanmoins négliger, pour fermer entierement la bouche aux monstres d'impiété qui tiennent de pareils discours, de leur ouvrir les yeux s'il est possible qu'ils puissent voir encore : ou pour empêcher ceux qu'ils tâchent d'entrainer dãs un pareil aveuglement, & qu'ils s'efforcent de séduire, de se laisser surprendre par leurs discours empoisonnés ; en leur faisant remarquer qu'il est absolument impossible de supposer, maintenant qu'on a consideré les choses de plus près, que le mouvement avec ses loix telles que nous le connoissons par une foule d'expériences, dans lesquelles il n'y a aucune suspicion d'erreur, ait pû subsister de toute éternité dans la matiere & y avoir son exécution, sans l'opération présente, perpétuelle & permanente d'un Etre tout-puissant & souverainement intelligent.

En effet la loi générale du mouvement prise dans toute son étenduë, & telle que l'expérience nous la fournit, n'est pas qu'il y ait dans la nature une certaine quantité de force qui ne fasse que se transmettre d'une partie de la matiere dans l'autre. C'est au contraire une loi de raison, qui demande qu'il y ait tantôt autant, tantôt moins, & tantôt plus de mouvement après le choc qu'avant le choc ; sans qu'on puisse en aucune sorte attribuer cette augmentation de mouvement à aucune cause Phisique.

Soit par exemple AB (fig.59) un plan incliné long de cinq pieds, dont l'extrémité A soit élevée sur l'horizon CB de la hauteur AC de trois pieds ; il est clair que le triangle ABC étant rectangle en C, le côté CB sera de 4 pieds. Soit maintenant un globe P pesant 5 livres posé sur le plan incliné AB & soutenu le long de ce plan par une force F, dont la direction soit paralle (sic) au plan.

Fig 59



Il est clair, selon les loix des Mécaniques, & il est facile de le vérifier par l'expérience que le plan AB long de 5 pieds, étant élevé de 3 pieds AC, la force F soutiendra 3 livres. D'où il faudroit conclure en raisonnant, selon qu'il convient au principe de la nécessité que le plan AB ne devroit soutenir que 2 livres. Mais on se tromperoit lourdement, car le plan AB selon la même loi des Mécaniques, vérifiée par l'expérience, soutiendra 4 livres.

Pour le démontrer posez sous le poids P un autre plan ab perpendiculaire à AB. il est clair que si l'on ôte la force F, le plan ab soutiendra le poids que soutenoit cette force, c'est-à-dire, 3 livres. Faites maintenant ac égal à AC, et élevez cb perpendiculaire sur Cc ; il est clair que le triangle abc sera équilateral au triangle ABC, & que par conséquent cb sera de 4 pieds,

& ab de 5 pieds. Soutenez maintenant le poids P le long du plan ab par une force G, dont la direction soit parallele à ab ; il est clair par la raison & par l'expérience que l'élévation bc du plan ab étant de 4 pieds, & le plan ab long de 5 pieds ; la force G soutiendra 4 livres. Mais le plan AB perpendiculaire sur ab soutiendra le même poids que la force G lorsqu'on aura ôté cette force. Le plan AB soutiendra donc 4 livres tandis que la force en soutient 3. Le plan AB & la force F soutiennent donc ensemble 7 livres, quoique le globe P, ne pése que 5 livres. Ces 5 livres deviennent donc ici 7 livres par la seule construction de la machine & la seule efficace des loix du mouvement.

Il doit donc y avoir ici, suivant la raison géométrique appliquée aux mécaniques, plus de poids, plus de force dans le globe P, seulement à cause de sa situation extraordinaire, qu'il n'en a lorsqu'il est soutenu par un plan horizontal ; & l'expérience des sens nous apprend que cette loi de raison, qui ne peut rien par elle-même, est en effet exécutée.

L'épreuve en est si certaine, que si un Architecte mal avisé construisoit une voûte AB de 5 toises de long inclinée d'un angle ABC dont le sinus AC seroit de 3 toises, pour soutenir un poids de 500 mille livres ; & qu'à cause de cette inclinaison, raisonnant selon le principe de la nécessité, il ne donnât à sa voûte qu'une force de 200 à 300 mille livres ; la voûte s'écrouleroit ; & l'Architecte & ceux qui y seroient dessous en seroient écrasés ; car la voûte seroit réellement chargée de 400 mille livres.

Or cette loi, selon laquelle nous avons démontré dans ces Leçons que toute la fabrique de l'Univers étoit posée & subsistoit, ne peut évidemment être exécutée par une puissance aveugle.

