



**HAL**  
open science

# De la précision dans la mesure du temps à la théorie de la gravitation universelle (1630-1740)

Meropi Morfouli

► **To cite this version:**

Meropi Morfouli. De la précision dans la mesure du temps à la théorie de la gravitation universelle (1630-1740). Astrophysique [astro-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017. Français. NNT : 2017PA066610 . tel-02410775

**HAL Id: tel-02410775**

**<https://theses.hal.science/tel-02410775>**

Submitted on 14 Dec 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT  
DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Ecole Doctorale *Astronomie et Astrophysique d'Ile de France* :  
Spécialité Histoire et Philosophie des Sciences et des Techniques.

Préparée au  
Laboratoire SYstèmes de Référence Temps-Espace  
de l'Observatoire de Paris

Par  
Meropi MORFOULI

Pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Titre de la thèse :  
De la précision dans la mesure du temps à la théorie de la  
gravitation universelle  
(1630-1740)

Dirigée par Christian BRACCO & Efthymios NICOLAIDIS

Présentée et soutenue publiquement le 12 Décembre 2017 devant le jury composé de :

M.	Michel BLAY	Directeur de recherche émérite au CNRS	Président du jury
Mme.	Marianne FAUROBERT	Professeur à l'Université de Sophia-Antipolis	Membre du jury
M.	Antoni MALET	Professeur à l'Université de Pompeu Fabra	Membre du jury
M.	David AUBIN	Professeur à l'UPMC	Membre du jury
M.	Pierre LAMARD	Professeur à l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard	Rapporteur
M.	Enrico GIANNETTO	Professeur à l'Université de Bergamo	Rapporteur

## TABLE DES MATIERES

Remerciements.	4.
I. Introduction : La précision, une notion à définir.	6.
1. « Du monde de l' « à-peu-près » à l'univers de la précision. »	12.
2. « La création du monde de la précision »	25.
3. La notion de précision.	39.
II. Le temps et sa mesure.	46.
1. Les géomètres, philosophes de la nature	46.
2. Galileo Galilei, le temps comme <i>paramètre</i> de description	56.
3. Isaac Barrow, la construction du temps absolu	70.
4. Isaac Newton, le temps absolu, une éternité dynamique	83.
i. De la Gravitation	85.
ii. MS Add 3965 Section 13, folios 541 <sup>r</sup> – 542 <sup>r</sup> et 545 <sup>r</sup> - 546 <sup>r</sup>	90.
iii. Scholie des Définitions.	93.
iv. Scholie Générale.	100.
5. Marquise du Chatelet, une critique du temps absolu.	103.
III. La mesure du temps et sa précision dans la construction de la théorie de la gravitation universelle de Newton.	111.
1. Les manuscrits dynamiques de WasteBook	121.
i. MS Add 4004, 11v	121.
ii. MS Add 4004, 1-1r	124.
2. Le manuscrit Vellum, MS Add 3958, 45	131.
3. MS Add 3958, 87r-v	143.
4. La correspondance avec Robert Hooke.	153.
5. La visite de Edmond Halley.	166.
IV. Les Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle	170.
1. De motu corporum: liber primus	179.
2. De motu corporum: liber secundus	193.
3. De mundi systemate: liber tertius (Hypothèses- Règles)	202.
4. Principia, Livre III, Le test de la Lune	213.
V. Galileo Galilei, « 100 braccia dans 5 secondes »	229.
1. Galilée vs Christophe Scheiner dans les <i>Dialogues</i>	231.
2. La critique du Père Mersenne	243.

3. La correspondance avec Baliani	250.
4. Galilée platonicien	263.
i. Galilée et le <i>Timée</i> de Platon.	265.
5. Galileo Galilei, le <i>mesureur</i> du temps.	272.
VI. Christian Huygens, « 15 pieds 1 pouce et $1\frac{4}{3}$ lignes dans une seconde »	298.
1. Giovanni Batista Riccioli, Père Marin Mersenne, une observation soignée.	300.
2. L'année 1659.	312.
3. L'Horloge oscillante 1673.	320.
4. Christian Huygens, les tests des chronomètres marins.	325.
VII. L'application et la confirmation de la théorie gravitationnelle.	339.
1. Jean Richer, une découverte inétendue.	339.
2. La forme de la Terre.	353.
3. James Bradley et la rivière noire de Jamaïque.	360.
VIII. Conclusion générale : La question des Longitudes.	372.
Bibliographie	384.
Résumé en français	401.
Résumé en anglais	402.

## Remerciements

Si ce travail a pu aboutir, c'est grâce aux conseils et aux encouragements de personnes passionnées et passionnantes, généreuses et surtout très complémentaires. Sans elles, cette thèse ne serait pas ce qu'elle est : aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions ou par leurs contributions.

Je veux en premier lieu remercier Michel Blay. Véritable guide intellectuel, les mots seront insuffisants pour lui témoigner ma reconnaissance tant sa pensée, sa gentillesse, son écoute et son esprit m'ont accompagné tout au long de cette thèse. Dans le labyrinthe de la recherche, entre les lectures, découvertes et manuscrits, il a été la lumière permanente qui m'a permis de trouver mon chemin.

Que soient également remerciés à leur juste valeur mes directeurs de thèse. Christian Bracco, qui avec une disponibilité totale, est venu combler mes lacunes en sciences exactes. La minutie de ses corrections et la justesse implacable de ses remarques sont pour beaucoup dans le résultat final de ce travail. Et Efthymios Nikolaidis qui n'a eu de cesse de me pousser à ouvrir mes ailes académiques et dont l'aide inestimable m'a permis de créer le plus extraordinaire outil de recherche : un réseau international.

Nicolo Guicciardini, m'a ouvert la porte de la compréhension des *Principia* aux travers de nombreuses et précieuses discussions qui ont été un véritable cadeau tout au long de ce travail de recherche.

Je sais infiniment gré à Noël Dimarcq, directeur du laboratoire SYRTE à mon arrivée, pour avoir cru en moi dès le début du projet, s'être battu pour que ce dernier voit le jour, et surtout, pour m'avoir appris qu'impossible n'est pas français. Mes remerciements vont également au directeur actuel du laboratoire Arnaud Langragin.

Je tiens à remercier Michela Malpangoto, responsable de l'équipe SYRTE qui m'a chaleureusement accueillie et considérée comme un membre à part entière au sein de cette équipe de recherche. Je ne saurais oublier tous mes collègues de l'équipe histoire

pour leur bienveillance et leur disponibilité et en particulier Christophe Schmit pour sa patience à mon égard, ses explications généreuses et son soutien infaillible.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance aux équipes toujours attentives de la Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à toute l'équipe M.U.T.A. de l'Observatoire de Paris qui a accepté avec grand enthousiasme mon projet et passé de nombreuses heures à réaliser un prototype de pendule du XVIIème siècle, tant éloigné de leurs défis quotidiens.

Mon travail de recherche a été grandement facilité par le soutien financier de l'UPMC et du labex FIRST-TF. De plus un environnement de thèse généreux fourni par PSL m'a permis de travailler sereinement.

À titre plus personnel je pense fort à François-Xavier Robert, ami fidèle, correcteur assidu et nouvel admirateur de Galilée !

Enfin je veux remercier, mes parents, ma sœur et mes beaux parents pour leur soutien permanent, ainsi que mon époux et mon fils pour la patience et l'amour inconditionnels qu'ils m'ont offert malgré la fatigue et les changements d'humeur occasionnés par ce travail.

« Jamais je ne m’assujettis à heures,  
les heures sont faictez pour l’homme  
et non l’homme pour les heures »

François Rabelais, *Gargantua* XLI.

## I. INTRODUCTION

L’intitulé de cette thèse est « De la précision dans la mesure du temps à la théorie gravitationnelle de Newton ». L’émergence de la question de la précision dans la mesure du temps est identifiée par l’historiographie au début du XVII<sup>e</sup> siècle. Elle va de pair avec une transformation majeure intervenue dans la philosophie naturelle : le passage d’une argumentation qualitative à une argumentation quantitative. Cette mathématisation de la philosophie naturelle déclenche une vision et une exigence nouvelles pour la précision des mesures.

Écoutons Koyré comme ont pu l’écouter les auditeurs de son cours au Lycée Louis-le-Grand le 9 avril 1946 : « (...) l’histoire de la science du passé, c’est l’histoire des erreurs, bien entendu l’humanité s’est trompée jusqu’à aujourd’hui et nous, nous savons la vérité. (...) Ce qui nous intéresse, c’est le résultat dans la mesure où il est considéré comme bon encore aujourd’hui. Il est incorporé dans la science actuelle, donc l’histoire peut paraître ne pas présenter d’intérêt.

On peut dire aussi que c’est inutile d’étudier la pensée d’un homme, Galilée par exemple, même Newton et Descartes (...). Je crois que c’est une erreur complète et très grave, car si en effet le technicien peut appliquer les formules qu’il apprend sans savoir par quelle voie elles ont été découvertes, le but de l’homme est non seulement de faire avancer les sciences, mais c’est aussi de comprendre ce qu’il fait. Et il est impossible de comprendre même la position actuelle des problèmes scientifiques si vous ne savez pas comment l’humanité est arrivée à les poser et à les résoudre, et il est impossible pour l’homme de se comprendre lui-même s’il ne sait pas comment il est arrivé, comment l’humanité est arrivée à formuler les principes de sa pensée, s’il ne sait pas son propre passé et s’il ne sait pas avec quelles difficultés parfois on a découvert des choses (...).

Nous sommes, quand nous apprenons ces choses, sujets à une erreur, une erreur sur nous-mêmes ; nous apprenons les choses difficiles, mais comme nous les apprenons à l'école, nous nous habituons à certaines propositions, à certaines idées et elles nous paraissent plausibles et acceptables par elles-mêmes, et nous ne comprenons pas qu'elles ne sont plausibles et acceptables qu'à l'intérieur d'un certain système d'action, de notions, d'une certaine conception du monde, disons franchement d'une certaine philosophie. <sup>1</sup>»

Si l'on considère, comme Koyré au début de ce texte, (qui adopte un ton provocateur pour mieux interpeler son auditoire et « pour le rendre sensible aux problèmes qui s'étaient posés aux protagonistes de la « révolution scientifique » au sein du contexte intellectuel de leur temps »<sup>2</sup>), que l'histoire des sciences se résume à l'histoire des erreurs, on pourrait s'attendre, dans cette thèse, en transposant ce point de vue à la précision dans la mesure, à une comparaison des résultats dans la mesure du temps montrant une amélioration continue au fur et à mesure du perfectionnement des instruments scientifiques. Mais tel n'est pas notre objet. Pour nous livrer à une étude précise de cette amélioration dans la mesure du temps, il faudrait considérer que l'objectif même des savants du XVIIe siècle était la recherche de la précision dans les mesures. Or, cet objectif qui est bien le nôtre aujourd'hui, n'était pas forcément celui de ces savants, car, comme nous l'explique Koyré, nous ne pouvons décontextualiser les idées, ni les extraire des cadres interprétatifs de leur époque. Notre objectif ne sera pas de faire une simple comparaison. Et c'est pour cela que nous ne ferons pas de conversion systématique des unités de mesure utilisées par les savants dans notre système métrique actuel. Nous allons essayer de comprendre cette question de la précision de la mesure du temps dans son propre contexte, essayer d'être le plus proche possible du système d'explication du monde des savants de l'époque. Il s'agit en effet d'une condition nécessaire pour assister à l'émergence de la question de la précision dans la mesure du temps.

Aujourd'hui l'idée même de précision dans la mesure du temps est intimement ancrée dans celles du progrès technologique et de l'innovation. L'objectif de la science

---

<sup>1</sup> Cours de M. Koyré au Lycée Louis-le-Grand le 9 avril 1946, in Seidengart J. (2016), *Vérité Scientifique et vérité philosophique dans l'œuvre d'Alexandre Koyré*, Paris : Les Belles Lettres, Annexe.

<sup>2</sup> Ibid., 3.



d'aujourd'hui n'est pas le même que celui de la science du XVIIe siècle. Par exemple, aujourd'hui la notion même de progrès paraît indissociable de la technologie. Quand on parle du progrès, on parle en fait du progrès technologique, de l'amélioration de nos outils technologiques. Dans le dictionnaire universel d'Antoine Furetière (1619-1688), la notion du progrès exprimait l'idée générale et simple d'avancement (avancement social, intellectuel, marche vers l'avant). Il est impossible de juger des progrès des scientifiques du XVIIe siècle dans la précision de la mesure du temps avec notre regard d'aujourd'hui. Cela reviendrait à calquer notre idée de quête infinie dans la précision de cette mesure sur les préoccupations premières des savants de l'époque. Les scientifiques du XVIIe étaient-ils vraiment à la recherche d'une plus grande précision dans la mesure du temps ? Cette question, rapportée au contexte de la vie des idées de leur époque, fait-elle sens ?

Si la recherche de la précision dans la mesure existait, avait-elle une importance majeure pour les savants ? Constituait-elle une priorité dans leurs travaux ? Et si oui, dans quel domaine du savoir a-t-elle émergé et s'est-elle développée ? Nous allons considérer le savoir scientifique à travers ses trois branches : la construction de la théorie scientifique ; ses applications sur notre représentation du monde physique ; et sa confirmation par l'expérimentation et les mesures. La théorie qui se prête le mieux à cette analyse est la théorie gravitationnelle de Newton, comme présentée dans son ouvrage *Philosophiae naturalis principia mathematica*, souvent abrégé en *Principia*, et ce pour plusieurs raisons que nous allons énumérer tout de suite.

D'abord et avant tout, parce que l'on rencontre la question de la précision dans la mesure du temps dans les trois branches que nous venons de décrire. Dans la tentative de Newton d'universaliser sa théorie gravitationnelle, il compare deux chutes, sous l'action d'une seule force, la gravité : l'une d'un corps à proximité de la surface terrestre et l'autre de la lune vers le centre de la terre. Pour ce faire, il a bien sûr besoin de mesurer un temps de chute libre sans vitesse initiale. Comme exemple représentatif d'une application de sa théorie au monde physique, nous étudierons l'application de la théorie gravitationnelle à la forme de la terre. Pour déterminer la forme exacte de la terre, Newton a utilisé un phénomène dérivé de la chute des corps : le mouvement oscillatoire de pendules simples. Il s'agit ici de comparer la longueur des pendules à

secondes sous différentes latitudes en différents lieux de la planète. Un pendule à secondes est un pendule simple : un corps attaché par un fil de longueur telle que le pendule batte la seconde (la période  $T$  d'un aller-retour est alors de 2 secondes). Il utilise ainsi un instrument de mesure du temps pour des recherches géodésiques. Enfin, troisième mouvement, la confirmation de sa loi gravitationnelle est apportée grâce à un nombre considérable d'expéditions à travers le monde qui visaient, entre autres expérimentations, à comparer les longueurs des pendules à seconde sous différentes latitudes.

Notre travail sur la théorie gravitationnelle de Newton s'impose également pour une deuxième raison. En ce qui concerne les mesures précises du temps, Newton fait référence à deux grands savants : Galileo Galilei et Christian (ou Christiaan) Huygens. Cette référence nous permet d'étudier la question de la mesure du temps et de sa précision de la fin du XVI<sup>e</sup> siècle jusqu'au début du XVIII<sup>e</sup>, Huygens faisant le pont entre Galilée et Newton. Ce choix d'auteurs nous est imposé par Newton lui-même pour ce sujet précis de la mesure du temps, sans constituer une liste exhaustive de ses influences multiples dans la diversité des sujets relatifs à la théorie gravitationnelle, comme en particulier celle reconnue par tous de Descartes. Nous sommes obligés de nous spécialiser dans le cadre de cette thèse et de restreindre notre champ d'investigation à la question bien définie de la mesure du temps dans l'œuvre de ces savants. Cela ne va pas sans poser de difficultés, car ce faisant, nous devons nous efforcer de faire abstraction d'autres aspects de leur travail (leurs recherches théologique, alchimique, philosophique, de chronologie, etc.), tout en gardant en tête ces aspects pour restituer la complexité de leur pensée. À l'époque, la définition du savant était bien plus vaste qu'elle ne l'est aujourd'hui. Le savant était naturellement ouvert à tous les champs de la connaissance et cherchait à en approfondir tous les aspects alors qu'aujourd'hui, il est limité par sa spécialisation.

Enfin, le travail de Newton est considéré de nos jours comme le prototype même des débuts de la science moderne.

Pour répondre à notre question initiale, nous commencerons par une présentation critique de deux articles phares liés directement à notre sujet : d'abord celui d'Alexandre

Koyré intitulé *Du monde de l'« à peu près » à l'univers de la précision* ; puis celui de Richard Westfall intitulé *Making a World of Precision: Newton and the Construction of a Quantitative Physics*. Ces deux articles aux méthodologies et cadres intellectuels très différents offrent toutefois une similitude : l'absence d'une définition de la précision dans la mesure du temps. On peut déduire de ces deux textes que la caractéristique principale de la mesure du temps est sa relation à un instrument de mesure adéquat. Cela nous oblige par la suite à proposer une définition de cette notion de précision dans la mesure du temps pour mieux la cadrer.

Dans le chapitre suivant, on établira le cadre général du passage argumentatif de la philosophie naturelle d'un langage verbal à un langage mathématique. Ceci pour préparer l'arrivée du temps mathématisé dans la philosophie naturelle. Car nous ne pouvons pas considérer la précision de la mesure du temps dans son contexte sans préciser l'évolution de la notion de temps dans les théories physiques du XVII<sup>e</sup> siècle. Nous le ferons à travers l'étude du *Discours sur deux sciences nouvelles* de Galilée et des *Lectures géométriques* d'Isaac Barrow. Ces dernières vont nous préparer à l'étude du temps absolu dans les *Principia* de Newton. Pour clore ce chapitre, nous présenterons la critique de ce temps absolu newtonien dans les *Institutions de physique* de la Marquise du Chatelet, traductrice indétrônable des *Principia* en français.

Nous entrerons ensuite dans l'étude approfondie du rôle de la précision dans la mesure du temps dans la construction de la théorie de la gravitation universelle de Newton, comme évoqué précédemment. Dans un premier temps, nous nous pencherons sur ses manuscrits de jeunesse, dans lesquels on trouve pour la première fois trace de l'idée d'universalisation de la théorie gravitationnelle. Nous verrons comment la détermination du temps d'une chute est un élément nécessaire pour la réalisation de cette idée, qui prendra sa forme finale avec la proposition IV du livre III.

Nous poursuivrons par une brève présentation des trois livres des *Principia* comme étape préparatoire en soulignant les aspects nécessaires à l'étude plus détaillée de la proposition IV du livre III.

Lors de l'étude des ouvrages de jeunesse de Newton, nous avons constaté qu'il faisait plusieurs fois référence au *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée. Il

s'agit du résultat donné par Galilée de la chute libre d'un corps grave sans vitesse initiale à la vitesse de « cent braccia dans cinq secondes ». Ce résultat sera étudié dans son contexte afin de déterminer sa pertinence dans le cheminement intellectuel de Galilée. Ce chapitre se clôt sur la présentation de ce que Galilée appelle son *mesureur* du temps, l'instrument qui apporte selon lui une grande précision dans la mesure du temps et pour lequel nous donnerons une analyse nouvelle.

Au cours de l'étude des *Principia*, un autre résultat, celui de Christian Huygens, est apparu (15 pieds 1 pouce et  $1\frac{4}{3}$  lignes dans une seconde). Il est annoncé par l'auteur dans son ouvrage, *Horologium Oscillatorium*. Comment Huygens est-il arrivé à ce résultat en partant des expériences réalisées par Giovanni Batista Riccioli et celles du père Mersenne ? Au-delà de la question de la détermination de la mesure du temps dans la chute des corps, une grande partie de son travail s'est concentrée sur l'amélioration des horloges à pendule. Cette amélioration, à travers l'étude de l'isochronisme des oscillations, a permis une grande précision dans la mesure du temps, relativement à son époque.