Car, accordons pour un instant aux incrédules, qu'une telle puissance soit capable de conserver la quantité de mouvement que les parties de la matiere ont avant le choc & la leur distribuer après le choc ; certainement ils seront contraints d'avoüer que cette puissance aveugle, qui ne peut disposer que de la force qu'elle a actuellement ne peut augmenter cette force dans mille occasions qui arrivent à chaque instant, sans qu'on puisse dire que ce soit par voye de communication ; & la détruire absolument dans mille autres qui arrivent en même tems, avec une proportion si juste & si variée que les plus grands Géométres de notre tems les Huguens, les Newtons, les Leibnits, les Varignons, les Bernoullis, qui ont découvert & suivi cette loi dans son étenduë, ont pû à peine déterminer les effets dans certains cas à l'aide même des calculs les plus sublimes.

C'en est donc fait de l'Athéisme : nous lui avons ôté sa derniere ressource. Le mouvement, cause de tous les effets de la nature, ne peut subsister dans la matiere tel qu'il est en effet, sans l'opération actuelle & perpétuelle d'un Agent tout-puissant & souverainement intelligent qui, suivant les loix qu'il a établies, conserve, diminuë, augmente absolument & par son seul & unique vouloir, la force mouvante dans ses parties, selon qu'elles se choquent d'une façon ou d'une autre.

Or c'est cet Etre tout-puissant & souverainement intelligent qui sera celui à qui incontestablement il apartiendra de posseder seul l'éternité & l'immortalité. Et la Matiere destituée de mouvement, que les incrédules mêmes regardent, & ont interêt dans leur opinion de regarder comme une substance morte & sans aucune vigueur, bien loin de posseder cet attribut incompréhensible & qui devient desormais inutile aux Athées, n'aura reçu son existence que de la seule volonté toute puissante de cet Etre suprême, qui l'a formée pour exécuter ses grands desseins. Or la substance de Dieu n'est pas étenduë par des espaces immenses : mais elle est par tout & toute entiere où peut être la moindre & la plus grande de ses créatures, avant même qu'elles existent. Et Dieu n'a pas besoin d'organes pour tout connoître : mais ne pouvant rien produire s'il ne le connoît préalablement, il connoît tout dans sa propre substance avant que de rien produire ; & sçait après qu'il a produit ses créatures, par la connoissance qu'il a de ses volontés, tout ce qu'elles sont en elles-mêmes, puisqu'elles ne sont ce qu'elles sont que parce qu'il le veut & qu'il ne peut ignorer ce qu'il veut.

OBJECTION.

On pourra peut-être dire que, par la loi générale du choc, on démontre bien la nécessité de l'existence d'un Etre souverainement intelligent & tout-puissant : mais qu'il semble qu'on en pourroit conclure qu'il n'est pas libre dans son opération ; puisque la loi du mouvement que l'on connoît par l'expérience & par la raison, étant fondée sur les principes mathematiques, qui sont nécessaires, comme il est nécessaire que le tout soit plus grand que sa partie, que 2 et 3 fassent 5, &c. Il s'ensuit que cette loi est tellement nécessaire, que l'Agent général de la Nature n'a pû se dispenser de l'établir, & ne peut se dispenser de la suivre.

Je réponds 1°. que Dieu ou l'Etre infiniment parfait, se suffisant pleinement à lui-même, a fait un entier usage de sa liberté dans la création ou production de la matiere, en la tirant du néant. Qu'il lui a été libre de la créer, ou de ne pas la créer ; de la créer plus tôt ou plus tard ; & qu'il lui est encore libre à tout moment de cesser de vouloir ce qu'il veut ; de cesser de créer la matiere, ou de vouloir qu'elle soit ; car aussi-tôt elle ne sera plus.

Mais que Dieu s'étant déterminé à la créer au moment qu'il lui a plû ; ce n'est pas un inconvenient qui détruise sa liberté, qu'il ait été nécessité de la doüer de ses attributs essentiels ; puisqu'autrement on seroit contraint de dire qu'il auroit voulu créer la matiere & n'auroit pas voulu la créer ; étant certain qu'un Etre destitué d'un de ses attributs essentiels, n'est pas l'Etre dont il s'agit. Ceux donc qui voudroient soutenir que dans ce cas Dieu n'a pas été libre, tomberoient en contradiction.