Avant de conclure, nous nous pencherons sur ce que nous avons appelé l'application et la confirmation de la théorie gravitationnelle. Nous allons étudier de près la proposition XX du livre III des *Principia* où il est question de l'application de la force gravitationnelle à la forme de la terre. Dans cette application, Newton n'utilise pas de résultats de mesure du temps. Pour déterminer le degré d'aplatissement de la terre, il se fonde sur les changements de longueur des pendules à seconde sous différentes latitudes. Pour confirmer cette application, une série d'expéditions a été effectuée à travers le globe comme nous l'avons précédemment expliqué. Nous verrons ici en détail l'une de ces nombreuses expéditions : celle effectuée sur la rivière noire de Jamaïque et présentée par James Bradley dans la revue *Les transactions philosophiques*. Cette présentation nous permet d'ouvrir le rôle de la précision dans la mesure du temps en direction des recherches géographiques.

En guise de prélude à notre étude, nous présentons maintenant de manière critique deux articles importants, intimement liés à notre sujet. Nous allons étudier de près comment deux auteurs, A. Koyré et R.S. Westfall, traitent la précision dans la mesure du

temps. En pointant des lacunes dans leurs approches, nous pourrions mieux ancrer notre propre problématique et définir les notions clés de cette thèse.

Alexandre Koyré et Richard Westfall sont deux auteurs qui ont donné une importance majeure à l'étude de la précision dans la mesure du temps. Ils ont donné une place clé à ce sujet lié à la transformation de l'argumentation de la Philosophie Naturelle. La précision dans la mesure du temps est un fait scientifique qui non seulement représente un des aspects majeurs de la Nouvelle Philosophie Naturelle (née vers la fin du XVI<sup>e</sup> siècle), mais aussi un fait scientifique qui a eu une influence majeure sur la manière de vivre. Un fait qui a participé à la création des nouvelles sociétés. Nous allons voir comment les articles respectifs des deux auteurs soulignent l'importance de notre sujet, de quelle manière ils le traitent et quelles questions ils laissent ouvertes. Le premier article étudié est celui de l'Alexandre Koyré.

#### 1. « Du monde de l'« à-peu-près » à l'univers de la précision. »

Cet article est paru pour la première fois dans la revue Critique, en Septembre 1948, N° 28, et fait partie d'une série d'études sur *Le Machinisme*. Dans cet article, comme son titre l'indique, Alexandre Koyré, se pose la question de l'origine de ce qu'il appelle le *machinisme* ou autrement dit de la technologie véritable. Quand et comment est-on passé d'un monde sans précision à un univers de la précision ? Pour Koyré la figure emblématique qui stigmatise ce passage est Galilée. Mais pourquoi donc ne trouve-t-on pas ces origines avant Galilée, avant le XVII<sup>e</sup> siècle ? Koyré traite cette question avec la même vision qui caractérise l'intégralité de son œuvre : l'unité de la pensée humaine. Il donne toutefois la priorité à la théorie au détriment de l'expérience, de la pratique. Il part du principe que la création du monde de la précision va de pair avec la mathématisation de la Philosophie Naturelle, ou pour le reprendre, d'une Physique élaborée. Il nous fait suivre un voyage historique de la pensée de l'Antiquité jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle. Ce voyage, qui semble au premier coup d'œil comme un diaporama général de la question de la précision et des mesures, se concrétise dans sa dernière partie et se centre autour de la question de la précision dans la mesure du temps. C'est à travers l'étude du temps, de sa mesure et de sa précision, que Koyré formulera sa réponse dans

sa forme la plus complète. Les éléments de cette réponse se dévoilent au fur et à mesure de son écriture jusqu'à la fin de l'article.

Cet article s'ouvre avec l'étude de la question précédemment posée au sein de la période antique. Koyré semble convaincu de la raison pour laquelle le machinisme n'a pas été développé à l'antiquité. C'était, nous dit-il, parce qu'à cette période la question ne se posait pas. Tout simplement parce que « Selon toute apparence elle (la science grecque) n'a pas cherché à le faire »<sup>3</sup>. Koyré nous dit ici explicitement que l'objectif de la science grecque était différent de celui du XVIIe siècle. Malgré ce fait, c'est la science grecque qui a posé les bases du machinisme, de la technologie, mais sans pour autant les avoir développées. Elle est restée à la simple « incorporation de nombreux éléments de la science géométrique et mécanique (statique) dans la *τέχνη* »<sup>4</sup>. Pour que la science grecque développe une technologie il fallait d'abord qu'elle accepte de mathématiser la nature. Mais ceci n'a pas été le cas. Koyré nous dit, que dans le cas d'Aristote et celui de Platon, l'idée que les formes géométriques pouvaient s'appliquer au réel paraissait absurde. Pour Platon les mathématiques appartenaient au monde de l'intelligible et non pas au monde du sensible. Et pour Aristote les mathématiques, vu leur nature abstraite, pour ce qui concerne l'étude des phénomènes naturels terrestres, n'étaient pas adéquates. La description mathématique des phénomènes naturels ne peut être ainsi qu'une entreprise remplie de lacunes, absolument incompatible avec la réalité physique, donc absurde. Le cadre conceptuel antique nous dicte la séparation du monde en monde supra lunaire et en monde sublunaire. Le monde supra lunaire, le monde céleste, est celui de la perfection, celui de la non corruptibilité. Alors que le monde sublunaire, celui de notre vie terrestre est caractérisé par l'imperfection, la corruptibilité. La réalité du monde d'ici-bas est ainsi celle de la non précision : « elle est le domaine du mouvant, de l'imprécis, du « plus ou moins », de l'« à-peu-près » »<sup>5</sup>. Ceci concerne l'application des mathématiques aux objets de la réalité terrestre. Car, comme Koyré le souligne très bien, en ce qui concerne l'astronomie et le monde supra lunaire, l'exactitude mathématique n'est pas simplement imaginable mais exigée. Mais la mathématisation de la nature terrestre, dans ce contexte intellectuel, n'avait pas lieu d'être. Il va de soi que l'idée de

---

<sup>3</sup> Koyré A. ([1948] 1973), « Du monde de l' « à-peu-près » à l'univers de la précision. », in *Études d'histoire de la pensée philosophique*, Paris : Gallimard, Collection Tel, 342.

<sup>4</sup> Ibid., Note 2.

<sup>5</sup> Ibid., 342.

mesurer quoi que ce soit, avec des instruments de mesure, à quelques exceptions près, n'avait pas lieu d'être non plus.

À ce point du développement de sa pensée Koyré nous donne la caractéristique la plus importante du monde de la précision : « c'est à travers l'instrument de mesure que l'idée d'exactitude prend possession de ce monde, et que le monde de la précision en arrive à substituer au monde de l'« à-peu-près » »<sup>6</sup>. La conséquence de ce fait est l'absence de la précision dans la mesure du temps dans la science antique. Par le terme d'instrument Koyré ne définit pas seulement les machines artificielles de la mesure du temps mais tout mouvement, naturel ou artificiel, qui peut servir à la mesure du temps. Pour l'astronomie, le mouvement régulier apparent des étoiles, est considéré ici comme un instrument (*ὄργανον*) de la mesure du temps dans le sens où il nous permet de déterminer des durées égales de temps aussi grandes soient-elles. Cette régularité permet, d'une certaine manière, l'idée du temps divisé en parties égales. Mais pour le monde terrestre il en est tout autrement. Les jours ne se divisent pas en parties égales. Le jour et la nuit ne sont pas de durée stable et égale toute l'année. Le temps terrestre rythmé par le mouvement apparent du soleil est celui de l'instabilité. Koyré remarque ici que la notion du temps est intimement lié à la notion du mouvement. Il nous dit que puisqu'il en est ainsi, une nouvelle conception du mouvement est nécessaire pour que la précision devienne inséparable de la mesure du temps. Dans un cadre intellectuel d'une nouvelle conception du mouvement (celle capable d'unir les deux mondes de la science grecque, sublunaire et supra lunaire) l'instrument de la mesure du temps de référence devient la machine artificielle. Cet instrument nécessite pour sa réalisation le travail de mains habiles. Mais ce n'est pas pour autant que l'on peut se permettre de le ranger exclusivement parmi les choses techniques.

Koyré par la suite soutient l'idée que « l'histoire de la technique est inséparablement liée à l'histoire intellectuelle et ne peut pas en être séparée. »<sup>7</sup> Pour soutenir cette idée l'auteur cite un passage de l'ouvrage de Febvre L. intitulé : *Le Problème de l'incroyance au XVIe siècle*<sup>8</sup>. Lors de ce passage Febvre présente deux définitions de la notion de

---

<sup>6</sup> Ibid.,

<sup>7</sup> Ibid., 345.

<sup>8</sup> Febvre L. (1946), *Le Problème de l'incroyance au XVIe siècle*, Paris : Éd. Albin Michel.

science vues par le prisme des savants du XVIe. Il oppose la définition de la science proposée par Bacon comme une « généralisation ou prolongement du savoir acquis dans la pratique » à celle de Descartes qui voit la science comme « la possibilité de faire pénétrer la théorie dans l'action, la possibilité de la *conversion* de l'intelligence théorique au réel, de la possibilité à la fois d'une *technologie* et d'une *physique*. »<sup>9</sup>. Entre ces deux définitions Febvre prend clairement parti et Koyré fera de même. Les deux auteurs s'identifient à la définition cartésienne. Koyré nous dit que c'est cette conversion même de la théorie à la pratique qui a permis l'émergence de la précision.

Plus loin dans cet article Koyré consacre une partie à l'étude détaillée de la question des instruments. Koyré nous dit qu'avant Galilée, au XVIe et au début du XVIIe, la précision n'était pas liée aux instruments de mesure. Et ceci pour des raisons multiples. Tout d'abord car les instruments construits à cette époque étaient produits « au jugé », « par estimation »<sup>10</sup>. En effet, l'opérationnalité de ses instruments dépendait de l'habileté de leur fabriquant. Les constructions les plus subtiles étaient confiées aux mains humaines. De plus leur fabrication n'était pas le résultat d'un calcul élaboré. Car le calcul à cette période était une opération très compliquée et réservée à une élite mathématique. Les calculs ainsi induisaient en erreurs, et souvent de grandes approximations entraient en jeu.