2°. Que Dieu après avoir créé la matiere, a fait un plein usage de sa liberté, lorsqu'il l'a mise en mouvement ; & qu'il n'y a eu que sa Raison qui l'ait déterminé à la mouvoir. D'où il suit que, si c'est une nécessité que Dieu voulant mouvoir la matiere cet acte de sa volonté ne puisse avoir son exécution que par l'établissement de la loi générale du choc que nous connoissons ; l'institution nécessaire de cette loi ne peut en aucune sorte, par la même raison qu'auparavant, nuire à la pleine & entiere liberté de Dieu. Mais quoique Dieu voulant mouvoir la matiere, n'ait pû par la supposition se dispenser d'établir la loi qu'il a établie ; ce n'est pas à dire pour cela qu'il soit toujours nécessité de la suivre. Car il peut à tout moment cesser de vouloir ce qu'il veut, interrompre en tout ou en partie l'exécution actuelle de ses volontés générales, en cessant de les suivre ou totalement ou en partie ; & le seul inconvénient, si c'en est un, qui en peut arriver & qui ne touche point à la liberté de Dieu, est que la matiere cessera alors de se mouvoir en tout ou en partie : ou se mouvra d'une autre façon que les loix generales du mouvement une fois introduites pourroient exiger.

3°. Mais le point principal où éclate le plus la liberté de Dieu dans la construction generale de l'Univers ; c'est que la matiere a pû, dès le premier instant de sa création & par l'efficace de ces mêmes loix, être ébranlée d'une infinité de differentes façons ; de chacune desquelles un ordre d'effets tous differens les uns des autres auroient été produits. Or parmi tous ces différens ébranlemens generaux des moindres parties de la matiere, que Dieu a pû produire dès le commencement des choses ; Dieu a choisi sans qu'on puisse concevoir qu'aucune nécessité l'y ait pû contraindre, celui qu'il a jugé être le plus propre à l'exécution de ses desseins.

De telle sorte que Dieu ayant prévu par son intelligence infinie, tous les bons événemens qui devoient naître de ce premier ébranlement, il les a tous voulu chacun en particulier ; & si bien voulu qu'il est vrai de dire que chacun d'eux l'a déterminé à choisir cet ébranlement plutôt qu'un autre. Que nous sommes par conséquent redevables à ce choix de tous les bons effets qui nous arrivent ; & que nous devons lui en rendre d'éternelles actions de graces, sans qu'il soit nécessaire d'exiger de sa bonté qu'il nous fasse sentir ses faveurs, par des volontés spéciales pratiques, qui seroient une exception à l'ordre general de sa providence. Ainsi dès le commencement du monde Dieu a voulu en particulier, & veut encore specialement, tout le bien qui arrive dans l'Univers : mais ce n'est ordinairement que par des volontés générales, par des loix établies & constamment exécutées, qu'il produit & distribuë ces biens.

Ainsi quand il nous arrive du bien nous pouvons toujours dire avec verité que c'est parce que Dieu en établissant ses loix l'a voulu très-particulierement, quoiqu'il n'ait pas eu une volonté spéciale pratique : ou qu'il n'ait pas fait un miracle en notre faveur, ou n'ait pas troublé l'ordre general de sa providence, pour nous le procurer. Mais quand il nous arrive du mal, on ne peut pas toujours dire que c'est parce qu'il l'a voulu specialement : mais seulement parce qu'il n'a pas voulu troubler l'ordre de sa providence pour éviter cet événement. De sorte que tout ce que nous pouvons dire alors, c'est que Dieu l'a permis, & que l'ordre de sa Providence une fois établi, & auquel il est juste que nous soyons soumis, le demandoit.

J'ai dit toujours, parce que souvent ce que nous croyons être un mal à notre égard, est un veritable bien, & qu'alors nous devons dire que Dieu l'a voulu. Souvent même ce qui est un mal à l'égard de quelqu'un étant un véritable bien à l'égard de plusieurs, ou de tout le genre humain ; Dieu a pû le vouloir, non parce que cet événement nuisoit à ce quelqu'un : mais parce que c'étoit un bien pour tous. Et si ce quelqu'un est raisonable il se soumettra avec résignation à ces volonté sans murmure, & sans pouvoir dire avec équité que Dieu n'est pas bon, parce qu'il lui fait du mal ; par la raison que ce n'est pas dans le dessein de lui faire du mal que Dieu a voulu cet événement : mais parce que cet événement étoit un bien general. Par où l'on voit la verité de cette parole, Sapientia conditi sumus & Providentia gubernamur.

FIN.

Bibliographie

La mise en place d'une nouvelle philosophie de la physique au 18e siècle.

Sources

ALBERTI, Léon-Battista , *De la statue* et *De la peinture*, traduits par Claudius Popelin, Lévy, Paris, 1868.

ALBERTI, Léon-Battista, *Divertissements mathématiques*, présenté et traduit par Pierre Souffrin, Le Seuil, Paris, 2002

d'ALEMBERT, Jean Le Rond, *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, Paris, Briasson, David, Le Breton, Durand à Paris, 1751

d'ALEMBERT, Jean Le Rond, *Traité de dynamique*, Paris, David, 1758.

d'ALEMBERT, Jean Le Rond, *Réflexions sur la cause générale des vents*, Paris, David, 1747.