« Chose curieuse : deux mille ans plus tôt Pythagore avait proclamé que le nombre est l'essence même des choses ; et la Bible avait enseigné que Dieu avait fondé le monde sur « le nombre, le poids, la mesure ». Tout le monde l'a répété – mais personne ne l'a cru. Du moins, personne jusqu'à ce que Galilée ne le prenne au sérieux. Personne n'a jamais essayé de déterminer ces nombres, ces poids et ces mesures. Ou plus exactement personne n'a jamais cherché à dépasser l'usage pratique du nombre, du poids, de la mesure dans l'imprécision de la vie quotidienne - compter les mois et les bêtes, mesurer les distances et les champs, peser l'or et le blé - pour en faire un élément du savoir précis. »<sup>11</sup>

---

<sup>9</sup> Koyré A. ([1948] 1973), 346.

<sup>10</sup> Ibid., 347.

<sup>11</sup> Ibid., 349.



Ici Koyré met en avant un fait très intéressant qui mérite d'être évoqué. Il nous dit pour résumer qu'alors qu'il était admis que Dieu a créé le monde en faisant usage du langage mathématique, et que les mathématiques étaient l'essence des choses, personne ne prit ces vérités au sérieux avant Galilée. Comment peut-on interpréter ce « au sérieux » ? Il est faux de dire que les prédécesseurs de Galilée fermaient les yeux sur ces vérités philosophiques et théologiques aussi importantes. C'est le cadre de la réflexion dans lequel ces vérités ont été interprétées qui était radicalement différent. Dans le cadre par exemple où la division du monde céleste du monde terrestre est nette, les nombres peuvent très bien être l'essence des choses et ne pas être considérés comme applicables au monde réel, et ne pas trouver leur place dans le monde du sensible. De plus, prendre « au sérieux » ces vérités, comme le dit Koyré, signifie une perte importante de tout aspect symbolique et mythologique des vérités en question. Pour réussir à perdre de vue le contexte symbolique et mythologique des vérités philosophiques et théologiques il faut les décontextualiser. On peut ainsi clore cette parenthèse disant que ce qui fait que Galilée a pris « au sérieux » ses vérités, est le fait qu'il les a tout simplement interprétées littéralement, en dehors de leur contexte d'origine. Pour que Galilée puisse réaliser l'unification des deux mondes antiques, il fallait croire que Dieu a créé le monde en tant que géomètre au sens littéral du terme. C'est une interprétation différente qui a conduit à un heureux malentendu lors de ses lectures philosophico-théologiques sous le prisme du géomètre au sens pratique très développé. Ceci a permis à Galilée d'avoir l'idée de la quantification de la nature, jusqu'ici les mathématiques étant réservées au monde supra lunaire. L'idée du Dieu géomètre, donne une ouverture considérable à l'usage des mathématiques. Dieu a tout créé en tant que géomètre, plus seulement le monde supra lunaire. L'unification des deux mondes est devenue ainsi une nécessité afin de comprendre l'œuvre divine. Mais Galilée ne pouvant nous convaincre de la perfection du monde d'ici-bas, il s'est mis à chercher les imperfections du monde céleste et les a trouvées. Mais fermons cette parenthèse et reprenons la suite de l'article de Koyré.

L'auteur met ensuite à plat l'idée communément admise sur la raison de l'imprécision du monde de l'« à-peu-près ». Le manque de précision serait dû au manque d'instruments de précision et du langage adéquat pour élaborer les résultats de mesures précises. L'auteur donne deux exemples afin de tenter de déterminer ce qu'il appelle « la

mentalité générale » du monde de l'« à-peu-près ». Les deux exemples présentés ici servent, dans le contexte de cet article, de test de validation à l'idée présentée plus haut.

Le premier exemple donné ici par Koyré est celui des alchimistes. L'alchimie, nous dit l'auteur, est l'une des seules sciences terrestres qui a construit un vocabulaire qui lui est propre. La seule qui ait construit un outillage qui a servi de base à la chimie contemporaine. Néanmoins elle n'a jamais réussi à effectuer une expérience précise. Ses archives sont constituées d'une somme considérable d'observations mais elle s'est contentée d'observations au même titre que de « recettes de cuisine aussi imprécises, aussi approximatives, aussi qualitatives que celles-ci »<sup>12</sup>. Pourquoi ? Ce ne fût pas par manque d'instrument de précision. Les alchimistes, par exemple, ne se servent pas, ou très peu de balances. Et pourtant les balances existent. Elles sont utilisées dans le commerce avec une précision plus ou moins bonne. Mais l'alchimiste n'en fait pas usage, s'il en faisait il ne serait pas alchimiste mais chimiste. L'alchimiste n'avait pas de thermomètre pour mesurer la température mais « Ce n'est pas le thermomètre qui lui manque, c'est l'idée que la chaleur est susceptible d'une mesure exacte. »<sup>13</sup>.

Le deuxième exemple est celui de la lunette astronomique. Koyré évoque les quatre siècles qui séparent l'invention, ou la conception de la lunette (ou de la longue vue) et son utilisation comme instrument d'observation astronomique. Ce retard, nous dit l'auteur, est dû à la transformation de l'outil en un instrument d'optique. Car l'outil était là, mais l'instrument scientifique non. Ce que Koyré appelle « outil », est l'idée formulée par la pensée antique. L'outil, selon l'idée antique, est une chose qui sert à prolonger nos organes sensoriels. Alors que l'idée de l'instrument s'inscrit « dans l'acceptation la plus forte et la plus littérale du terme, incarnation de l'esprit, matérialisation de la pensée. »<sup>14</sup> Koyré soutient ici la même idée que dans l'exemple précédent : « Encore une fois ce n'est pas l'insuffisance technique, c'est l'absence de l'idée qui nous fournit l'explication. »<sup>15</sup> « On ne regarde pas tant que l'on ne sait pas qu'il y a quelque chose à voir, et surtout tant que l'on sait qu'il n'y a rien à voir. »<sup>16</sup> C'est l'idée du Dieu géomètre, de l'unification

---

<sup>12</sup> Ibid., 350.

<sup>13</sup> Ibid., 350.

<sup>14</sup> Ibid., 352.

<sup>15</sup> Ibid., 351.

<sup>16</sup> Ibid., 351, Note 2.

des deux mondes, sublunaire et supra lunaire, qui fait que Galilée a tourné sa lunette vers le ciel. C'est ainsi que la lunette est passée du statut d'outil (qui ne fait que prolonger la vue) au statut d'instrument (qui représente la concrétisation de la théorie). Ceci est le terrain propice dans lequel le passage à la précision est réalisable. La lunette astronomique, comme matérialisation de la pensée scientifique, n'est pas pour autant l'instrument qui va introduire la précision dans la vie quotidienne. Ou comme nous dit Koyré, ce n'est pas l'instrument qui arrive « à s'incorporer dans les rapports sociaux, à transformer, ou du moins à modifier, la structure du sens commun lui-même »<sup>17</sup>.

L'instrument qui réussit cette transformation radicale, est celui de la mesure du temps. Il n'est pas seulement la représentation d'une réflexion scientifique mais une des causes de la genèse même d'une autre manière de vivre. La vie antique ou romaine était dictée par le temps vécu, dans lequel la notion d'heure ou de minute ne joue aucun rôle. Ces notions pourtant jouent un rôle important dans les sociétés organisées, comme celles des monastères ou d'une civilisation urbaine qui nécessite une certaine précision. Et c'est dans ce cadre, nous dit Koyré, que les premières horloges ont fait leur apparition.

« Mais cette heure (établie au Moyen Âge), elle (la société) n'éprouve pas un grand besoin de la connaître. Elle perpétue, ainsi que le dit si bien L. Febvre, « les habitudes d'une société de paysans, qui acceptent de ne savoir jamais l'heure exacte, sinon quand la cloche sonne (à la supposer bien réglée) et qui pour le reste s'en rapportent aux plantes, aux bêtes, au vol de tel oiseau et au chant de tel autre ».

« Environ soleil levant » ou bien « environ soleil couché ». »<sup>18</sup>

Ce monde décrit ici par Koyré à travers la bouche de L. Febvre nous paraît aujourd'hui idyllique. Surtout à nous, habitants des grandes villes occidentales, prisonniers de la précision dans la mesure du temps (heureusement pour le moment toujours de la minute et non pas de la seconde) dans tout les aspects de notre vie. L'historiographie, nous dit l'auteur, soutient que le passage du temps vécu au temps mesuré est effectué par le biais des besoins monastiques à la vie sociale. Koyré, alors qu'il accepte que cette affirmation doive avoir sa part de vérité, ne semble pour autant pas absolument

---

<sup>17</sup> Ibid., 353.

<sup>18</sup> Ibid., 354.

convaincu. Et ce pour une raison simple. Koyré nous dit que les horloges monastiques étaient bien loin d'être précises. Les seules horloges précises qui existaient, qu'elles soient publiques ou privées, étaient en nombre tellement restreint que cela faisait d'elles des produits de luxe, qui par ailleurs passaient « plus de temps chez les horlogers que chez les possesseurs »<sup>19</sup>. Et c'est pour cette raison que jusqu'à la première moitié du XVIe siècle le temps vécu était la règle.

« Dans la mentalité des hommes de cette époque, « règne partout fantaisie, imprécision, inexactitude. Le fait d'hommes qui ne savent même pas leur âge exactement : on ne compte pas les personnages historiques de ce temps qui nous laissent le choix entre trois ou quatre dates de naissance, parfois éloignées de plusieurs années », le fait d'hommes qui ne connaissent ni la valeur ni la mesure du temps. »<sup>20</sup>

Koyré nous dit par la suite qu'à partir de la deuxième moitié du XVIe siècle, les montres s'améliorent et deviennent de plus en plus répandues. Mais ce n'est pas pour autant que l'horloge de précision naquît dans des ateliers d'horlogers. La précision pour Koyré va de pair avec l'instrument de mesure vu comme la réalisation d'une théorie. L'horloge comme instrument précis de mesure du temps ne peut être que le produit d'une théorie scientifique. Sans d'ailleurs exclure son passage à l'usage pratique. Le besoin pratique peut parfois même être source d'inspiration au service de la création théorique dans l'objectif de la création instrumentale. Au sujet de la mesure du temps, l'urgence de la détermination des longitudes pour la navigation en est l'exemple parfait.