ALGAROTTI, *Le newtonianisme pour les dames*, Paris, Montalant, 1738.

D'ANTONI, *Institutions physico-mathématiques* à l'usage des écoles royales d'artillerie et du génie de Turin, tome premier, Strasbourg, chez Bauer et Treuttel, 1777.

ARCHIMEDE, *Les œuvres complètes*, traduites du grec en français par Paul Ver Eecke, Paris, Blanchard, 1959.

ARISTOTE, *Physique*, Traduction et présentation de Pierre Pellegrin, GF Flammarion, Paris, 2000

ARISTOTE, *Logique*, tome III, traduit par J Barthélémy saint-Hilaire, Paris, Librairie philosophique de Ladrange, 1838

ARISTOTE, *Organon, Seconds analytiques*, trad J Tricot, Paris, Vrin, 1995

ARISTOTE, *Métaphysique*, traduction J Tricot, Paris, Vrin, 1991

ARISTOTE, *les Topiques*, traduction Yvan Pelletier, chapitre XII, in http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/Aristote/topiques.htm#XII.

ARNAULD et NICOLE, *La logique ou l'art de penser*, Paris, Tel Gallimard, 1992.

BACON, Francis, *Novum Organum*, (1ère édition 1620), trad Lorquet, Paris, Hachette, 1857.

BACON, Francis, *Œuvres*, traduit par F Riaux, Paris, Charpentier, 1852.

BACON, Francis, *De Dignitate et augmentis*, trad. Buchon, Paris, Desrez 1836.

BERTIER, Joseph-Étienne, *Principes physiques*, trois tomes, Paris, Imprimerie Royale, 1764.

BRISSON, *Dictionnaire raisonné de physique*, seconde édition, tome 6, Paris, Librairie économique, an VIII.

BUFFON, *Invention de miroirs ardents, pour brûler à une grande distance*, Mémoires de l'Académie royale des sciences de Paris, année 1747.

CARNOT, Lazare, *Réflexions sur la métaphysique du calcul infinitésimal* (1ère édition 1797), Paris, Blanchard, 1970.

CASTEL (RP), Louis, *Le vrai système de physique générale de M. Isaac Newton*, Paris, CF Simon, 1743.

La CHAPELLE, *Le Traité des sections coniques et autres courbes anciennes*, Paris, Quillau, 1750

[CHÂTELET, Émilie du], *Institutions de physique*, Paris, Prault fils, 1740.

CHÂTELET, Émilie du, *Dissertation sur la nature et la propagation du feu*, Paris, Prault fils, 1744.

CHÂTELET, Émilie du, *Réponse de Madame *** à la lettre de M. du Mairan* , Bruxelles, Foppens, 1741.

CLAIRAULT, *Théorie de la figure de la terre*, Paris, 1743.

CONDILLAC, *Œuvres complètes*, tome II, Traité des systèmes, Houel Paris, Levrault Strasbourg, 1798

CONDORCET, *Essais d'analyse*, Paris, Didot, 1768.

COPERNIC, Nicolas, *Des révolutions des orbes célestes*, trad A Koyré, Paris, Diderot éditeurs, 1998.

CORGNE DE LAUNAY (le), *Principes du système des petits Tourbillons mis à la portée de tout le monde et appliqués aux phénomènes les plus généraux*, Paris, A. Jombert, 1743.

COUSIN, J. A. J., *Traité élémentaire de Physique*, Paris, Barrois, l'an III républicain.

COUSIN, J. A. J., *Leçons de calcul différentiel et de calcul intégral*, Paris, Jombert, 1777.

CROUSAZ, de, *Essay sur le mouvement*, La Haye, Alberts et Vander Kloot, 1728.

DELAMBRE, *Histoire de l'astronomie au XVIIIème siècle*, Paris, Bachelier, 1827.

DESAGULIERS, J-T, *A course of experiemental philosophy*, trad française par le père Pézenas, 2 volumes, in-4, Paris, 1751.

DESCARTES, René, *Les Principes de la Philosophie* (1ère édition 1644, traduction en français par l'abbé Picot en 1647), Œuvres IX-2, publié par Adam et Tannery, Vrin, 1989.

DESCARTES, René, *Le Monde, ou Traité de la lumière* (1ère édition 1664), in Œuvres XI, publié par Adam et Tannery, Vrin, 1989.

DESCARTES, René, *Traité de la mécanique*, avec les éclaircissements nécessaires par N. P. P. D. L., Paris, Charles Angot, 1668.

DESCARTES, René, *Œuvres et lettres*, présenté par A. Bridoux, Bibliothèque de la Pléiade, Gallimard, 1949.