« Mais ce n'est pas l'utilisation d'un objet qui en détermine la nature : c'est la structure »<sup>21</sup>. Ces sont les savants qui sont derrière la création de cet instrument de précision et non pas les artisans, souligne Koyré. Pour soutenir cette thèse, l'auteur fait appel à l'ouvrage de M. Defossez qui par son titre seul la confirme : *Les Savants du XVIIe siècle et la mesure du temps*.<sup>22</sup> Dans cet ouvrage Defossez soutient la thèse que l'horloge de précision n'est pas une création sociale, effectuée par les artisans horlogers au

---

<sup>19</sup> Ibid., 356, note 1.

<sup>20</sup> Ibid., 356.

<sup>21</sup> Ibid., 357.

<sup>22</sup> Defossez L. (1946), *Les Savants du XVIIe siècle et la mesure du temps*, Lausanne : Journal Suisse D'Horlogerie Et De Bijouterie.

service des besoins sociaux, mais une création scientifique, création des savants au service des sciences, l'application pratique venant ensuite. Koyré cite le passage suivant qui se trouve dans la préface de l'ouvrage de Defossez, rédigée par M. Jacquerod :

« (...) pour cette découverte (d'un instrument de mesure exacte du temps) les procédés empiriques étaient impuissants, et seuls les théoriciens, ceux qui précisément élaboraient à cette époque les théories et établissaient les lois de la mécanique rationnelle, étaient à même de le faire. Aussi les physiciens, mécaniciens, astronomes, et surtout les plus grands d'entre eux, se sont-ils préoccupés du problème à résoudre pour la raison bien simple qu'ils y étaient les premiers intéressés. (...) La seconde face de la question, d'une importance plus grande encore, doit être recherchée dans les besoins de la navigation »... En mer, notamment, la détermination des coordonnées géographiques (et surtout la détermination de la longitude). Elle « exige la connaissance de l'heure d'un méridien d'origine. Cette heure, il faut l'emporter avec soi, il faut précieusement la conserver. Il faut donc posséder « un garde-temps » auquel on puisse se fier... ».<sup>23</sup>

Koyré cite de longs passages de cette préface, et non sans raison. Ils sont bien évidemment en accord avec la thèse soutenue par l'auteur. Mais l'objectif ultime de Koyré est de soutenir une thèse plus importante pour lui que celle exprimée dans cet article. Defossez est un technicien d'horlogerie, et Jacquerod est physicien. Koyré déclare ouvertement sa joie d'être « à-peu-près » d'accord avec des auteurs qui malgré leurs formations initiales respectives, ne sont pas « infectés par le virus de l'épistémologie empiriste et positiviste qui a fait, et qui fait encore, tant de ravages parmi les historiens de la pensée scientifique. »<sup>24</sup>

Juste après cette déclaration polémique, Koyré tient à nous expliquer le pourquoi de l'« à-peu-près » de son accord avec les deux auteurs. Il ne croit pas au rôle prééminent de la détermination des longitudes dans la construction des instruments précis de la mesure de temps. Il est profondément convaincu que Christiaan Huygens, par exemple, aurait présenté le même zèle dans son travail d'isochronisme, du mouvement circulaire, de la force centrifuge etc. même sans stimulation externe. D'après Koyré, ce n'est pas son

---

<sup>23</sup> Koyré A. ([1948] 1973), 358-359.

<sup>24</sup> Ibid., 359.

désir ultime de résoudre le problème des longitudes qui a fait que Huygens a inventé des horloges de précision. S'il a trouvé des réponses au sujet de la précision des horloges c'est parce qu'il essayait de résoudre les problèmes posés des sciences de son temps : « pour l'usage scientifique et de l'urgence absolue, pour la mécanique physique, de découvrir un moyen de mesurer le temps. Aussi est-il tout à fait compréhensible que Galilée se soit préoccupé de la question : à quoi bon, en effet posséder des formules qui permettent de déterminer la vitesse d'un corps à chaque instant de sa chute en fonction de l'accélération et du temps écoulé si l'on ne peut mesurer ni la première ni la seconde ? »<sup>25</sup>

Sur ce point, c'est nous qui sommes « à-peu-près » d'accord avec Koyré. Il est vrai que la motivation première de Huygens dans sa découverte de l'isochronisme cycloïdal n'était pas la solution du problème des longitudes. On voit chez Huygens dès le début de sa correspondance avec le Père Mersenne que c'est un géomètre préoccupé par les problèmes de son temps, et notamment, par l'étude des propriétés des courbes et de leur création géométrique. Avec ses yeux d'observateur, Huygens repère le problème de l'isochronisme des oscillations du pendule simple. Chez Galilée, cela était considéré comme « vrai » car il l'envisageait du point de vue du géomètre. Ce problème « pratique », Huygens l'a résolu par la géométrie. Il a appliqué les propriétés de la cycloïde aux horloges à pendule ce qui a assuré l'isochronisme de ces derniers. D'autres problèmes liés à l'étude du mouvement sous le prisme d'une Philosophie Naturelle mathématisée se sont formalisés dans l'œuvre galiléenne. Huygens, et d'autres avant lui, se sont mis à la recherche de solutions.

Mais est-ce que Galilée s'est vraiment préoccupé de la question formulée plus haut par Koyré ? Est-ce que Galilée a vraiment cherché à mesurer le temps d'une chute ? Est-ce que son objectif premier était la mesure précise des éléments constituant du mouvement ? Nous ne le croyons pas. D'abord parce que l'outil de la description mathématique des phénomènes naturels utilisé par Galilée est la géométrie. La pratique de la géométrie ne consiste pas à donner un résultat chiffrable de grande exactitude, mais de mettre en rapport les différentes quantités. L'objectif premier était ainsi, pour la chute libre par exemple, la mise en rapport entre le temps et la distance. Les vitesses, le

---

<sup>25</sup> Ibid., 360.

temps, les distances ne sont pas mesurées avec précision, mais elles sont calculées par les aires de parallélogrammes, de triangles etc. toujours dans l'objectif de la mise en rapport de l'un avec l'autre. Les mouvements de genre différent, uniforme ou uniformément accéléré, afin d'être décrits, sont représentés par des formes géométriques. Quand Galilée effectue des calculs arithmétiques, il est dans l'approximation. Ainsi pour reprendre Koyré, Galilée lui-même est dans le monde de l'« à-peu-près ». Et même si la recherche d'une solution au problème de la détermination des longitudes n'est pas sa priorité, ou autrement dit, si elle n'est pas la stimulation de sa pensée scientifique, c'est tout de même elle qui lui demande de créer un instrument précis de la mesure du temps.

C'est pour les observations célestes, ou pour être plus concret pour les observations des satellites de Jupiter, que Galilée propose le pendule à seconde ( $T = 1$  sec.) comme instrument précis de la mesure du temps. C'est pour le prix proposé par les Etats-Généraux de Hollande que Galilée décrit pour la première fois son *mesureur* de temps. Car pour reprendre Koyré, ce n'est pas l'instrument qui lui manque mais l'idée d'une mesure précise du temps. Ayant étudié les propriétés du pendule simple Galilée sait très bien qu'il peut mesurer non seulement une seconde de temps, mais des subdivisions du temps beaucoup plus subtiles. Cependant il n'en fait pas usage lors de ses propres observations de chutes libres des corps graves. Le besoin de précision dans la mesure du temps chez Galilée n'est pas née lors de l'unification des deux mondes antiques. Autrement dit, l'émergence de la précision dans la mesure du temps ne trouve pas ses origines dans la construction de sa théorie scientifique mais dans d'autres aspects. Ce sont des aspects d'origine pratique, dont les solutions ne sont pas indépendantes de la théorie scientifique. Tout cela sera étudié et argumenté dans cette thèse dans les chapitres suivants à l'occasion de la détermination de la notion du temps dans l'œuvre galiléenne et le résultat de sa dite mesure de la chute libre des corps sans vitesse initiale.

En ce qui concerne maintenant la question de la priorité de la théorie par rapport à la pratique, les choses malheureusement ne semblent pas aussi claires que Koyré les présentent. La relation entre théorie et pratique n'est pas à sens unique. C'est en observant le mouvement des astres que l'on s'est fait l'idée de la division égale du temps. Ce fût au travers de notre relation avec le monde céleste. Et le mouvement apparent des

astres est considéré dans cet article comme un instrument. On peut très bien, par exemple, imaginer la création du pendule comme instrument de la mesure du temps comme un instrument terrestre à l'image de l'instrument céleste. Lors de l'étude des phénomènes terrestres on part d'un instrument naturel céleste pour arriver à la recherche d'un phénomène naturel du monde ici-bas qui présente lui aussi une régularité dans son mouvement. Le mouvement pendulaire offre cette régularité tant désirée, mais il n'est malheureusement pas parfait. C'est une hypothèse de la genèse de l'instrument artificiel de la mesure du temps qui peut paraître plausible mais ce n'est pas pour autant qu'elle est absolument vraie. Car dans ce cas, la théorie, l'idée que l'on se fait du monde est absente. Il faut d'abord avoir eu l'idée de l'unification de deux mondes pour ensuite avoir celle de chercher un instrument de mesure du temps à l'image de l'instrument céleste. De là nous revenons sur la thèse soutenue par Koyré. Le simple fait de tourner en rond entre théorie et pratique nous démontre la grande complexité et subtilité de leur relation, leur intrication. Cette question mérite une étude à elle-seule et de ce fait il nous est impossible de nous prononcer complètement dans cette thèse.

En tout cas Koyré reste ferme sur son idée. Et dans ce contexte il poursuit son raisonnement :

« Ce n'est pas en regardant se balancer le grand candélabre de la cathédrale de Pise que Galilée a découvert l'isochronisme du pendule, ne serait-ce que parce que ce candélabre n'y a été placé qu'après son départ de sa ville natale – bien qu'il soit entièrement possible que ce fût un spectacle de ce genre qui l'ait incité à méditer sur cette structure propre de va-et-vient : les légendes contiennent presque toujours un élément de vérité -, c'est en étudiant mathématiquement, à partir des lois du mouvement accéléré qu'il avait établies par une déduction rationnelle, la chute des corps graves le long des cordes d'un cercle placé verticalement. Or, c'est alors seulement, c'est-à-dire *après* la déduction théorique, qu'il a pu songer à une vérification expérimentale (...) et l'expérience réussie, essayer de construire l'instrument qui permettrait d'utiliser en pratique la propriété mécanique du mouvement pendulaire.