DESCARTES, René, *Discours de la méthode*, (1ère édition 1637), présenté par G. Rodis-Lewis, Garnier-Flammarion, 1966.

DESCARTES, René, *Œuvres,* publiées par Victor Cousin, tome cinquième, Paris, FG Levrault, 1824.

DESCARTES, René, *Méditations métaphysiques*, notes et commentaires de A Vergez, Paris, Nathan, 1983.

DESCARTES, René, *Règles pour la direction de l'esprit*, trad Victor Cousin, Wikisource.

DIDEROT, Denis, *Œuvres philosophiques*, extraits, Classiques Garnier-Bordas, 1990.

DIDEROT, Denis, *Pensées sur l'interprétation de la nature*, Texte établi par J Assézat, Paris, Garnier, 1875-1877.

DUFIEU, Jean Ferapie, *Manuel physique, ou manière courte et facile d'expliquer les phénomènes de la nature*, Lyon, Regnault, seconde édition, 1760

DUROURE, Jacques, *La Physique expliquée suivant les sentiments des anciens et nouveaux philosophes*, Paris, chez l'Auteur, 1653.

EULER, *Lettres à une princesse d'Allemagne*, 4 volumes, Paris, Royez, 1787.

EULER, *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin*, 1746.

FERMAT, *Œuvres*, Paris, Gauthier-Villars, 1844, tome deuxième.

FONTENELLE, *Théorie des tourbillons cartésiens, avec des réflexions sur l'attraction*, Paris, Hippolyte-Louis Guerin, 1752.

FONTENELLE, *Entretien sur la pluralité des mondes* (1ère éd 1686), Les Éditions de la Nouvelle France, Paris, 1945.

FONTENELLE, *Préface sur l'utilité de la Physique et des Mathématiques*, in Histoire du renouvellement de l'Académie royale des sciences en 1699, Paris, Boudot, 1708.

FORBIN, Gaspard de, *Éléments des forces centrales*, Paris, Desaint, 1774

GADROYS, Claude, *Le système du monde selon les trois hypothèses*, Paris, Guillaume Desprez, 1675.

GALILEE, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, traduction de Maurice Clavelin, PARIS, PUF, 1995

GALILEE, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, (première édition 1632), traduction Fréreux et De Gandt, Paris, le Seuil, 1992.

GAMACHES (de), *Système du mouvement*, Paris, JM Garnier, 1721.

GAMACHES (de), *Astronomie physique, ou Principes généraux de la nature appliqués au mécanisme astronomique et comparés aux Principes de la Philosophie de M. Newton*, Paris, Charles Jombert, 1740.

GILBERT, William, *De magnete*, Chiswick Press, Londres, 1600.

HARTSOEKER, Nicolas, *Conjectures physiques*, Amsterdam, Desbordes, 1706

HAUKSBÉE, *Expériences physico-chimiques sur différens sujets*, Paris, Claude-Antoine Jombert, 1754.

HUME, David, *Enquête sur l'entendement humain*, Paris, GF Flammarion, 1983.

HUME, *Traité de la nature humaine*, Aubier, Paris, 1983.

HUYGENS, Christiaan, *Traité de la lumière* (1ère édition 1690), présenté par Michel Blay, Dunod, 1992.

HUYGENS, Christiaan, *Œuvres complètes*, La Haye, Martinus Nijhoff, 1895.

KEPLER, Johannes, *Astronomia Nova*, 1609, cité par A Koyré, *Études newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968.

KERANFLECH, *L'hypothèse des petits tourbillons*, Rennes, JC Vatar, 1761.

KERANFLECH, *Observations sur le Cartésianisme moderne*, Rennes, JC Vatar, 1774.

LACAILLE (de), *Leçons élémentaires de mathématiques*, nouvelle édition par l'abbé Marie, Paris, Desaint, 1784

LACAILLE (de), *Leçons élémentaires de mécanique,* nouvelle édition, Guérin, Paris, 1764.

LAGRANGE (de), *Mécanique analytique*, Paris, Veuve Desaint, 1788.

LALANDE (de), Jérôme, *Astronomie des Dames* (1ère édition 1785), 4ème édition, Paris, Ménard et Desenne, 1817.

LALANDE (de), Jérôme, *Abrégé d'Astronomie*, Paris, Veuve Desaint, 1774.

LAPLACE, *Exposition du système du monde*, Paris, Bachelier, 1835.

LEIBNIZ, *Opuscules philosophiques choisis,* Paris, Vrin, 2001.

LEIBNIZ, *La monadologie*, Paris, Delagrave, 1880.

LEIBNIZ, *Système nouveau de la nature et de la communication des substances*, éd M Fichant, Paris, GF Flammarion, 1994.

LEIBNIZ, *Discours de métaphysique et Monadologie,* édition établie par Michel Fichant, Paris, Gallimard, Folio Essais, 2004.

LEIBNIZ, *Opuscules et fragments inédits, extraits des manuscrits de la bibliothèque royale de Hanovre*, Louis Couturat, Paris, Alcan, 1903.

L'HOSPITAL, *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes*, Paris, Montalant, 1716.

MACLAURIN, *Exposition des découvertes philosophiques de M. le chevalier Newton*, traduit par Lavirotte, Paris, Durand et Pissot, 1749.

MALEBRANCHE, *De la recherche de la vérité*, Paris, 1ère édition 1674.

MAIRAN, *Lettre de M. de Mairan à Madame la Marquise du Chastellet*, 1741.

MARIE, Maximilien, *Histoire des sciences mathématiques et physiques*, tome 6, Paris, Gauthier-Villars, 1885.

MARIOTTE, Edme, *Essai de logique*, Paris, Estienne Michallet, 1678.

MAUPERTUIS (de), Pierre-Louis Moreau, *Discours sur les différentes figures des Astres ; d'où l'on tire des conjectures sur les Étoiles qui paraissent changer de grandeur ; et sur l'Anneau de Saturne. Avec Une Exposition abrégée des Systèmes de M. Descartes et de M. Newton*, Paris, Imprimerie Royale, 1732.

MAUPERTUIS (de), Pierre-Louis Moreau, *La figure de la Terre*, Paris, Imprimerie Royale, 1738.

MICHAUD (sous la direction de), *Bibliographie Universelle ancienne et moderne*, Paris, A. Thoisnier Desplaces, nouvelle édition publiée à partir de 1848.

MUSSCHENBROEK (Van), Pierre, *Essai de physique*, Leyde, Samuel Luchtmans, 1751.

NEWTON, Isaac, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, traduction de feue la Marquise du Chastellet, Paris, Desaint & Saillant, 1756, réédition Blanchard, 1966.

NEWTON, Isaac, *De philosophiae naturalis principia mathematica*, (1ère édition 1687), traduction, postface de M-F Biarnais, Christian Bourgois, 1985.

NEWTON, Isaac, *De la gravitation, suivi de du mouvement des corps*, présenté par François de Gandt, Tel Gallimard, 1995.

NEWTON, Isaac, *La méthode des fluxions et des suites infinies*, trad Buffon, Blanchard, 1994.

NEWTON, Isaac, *Optique*, traduit par Jean-Paul Marat, 1704, Christian Bourgois éditeur, 1989.

NEWTON, Isaac, *Traité d'optique*, trad Coste, éd 1722, Paris, Blanchard, 1955.

NOLLET, *Leçons de physique expérimentale*, tome 1, Paris, Guérin et Delatour, 1764.

ORESME, Nicole, *Tractatus de configurationibus qualitatum et motuum*, traduction P. Souffrin et J.P. Weiss, Paris, Belles Lettres, 1988.

OZANAM, *La Mécanique*, Paris, Jombert, 1720

PAULIAN, *Traité de paix entre Descartes et Newton*, Girard, Avignon, 1763.

PEMBERTON, Henry, *Éléments de la philosophie newtonienne*, (1ère édition 1728), Amsterdam et Leipzig, Arkstee et Merkus, 1755.

PLATON, *Le Timée*, traduction Luc Brisson, GF-Flammarion, Paris, 1992.

PLATON, *La République*, trad. Robert Baccou, GF Flammarion, 1966.

PRESOCRATIQUES (Les), édition établie par Jean-Paul Dumont, La Pléiade, Gallimard, 1988

PRIVAT DE MOLIÈRES, Joseph, *Leçons de Physique*, 4 tomes, Paris, Veuve Brocas, Musier, Bullot, 1737 à 1742.

PRIVAT DE MOLIÈRES, Joseph, [Lecorgne de Launay] *Réponse aux principales objections contenues dans l'examen des Leçons de Physique de M. l'Abbé de Molières, en forme de lettres à M. Sigorgne*, Paris, Jacques Clousier, 1741.

RIVARD, *Abrégé des éléments de mathématiques*, 7éme édition, Saillant, Paris, 1767.

ROHAULT, Jacques, *Traité de physique* (1ère édition 1671), Lyon, veuve de Jean-Bapt. Guillemin, Libraire, quatrième édition 1696.

SAINTIGNON (de), *Traité abrégé de physique à l'usage des collèges*, 6 tomes, Paris, Durand, 1763.

SAURI (M. l'Abbé), *Institutions mathématiques* (1ère édition 1771), Paris, Froullé, 4ème édition 1786.