C'est exactement de la même manière, c'est-à-dire par une étude purement théorique, que Huygens a découvert l'erreur de l'extrapolation galiléenne et démontré que l'isochronisme se réalise non sur le cercle, mais sur la cycloïde ; (...)



L'histoire de la chronométrie nous offre un exemple frappant, peut-être le plus frappant de tous, de la naissance de la pensée technologique qui, progressivement, pénètre et transforme la pensée – et la réalité – technique elle-même. (...) Ce qui explique à son tour que les techniciens, les horlogers du XVIIIe siècle, ont pu améliorer et perfectionner les instruments que leurs devanciers n'ont pas pu inventer : c'est qu'ils vivaient dans un autre « climat » ou « milieu » technique ; et qu'ils étaient infectés par l'esprit de la précision ».26

Il est vrai qu'au XVIIIe siècle le rapport des savants avec la notion de la précision au sujet du temps, et même peut-être en général, semble être toute différente de celle des savants du XVIIe siècle. Un élément révélateur est la notion d'expérience scientifique. Au XVIIe siècle ont eu lieu des expériences que l'on peut caractériser d'observations soignées27. Mais au passage au XVIIIe siècle, de manière progressive comme souligné par Koyré, les observations soignées deviennent des expériences scientifiques de définition presque contemporaine. Il y a un protocole d'expérience à suivre de plus en plus précis qui se met en place avec beaucoup de soin, et de plus en plus d'effets perturbateurs sont pris en compte. À cela s'ajoute une amélioration constante des instruments de mesure et de l'analyse des valeurs obtenues. De cette manière les résultats sont eux aussi jugés sur leur précision. Et ces résultats commencent à avoir le statut d'éléments de validation, ou de confirmation d'une théorie. Comme le dit très bien Koyré, le XVIIIe est le siècle dans lequel le virus de la quête de la précision ultime dans les mesures s'est installé. Le XVIIe peut ainsi être considéré comme celui de la naissance de l'idée que la précision dans la mesure du temps est importante pour plusieurs raisons. Mais ce n'est qu'au XVIIIe siècle que cet élément important de la pensée scientifique est établi.

Pour finir avec Koyré et passer à l'article de Richard S. Westfall nous aimerions attirer l'attention du lecteur sur une question qui reste ouverte : de quelle précision dans la mesure du temps s'agit-il dans l'article que nous venons d'étudier ? La définition de la précision est absente. Cependant, cette question est pour nous primordiale, car ce n'est qu'en définissant cette notion que nous allons pouvoir identifier son émergence dans les

---

<sup>26</sup> Ibid., 360-361.

<sup>27</sup> Yoder J.D. ([1988] 1990), *Unrolling Time and the mathematization of nature*, Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1.

trois branches de la pensée scientifique mentionnées dans l'introduction de cette thèse. Nous allons tenter de donner une réponse dans la dernière partie de ce deuxième chapitre.

## 2. « La création du monde de la précision »

Richard Westfall, spécialiste de Newton, de sa vie et de son œuvre, écrit à la fin du XXe siècle un article sur la précision dans la mesure du temps intitulé *Making a world of precision: Newton and the Construction of Quantitative Physics*<sup>28</sup>. Cet article est paru 44 ans plus tard que l'article d'Alexandre Koyré que l'on a présenté dans la partie précédente. Westfall a conservé l'idée de Koyré de la relation intrinsèque entre la mathématisation de la Philosophie Naturelle et la précision dans les mesures, et en particulier celle du temps, mais le développement de son raisonnement est radicalement différent. Comme son titre l'indique, il tente d'apporter une réponse historique à la question de la construction de la physique quantitative.

Pour atteindre son objectif Westfall prend comme fil conducteur la mesure du temps et de sa précision depuis Galilée jusqu'à Newton. Westfall essaye de retracer l'histoire de la nouvelle Physique caractérisée par ses deux aspects intimement liés entre eux, le mathématique et le quantitatif. Il se demande comment la science du XVIIe siècle a créé une Physique quantitative sans disposer des instruments de mesure qu'on lui attribue aujourd'hui. Dans un premier temps, il établit brièvement le passage entre la Philosophie Naturelle aristotélicienne (ou qualitative) et la Philosophie Naturelle mathématique (ou quantitative). Il annonce ensuite l'objectif de son article : tracer l'histoire de la Philosophie Naturelle quantitative tout en prenant comme fil conducteur la mesure du temps, ou autrement dit la chute libre en 1 seconde d'un corps pesant lâché sans vitesse initiale. L'auteur réduit ainsi la question de la précision dans la mesure du temps lors d'une chute libre à celle de la mesure de l'accélération de la gravité  $g$ . Il suit chronologiquement les travaux de cette mesure chez les grands maîtres de la Physique,

---

<sup>28</sup> Westfall, R.S. (1990), « Making a world of precision: Newton and the Construction of Quantitative Physics », Durham, F. & Purrington, R.D. (eds.), *Some Truer Method. Reflexions on the Heritage of Newton*. New York: Columbia University Press, 59-87.

Galilée, Mersenne, Riccioli et Huygens pour arriver à Newton et à l'écriture de son ouvrage majeur *Les Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*.

Pour démontrer le grand saut intellectuel des savants du XVIIe siècle, Westfall compare deux courants philosophiques : la Philosophie Naturelle d'argumentation qualitative et la nouvelle Philosophie Naturelle d'argumentation mathématique. Il nous dit que la pensée aristotélicienne a dominé la pensée de la Philosophie Naturelle pendant un peu plus que deux mille ans. Il commence par nous présenter trois aspects du commentaire de Galilée sur le *Du ciel* d'Aristote. Il s'agit ici des écrits de Galilée présentés dans le premier tome de *Le Opere di Galileo Galilei, les Juvenilia*<sup>29</sup>. Selon l'auteur il s'agit d'un commentaire représentatif de la Philosophie Naturelle dite qualitative écrit juste avant l'émergence de la nouvelle Physique.

La première caractéristique du commentaire de Galilée mentionné par Westfall concerne la recherche constante d'autorité, l'autorité ultime étant la nature elle-même. Ce commentaire est un véritable effort d'explication philosophique de la nature. Il développe la question de l'éternité et de la perfection du monde. Selon Westfall les réponses possibles sont structurées en suivant soit la philosophie aristotélicienne, soit la théologie chrétienne. La deuxième caractéristique concerne le langage utilisé. Il est exclusivement verbal et ne comporte aucune trace de mathématiques. Il n'est pas question ici de mesures ou d'instruments mais l'objectif de ce texte est de mettre en lumière les différents concepts au service de l'argumentation philosophique. La troisième et dernière caractéristique soulignée par Westfall est l'aspect qualitatif. Le discours philosophique vise à révéler les qualités réelles de la nature pour la construction de son statut ontologique.

Par la suite et pour en finir avec le commentaire de Galilée, Westfall nous donne un exemple, selon lui très représentatif de la Philosophie Naturelle pré-mathématique. Cet exemple traite de la problématique de la limite de taille au sein d'une même espèce : « Chaque espèce a une limite telle que nul membre de cet espèce puisse être

---

<sup>29</sup> Galileo G. (1890), *Le Opere di Galileo Galilei*, Favaro A. (eds.), Firenze : edizione nazionale sotto gli auspicii di sua maestà il re d'Italia., Vol 1, 1-177.

plus grand.»<sup>30</sup>. Galilée suppose ici un cheval, aussi grand qu'un cheval peut l'être, tellement battu par son maître qu'il gonfle. En gonflant, le cheval a dépassé la limite qui l'identifie en tant que tel ; par conséquent peut-on ou non encore le considérer comme un cheval ? Si l'on considère que la maltraitance physique subie par le cheval est une corruption externe du cheval lui-même et non pas interne, le gonflement n'influence pas son statut de cheval. Pour rendre cet exemple un peu plus compréhensible on pourrait dire que pour identifier une chose nous avons prédéfini ses limites de taille. Si l'on trouve la même chose mais d'une taille supérieure à la limite prédéterminée, peut-on toujours considérer la chose comme telle ? Et pour répondre à cette question nous posons alors des critères : si la cause du dépassement de la limite est externe à la chose, la chose s'identifie à elle-même, mais si la cause du dépassement de la limite est interne à elle-même, il va falloir reconsidérer sa nature. Dans cet exemple l'argumentation d'identification d'une chose est de nature causale et son identification peut être traitée par la limite posée à l'une de ces caractéristiques, mais elle prend en compte la chose dans sa totalité en tant que chose, elle prend en compte sa nature même. Ceci est un exemple nous dit Westfall que nous ne risquons pas de rencontrer dans la Physique contemporaine.

Pour faire le passage entre les deux Philosophies Naturelles, Westfall prend un autre exemple du même auteur (Galilée), mais beaucoup plus tardif que le premier. Ce nouvel exemple semble être bien éloigné de l'argumentation qualitative du premier. Il s'agit ici de la nature de la glace qui se trouve dans l'ouvrage galiléen intitulé *Discours sur les choses qui flottent sur l'eau ou qui s'y déplacent* rédigé en 1612 à Florence. C'est un traité contenant une approche mathématiquement descriptive de la nature. On pensait parmi les aristotéliens que la glace était de l'eau condensée. Galilée répond que cette affirmation est un non sens, car si la glace était de l'eau condensée elle devrait se noyer dans l'eau et non pas flotter à sa surface comme le montrent les observations de la vie courante. Le même volume de glace, pour le même volume d'eau, a un poids spécifique moindre que celui de l'eau et c'est pour cela que la glace flotte sur l'eau. Cet argument nous dit Westfall peut nous convaincre et nous semble familier.

---

<sup>30</sup> Westfall, R.S. (1990), 62. Traduction personnelle de l'anglais: « every species has a limit such that no individual member of the species can be bigger. ».