SIGAUD DE LA FOND, *Description et usage d'un cabinet de physique expérimentale*, 2 tomes, Paris, Gueffier, 1784.

SIGORGNE, Pierre, *A physico-mathematical Demonstration of the Impossibility and Insufficiency of Vortices*, Philosophical Transactions, vol. XLI, Part. I, for the years 1739, 1740.

SIGORGNE, Pierre, *Examen et réfutation des leçons de physique expliquées par M. de Molières au Collège Royal de France*, Paris, Jacques Clousier, 1741.

SIGORGNE, Pierre, *Réplique à M. de Molières*, Paris, Jacques Clousier, 1741.

SIGORGNE, Pierre, *Institutions newtoniennes ou Introduction à la philosophie de M. Newton*, Paris, Jacques-François Quillau, fils, Libraire, 1747.

SIGORGNE, Pierre, *Institutions leibnitiennes, ou Précis de la monadologie*, Lyon, frères Périsse, libraires, 1767.

SIGORGNE, Pierre, *Institutions newtoniennes*, seconde édition, revue, corrigée et augmentée, avec figures, Paris, Guillyn, Libraire, 1769.

SMITH, *Traité d'optique*, traduit de l'anglais par Duval-le-Roy, Paris, 1767.

STEVIN, Simon, *La Disme*, sans édit, 1585.

STONE, *Analyse des infiniment petits comprenant le calcul intégral dans toute son étendue*, traduction Rondet, Paris, Gandouin et Giffart, 1735.

TRABAUD, *Le mouvement de la lumière, ou premiers principes d'optique*, Paris, Durand et Pissot, 1753

TRABAUD, *Principes sur le mouvement et l'équilibre*, Paris, Desaint et Saillant, 1743.

VARIGNON, *Nouvelles conjectures sur la pesanteur*, Paris, Jean Boudot, 1690.

VILLEMOT, Philippe, *Nouveau Système ou Nouvelle explication du mouvement des Planètes*, Lyon, Louis Declaustre, 1707.

VINCI, Léonard de, *Textes choisis*, traduit par Péladan, Paris, Mercure de France, 1907.

VIVENS, François de, *Nouvelle théorie du mouvement*, Londres, 1749.

VOLTAIRE, *Éléments de la philosophie de Newton*, Physique, in Œuvres complètes, Paris, P. Dupont, Libraire-Éditeur, 1825.

VOLTAIRE, *Œuvres complètes*, dictionnaire philosophique, 1764

Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Paris et Neufchastel, 1751 à 1772.

Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris, années 1700 à 1750.

Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Lettres de Berlin.

Ouvrages d'étude

BACHELARD, Gaston, *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1980.

BALIBAR, Françoise, *Galilée, Newton lus par Einstein*, Paris, PUF, 1984.

BARBIN, Evelyne, *La révolution mathématique du 17^{e} siècle*, Paris, Ellipses, 2006.

BELAVAL, Yvon, *Leibniz critique de Descartes*, Paris, Gallimard, 1960.

BLAY, Michel, *La naissance de la mécanique analytique*, Paris, PUF, 1992.

BLAY, Michel, *Les "Principia" de Newton*, Paris, PUF Philosophies, 1995.

BLAY, Michel, *La naissance de la science classique au XVII^{e} siècle*, Paris, Nathan Université, 1999.

BOUTROUX, Émile, *La philosophie allemande au 17ème siècle*, Paris, Vrin, 1948.

BRUNET, Pierre, *Les physiciens hollandais et la méthode expérimentale en France au XVIIIe siècle*, Paris, Blanchard, 1926.

BRUNET, Pierre, *L'introduction des théories de Newton en France au XVIII^{e} siècle avant 1738*, Slatkine, Genève, 1970, réédition Vigdor, 2000.

BUZON, Frédéric de, et CARRAUD, Vincent, *Descartes et les "Principia" II, Corps et mouvement*, Paris, PUF Philosophies, 1994.

CHAZAL Gérard, *Les médiations théoriques*, Seyssel, Ed. Champ Vallon, 2004.

COSTABEL, Pierre, *Leibniz et la dynamique en 1692*, Paris, Vrin, 1981.

COSTABEL, Pierre, *Démarches originales de Descartes savant*, Paris, Vrin, 1982.

DUGALD-STEWART, *Éléments de la philosophie de l'esprit humain*, tome deux, Paris, Ladrange et Hachette, édition revue, 1843.

DUGAS, René, *Histoire de la mécanique*, Neuchatel, édition du Griffon, 1950.

DUGAS, René, *La mécanique au XVII^e siècle*, Neuchatel, édition du Griffon, 1954.