Avec les deux exemples cités plus haut, l'auteur nous montre qu'un changement, une transformation a eu lieu dans la pensée scientifique galiléenne au cours de ses recherches. Ce que Westfall ne nous dit pas, c'est le comment et le pourquoi de cette transformation de la pensée galiléenne. Pourquoi Galilée a quitté sa manière philosophique de réfléchir et a adopté une vision quantitative. Pour Westfall comme pour Koyré, la précision dans la mesure du temps et le passage à une Philosophie Naturelle mathématique sont deux évènements interdépendants. Mais est-ce vraiment le cas ? Et si oui, de quelle manière est créée cette interdépendance ?

Westfall nous dit que les *Juvenilia* sont dans leur ensemble un commentaire représentatif de la Philosophie Naturelle d'argumentation qualitative. Mais ce qu'il ne nous dit pas en revanche c'est que dans les parties argumentatives Galilée utilise un nombre considérable de résultats d'observations astronomiques. Son argumentation n'est pas exclusivement théologico-philosophique. Un exemple typique est celui de la partie des *Juvenilia* : *Tractatio de Caelo, Quaestio Prima, An unum tantum sit caelum*<sup>31</sup>. Dans cette partie, afin de soutenir son hypothèse de la multiplicité des cieux, ou pour débattre l'idée de la sphère céleste, Galilée présente plusieurs *opinions*. Tout d'abord celle de Jean Chrysostome, ensuite celle des Égyptiens, des Chaldéens et autres astronomes (Ptolémée), en troisième position l'*opinion* d'Aristarche et Timocharis<sup>32</sup>, à la quatrième place l'*opinion* des tables alphonsines, celle de Georg Von Peurbach, de Regiomontanus etc. Il y fait quelques références théologiques mais il y a surtout une grande partie d'argumentation basée sur les observations astronomiques. Galilée nous invite dans ce texte à ne pas nous fier uniquement à nos sens, à ne pas voir le ciel comme une image unique qui se meut. Il nous demande de prendre en compte les observations astronomiques afin de construire notre vision du monde. De prendre en compte les mouvements réels et non pas les mouvements théoriques des planètes. On trouve déjà dans ce texte sa vision d'astronome-géomètre. Est-ce là un commentaire représentatif d'une argumentation qualitative ?

---

<sup>31</sup> Galileo G. (1890-1901), *Le Opere di Galileo Galilei*, Favaro A. (eds.), Firenze : edizione nazionale sotto gli auspicii di sua maestà il re d'Italia., Vol 1, 38-39.

<sup>32</sup> Les astronomes Αρίσταρχος ο Σάμιος et Τιμοχάρης ο Αλεξανδρεύς (IVe siècle avant notre ère.)

Pour mieux saisir la pensée galiléenne, sa manière de voir et de décrire la nature, Maurice Clavelin présente le personnage de Galilée comme suit :

«...(Galilée) doit d'abord être perçu comme un philosophe, ou, mieux encore comme ce géomètre et cet astronome qui, pénétré très tôt d'une ambition philosophique, s'attacha obstinément à remplacer la philosophie naturelle régnante par une philosophie naturelle accordée aux normes du géomètre et de l'astronome copernicien. »<sup>33</sup>

Galilée est un personnage aux facettes multiples et variées. Comme tout savant du XVIIe siècle, lui aussi est caractérisé par une curiosité qui ne se limite pas au sein d'une discipline. Il étudie, et il approfondit plusieurs façons d'être et de réfléchir. Ce mélange de qualités d'origines différentes fait que l'étude de l'œuvre des savants de cette époque, leur vision du monde, nous est si lointaine.

Mais revenons à Westfall. Dans l'objectif de souligner une tendance vers la géométrisation de la Nature, l'auteur cite deux extraits contemporains qui méritent d'être mentionnés ici : le premier, très célèbre, est celui de Galilée tiré de son ouvrage *L'Essayeur*, et le second de Kepler, tiré de son ouvrage *L'Harmonie du Monde* :

« La philosophie est écrite dans cet immense livre qui se tient toujours devant nos yeux, je veux dire l'Univers, et on ne peut le comprendre si l'on ne s'applique d'abord à en comprendre la langue et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit. Il est écrit dans la langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques, sans le moyen desquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot. »<sup>34</sup>

Galilée ici, pour remettre le passage dans son contexte, répond à ceux qui proclament que pour faire de la Philosophie il faut s'appuyer sur les théories des autorités, sur l'opinion d'un auteur célèbre, sans laquelle elle ne restera que discours stérile. Cette

---

<sup>33</sup> Clavelin M. (1996), *La philosophie naturelle de Galilée : Essai sur les origines et la formation de la mécanique classique*, Paris : Albin Michel, préface de la deuxième édition, I.

<sup>34</sup> Galileo G. (1980), *L'Essayeur de Galilée*, trad. Chauviré Chr., Paris : Les Belles Lettres, 141.

citation affirme l'arrivée de la nouvelle Philosophie Naturelle de manière très subtile. La seule autorité reconnue par Galilée est la Nature elle-même, mais la langue dans laquelle elle est écrite est non verbale, elle est mathématique. Or la création divine est mathématique. Pour Galilée si l'on veut comprendre l'œuvre de Dieu, il n'y a qu'un seul moyen : l'interprétation géométrique. Kepler partage la même idée :

« La Géométrie, faisant partie de l'esprit divin depuis des temps immémoriaux, depuis avant l'origine des choses étant Dieu lui-même (car que-ce qu'est dans Dieu qui n'est pas Dieu lui-même ?), a fourni à Dieu des modèles de création du monde et elle a été transmise à l'homme avec l'image de Dieu. La Géométrie n'a pas été reçue au dedans par les yeux. »<sup>35</sup>

Cet extrait porte la réflexion de la création divine encore plus loin que celle de Galilée. Il présente la Géométrie non-seulement comme un outil préexistant dans l'esprit divin mais il la présente comme étant Dieu elle-même. Ce n'est pas par l'observation de la nature que l'homme a créé la réflexion géométrique. Les formes géométriques (les lignes, les triangles, les cercles etc.) ne sont pas un résultat d'inspiration. Elles ne sont pas nées de l'observation des formes des choses naturelles, mais elles sont transmises par Dieu à l'homme directement. Puisque la Géométrie est Dieu, et l'homme est créé à l'image de Dieu, la géométrie lui est transmise lors de sa création. Dans les deux cas, nous dit Westfall, il ne s'agit pas d'un discours qui s'arrête à son statut de discours, mais d'un discours qui prend forme dans la cinématique des deux auteurs respectifs. L'idée de Westfall rejoint celle de l'interprétation littérale des textes symboliques et mythologiques. Puisque Dieu est géométrie, on ne peut comprendre son œuvre, communiquer avec lui en un sens, que par la pratique de la géométrie.

« Parmi une poignée de maîtres intellectuels proches du début du XVIIe siècle (ceux qui sont restés dans notre mémoire), une nouvelle perspective de la philosophie naturelle apparaît. Pour eux, subitement, les arguments quantitatifs ont commencé à paraître les

---

<sup>35</sup> Westfall, R.S. (1990), 63. Trad. pers. : « Geometry, being part of the divine mind from time immemorial, from before the origin of things being God himself (for what is in God that is not God himself?) has supplied God with the models for the creation of the world and has been transferred to man together with the image of God. Geometry was not received inside through the eyes. »

seuls solides. (...) Dans la génération d'avant Galilée et Kepler, Tycho Brahe a illustré cette nouvelle perspective à venir. Il n'y avait rien dans les observations de Tycho qui n'était techniquement impossible plusieurs siècles auparavant. Toutefois, c'est seulement à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle que l'on trouva que ce degré de précision quantitative méritait d'être poursuivi. (...) Le cœur même de la philosophie naturelle était la mécanique, la science du mouvement. La mécanique demandait la mesure d'une troisième dimension, celle du temps. La création du nouveau monde de précision était intimement liée à l'apprentissage efficace de la mesure du temps. »<sup>36</sup>

Dans ce passage Westfall nous donne des pistes de réflexion intéressantes, en nous faisant par exemple nous interroger sur la phrase « subitement, les arguments quantitatifs ont commencé à sembler les seuls solides ». Si tel est vraiment le cas, quels sont les enjeux qui ont permis ce changement radical de valeur dans l'argumentation de la pensée scientifique ? Un peu plus loin, l'auteur concrétise la période du grand changement par « c'est seulement à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle que l'on trouva que ce degré de précision quantitative méritait d'être poursuivi. ». C'est une phrase qui nécessite plus d'explications. On peut se demander quelles sont les raisons pour lesquelles une reconsidération de la précision dans les mesures a eu lieu ? Westfall ici par de grandes généralisations garde obscur le lien de relation entre mathématisation de la Philosophie Naturelle et émergence de la précision dans la mesure du temps. Pour lui cela va de soi. Dans quel domaine du savoir, dans quelle branche de la pensée scientifique « La création du nouveau monde de précision était intimement liée à l'apprentissage efficace de la mesure du temps. » ? Sans répondre à cette question, l'auteur à la fin de ce passage nous dit sans aucune explication ni justification, qu'à partir de ce moment (la fin du XVI<sup>e</sup>

---

<sup>36</sup> Westfall, R.S. (1990), 64-65. Trad. pers.: « Among a small handful of intellectual leaders (in effect, those whom we remember), near the beginning of the seventeenth century, a new outlook on natural philosophy appeared. For them, suddenly, quantitative arguments began to seem the only solid ones. (...) In the generation before Galileo and Kepler, Tycho Brahe illustrated the coming outlook. There was nothing in Tycho's observations that would have been technically impossible several centuries earlier. In fact, however, it was only at the end of the sixteenth century that anyone found that degree of quantitative precision worth pursuing. (...) The very heart of the natural philosophy was mechanics, the science of motion. Mechanics required the measurement of a third dimension, time. The creation of the new world of precision was intimately connected to the success of science in learning to measure time. »



siècle), nous entrons dans le monde de la précision dont l'existence dépend principalement de la mesure du temps.