DUHEM, Pierre, *L'évolution de la mécanique*, Paris, Joanin, 1903.

DUHEM, Pierre, *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, Rivière, 1914.

DUHEM, Pierre, *L'aube du savoir*, éd A Brenner, Paris, Hermann, 1997.

DUHEM, Pierre, *La théorie physique*, Paris, Rivière, 1914.

EHRARD, Jean, *L'idée de nature en France dans la première moitié du XVIIIe siècle*, Paris, Albin Michel, 1994.

FIRODE, Alain, *La dynamique de d'Alembert*, Montréal/Paris, Bellarmin/Vrin, 2001.

GANDT (de), François, *Force et géométrie* (La théorie newtonienne de la force centripète, présentée dans son contexte), thèse présentée à Paris, 1987.

GANDT (de), François (sous la direction de), *Cirey dans la vie intellectuelle, la réception de Newton en France*, Oxford, Voltaire Foundation, 2001.

GRANT, Edward, *La physique au Moyen âge*, Paris, PUF, 1995.

GUÉNANCIA, Pierre, *Lire Descartes*, Paris, Folio Essais, Gallimard, 2000.

GUÉROULT, Martial, *Leibniz, dynamique et métaphysique*, Paris, Aubier-Montaigne, 1967.

GUYOT, Patrick, *La pédagogie des Institutions de physique*, in *Émilie du Châtelet, éclairages et documents nouveaux*, Ferney-Voltaire, Centre national d'études du 18e siècle, 2008.

GUYOT, Patrick, *L'utilisation des hypothèses et du principe de raison suffisante dans les Institutions de physique d'Émilie du Châtelet*, in *Les Lumières et l'idée de nature*, Dijon, éditions universitaires de Dijon, 2011.

HAHN, Roger, *Le système du monde, Pierre Simon Laplace, un itinéraire dans la science*, NRF Gallimard, 2004

HIRN, *La notion de force*, Paris, Bureau des deux Revues, 1885.

HUGO, Victor, *Choses vues*, in Œuvres complètes, Paris, Robert Laffont, Bouquins, 1987.

JULLIEN, Vincent, et CHARRAK, André, *Ce que dit Descartes touchant la chute des graves*, Paris, Presses universitaires du Septentrion, 2002.

KOBAYASHI, Michio, *La philosophie naturelle de Descartes*, Paris, Mathesis, Vrin, 1993.

KOYRÉ, Alexandre, *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1966.

KOYRÉ, Alexandre, *Études newtoniennes*, Paris, nrf Gallimard, 1968.

KOYRÉ, Alexandre, *Du monde clos à l'univers infini*, (1ère édition 1957), Paris Gallimard, 1973.

KUHN, Thomas, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris Flammarion, 1983.

LENOBLE, Robert, *Mersenne ou la naissance du mécanisme*, Paris, Vrin, 1943.

LE RU, Véronique, *La nature, miroir de Dieu*, Paris, Vuibert-SFHST, 2009.

LE RU, Véronique, *Voltaire newtonien*, Paris, Vuibert/Adapt, 2005.

LOCQUENEUX, Robert, *Histoire de la physique*, Paris, PUF Que-Sais-Je ? 1987.

MAZAURIC, Simone, *Fontenelle et l'invention de l'histoire des sciences à l'aube des Lumières*, Paris, Fayard, 2007.

MOUY Paul, *Le développement de la physique cartésienne, 1646-1712*, Paris, Vrin, 1934.

PANZA, Marco, *Newton*, Paris, Les Belles Lettres, 2003.

PATY, Michel, *d'Alembert*, Paris, Les Belles Lettres, 1998.

PICHOT, André, *La naissance de la science*, tome 2, Folio essais, Gallimard, 1991.

RENOUVIER, Charles, *Philosophie analytique de l'histoire*, vol. 3, 1897.

ROBINET, André, *Correspondance Leibniz-Clarke*, Paris, PUF, 1957.

ROBINET, André, *Malebranche de l'Académie des Sciences*, Paris, Vrin, 1970.

ROSMORDUC, Jean (sous la direction de), *Histoire de la physique,* tome 1, Paris, Technique et Documentation, Lavoisier, 1987.

TATON, René (sous la direction de), *Histoire générale des sciences*, tome II, La science moderne, Paris, PUF, 1969.

VERDET, Jean-Pierre, *Astronomie et astrophysique*, Textes, essentiels, Paris, Larousse, 1993.

VERIN, Hélène *La gloire des ingénieurs, l'intelligence technique du XVIème au XVIIIème siècle*, Albin Michel, Paris, 1993

WESTFALL, Richard, *Newton*, Paris, Flammarion, 1994.

Table des matières