Alexandre Koyré avait déjà soulevé ces points en 1966 dans son ouvrage intitulé *Études de l'histoire de la pensée scientifique* :

« La science moderne se trouve ainsi, à ses débuts, dans une situation plutôt étrange et paradoxale : elle choisit la précision comme principe ; elle affirme que le réel est géométrique par essence et soumis, par conséquent, à la détermination et à la mesure rigoureuses (*vice versa*, des mathématiciens comme Barrow et Newton voient dans la géométrie elle-même une science de la mesure) ; elle découvre et formule mathématiquement des lois qui lui permettent de déduire et de calculer la position et la vitesse d'un corps en chaque point de sa trajectoire et à chaque instant de son mouvement, et elle n'a aucun moyen de déterminer une durée, ni de mesurer une vitesse. Cependant, sans ces mesures, les lois de la nouvelle dynamique demeurent abstraites et vides. En vue de leur donner un contenu réel, il est indispensable de posséder les moyens de mesurer le temps (l'espace est facile à mesurer), c'est-à-dire des *organa chronou*, des *orologi*, comme Galilée les a appelés ; en d'autres termes : les horloges de précision. »<sup>37</sup>

Koyré dans la première phrase de cet extrait, en évoquant la « précision comme principe », nous parle de la précision dans la géométrisation des phénomènes naturels. La précision avec laquelle la nature est décrite. Sa définition de précision semble être celle de la notion de précision géométrique. Par la suite cette définition évolue (avec ses références à Barrow et Newton, qui eux voient dans la géométrie une science de la mesure). Avec Barrow et Newton nous sommes déjà dans la deuxième moitié du XVIIe siècle. Koyré nous dit ici, ainsi que Westfall dans l'article étudié, que sans une mesure précise du temps, les lois dynamiques mises en place par Newton dans sa théorie sont vides de sens. Les horloges de précision, selon les auteurs étudiés, sont indispensables pour la création de la théorie de la gravitation universelle. La naissance de la précision des mesures semble ainsi incontestablement se trouver dans ce qu'on appelle la

---

<sup>37</sup> Koyré, A. ([1966] 1973), *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris : Gallimard, 295-296.

construction de la science moderne<sup>38</sup>. Ceci se faisant de pair avec la géométrisation des phénomènes naturels. La précision des mesures et plus particulièrement celle du temps semble essentielle dans ce contexte pour donner un sens aux lois de la nouvelle physique mathématiquement formulées. Le besoin d'instruments de précision est exprimé, selon Koyré et Westfall, par les acteurs de la période étudiée et l'instrument de mesure du temps est bien identifié : l'horloge. La note de bas de page<sup>39</sup> liée à ce passage a attiré notre attention. Koyré dans cette note semble insister particulièrement sur le fait que d'un côté les horloges de précision sont les « sous-produits du développement scientifique » et que d'un autre côté les raisons du développement des horloges de précision se trouvent dans les principes mêmes du développement scientifique.<sup>40</sup> Un peu plus loin Koyré souligne un fait hors du commun selon lui :

« Il est assez étrange qu'ayant découvert l'isochronisme du pendule-base même de toute chronométrie moderne –Galilée, bien qu'il ait tenté de réaliser un chronomètre et même construire une horloge à pendule mécanique en tenant compte de cette découverte- ne l'utilisa jamais dans ses propres expériences. »<sup>41</sup>

Alors que la nouvelle science demande des mesures de précision et que le besoin d'instruments de précision s'est exprimé, Galilée n'utilise pas ses découvertes pour construire ses théories. Il a pourtant étudié les propriétés du pendule, trouvé l'idée d'un chronomètre et même réfléchi à l'application du pendule aux horloges pour améliorer leur précision. Contrairement à ce que croyait Koyré, les raisons d'une mesure précise du temps se distinguent-elles de la construction des théories? Si Koyré avait vu juste,

---

<sup>38</sup> La définition de la science moderne par Koyré est la science constituée le long du XVIIe et XVIIIème siècles.

<sup>39</sup> Koyré, A. ([1966] 1973), Note 1, 296.

<sup>40</sup> À ce point une parenthèse est nécessaire. Il est important de présenter le contexte dans lequel cette affirmation se présente. Elle est une réponse aux « préjugés baconiens et marxistes en faveur de la *praxis* et contre la *théorie* » qui mettent l'accent sur « les besoins pratiques ou des facteurs économiques sur le développement de la science ». Koyré luttait contre les historiens des sciences marxistes (Voir Duhem P. (2016), *La théorie physique. Son objet, sa structure*, Lyon : ENS Éditions Note 34, 30. (<http://books.openedition.org>)) Dans ce cas l'auteur attaque ouvertement le biologiste Lancelot Hobger et son ouvrage intitulé *Science for the Citizen*.

<sup>41</sup> Koyré, A. ([1966] 1973), 298-299.

pour quelles raisons les horloges de précision, occupent selon lui la place des « sous-produits du développement scientifique » ?

Pour une recherche approfondie de la réponse à la question de la précision dans la mesure du temps, nous allons tenter de donner une réponse aux deux questionnements soulevés plus haut dans cette thèse. Ces deux questions peuvent se fondre en une seule : Les enjeux favorables à l'émergence et au développement de la précision dans la mesure du temps trouvent-ils leurs origines au sein des théories scientifiques ou en dehors? Ceci est l'objectif majeur de cette thèse. Considérant la mesure du temps comme un facteur lié intrinsèquement à l'émergence de la précision dans le contexte de l'évolution de la pensée scientifique occidentale du XVIIe siècle, nous allons étudier la manière dont la précision dans la mesure du temps intervient dans la création, l'application et la confirmation de la théorie de la gravitation universelle de Newton.

À ce point de l'article, Westfall commence son voyage historique de Galilée à Newton. Il est vrai que lorsque l'on étudie la précision dans la mesure du temps de la Philosophie Naturelle du XVIIe siècle (en gardant en tête la théorie newtonienne), on se retrouve sur le même cheminement conceptuel. Chronologiquement on commence par le travail du mouvement uniformément accéléré de Galilée, on traverse les expériences de Marin Mersenne, celles de Giovanni Battista Riccioli, les expériences de Christian Huygens pour finalement arriver à la théorie gravitationnelle de Newton. Ceci sera le cheminement intellectuel que nous allons suivre également dans cette thèse, non pas par ordre chronologique mais par ordre de renvois newtoniens.

Westfall tente ici de répondre à cette question : comment les savants de cette époque mesuraient-ils le temps ? Galilée a établi les lois de la chute libre, de manière conceptuelle nous dit Westfall. Cette loi nous dit que lors d'un mouvement uniformément accéléré les espaces sont comme les carrés des temps. Afin de vérifier cette loi Galilée a utilisé des plans inclinés. Le mouvement de chute sur plans inclinés présentait l'avantage important de ralentir le mouvement. Comparé à la chute libre des corps graves, l'observation du mouvement s'en trouvait facilitée. L'instrument de mesure du temps utilisé par Galilée était la clepsydre, l'horloge à eau. Il comparait les quantités d'eau écoulées, qui représentaient le temps écoulé. Westfall nous dit que

puisque Galilée n'avait pas à sa disposition une horloge de précision, il s'est contenté de la mise en rapport entre le temps et l'espace afin de confirmer sa loi de chute. L'auteur insiste sur le fait que Galilée avait besoin de cette mesure, de la mesure précise du temps afin de pouvoir tester sa théorie.

Il faut savoir que pour Westfall, la priorité de Galilée, comme présentée dans cet article, était la mesure précise de l'accélération de la gravité. L'auteur nous dit que les savants du XVII<sup>e</sup> siècle cherchaient à déterminer le  $\frac{1}{2}g^{42}$ . Même si la conceptualisation de cette valeur était différente de la notre aujourd'hui, on peut considérer, nous dit Westfall, que cette recherche faisait partie des préoccupations des savants. Car déterminer la distance parcourue par un corps grave lors de sa chute libre sans vitesse initiale dans le temps d'une seconde équivaut effectivement à déterminer  $\frac{1}{2}g$ .

Galilée, n'étant pas satisfait de ses mesures avec la clepsydre d'eau, utilise comme instrument de mesure du temps son pouls pour mesurer une seconde de temps. Le résultat de mesure de la distance parcourue dans une seconde par Galilée est donné par Westfall : « un corps tombe un peu plus que sept pieds du repos dans une seconde, ce qui est seulement environ la moitié de la valeur que nous acceptons. »<sup>43</sup>. Si l'on prend la valeur de  $g$  typique d'aujourd'hui d'environ  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $\frac{1}{2}g$  est donc égal à  $4,90 \text{ m.s}^{-2}$ , la valeur trouvée par Galilée est ainsi d'environ  $2,5 \text{ m.s}^{-2}$ . Après avoir donné ce résultat, Westfall nous parle aussitôt du « garde-temps (time-keeper) » galiléen.

Galilée, nous dit l'auteur, inventeur du pendule, a créé un instrument de mesure du temps de grande précision. Malgré sa persistance à l'isochronisme du pendule indépendamment de son amplitude d'oscillation, qui reste pour nous un mystère dit Westfall, Galilée lors de sa proposition de solution du problème des longitudes décrit pour la première fois son garde-temps, ou comme il l'appelle, son *mesureur* du temps. Westfall prend le soin de présenter cet instrument. Cette présentation ne sera pas discutée ici, mais dans la dernière partie du Chapitre V de cette thèse. Pour en arriver

---

<sup>42</sup> La notation  $g$  est la terminologie moderne que nous adoptons ici en suivant Westfall pour caractériser l'accélération uniforme de la chute libre.

<sup>43</sup> Westfall, R.S. (1990), 66. Trad. pers.: « a body falls a bit more than seven feet from rest in one second, which is only about half the value we accept. »

aux expériences effectuées par Marin Mersenne (ou Père Mersenne), Westfall conclut en disant que « Galilée transmet à la science du dix-septième siècle le pendule et une mesure grossière et imparfaite de  $g$ . »<sup>44</sup>

Dans le même esprit, Westfall nous présente ensuite les expériences consécutives de Mersenne afin de mesurer  $g$ . (Ces expériences seront reprises dans le Chapitre VI de cette thèse.) La présentation de Westfall dévoile une progression dans la réflexion de Père Mersenne qui va de pair avec l'amélioration de ses expériences. Il a d'abord essayer de déterminer la longueur du pendule à secondes (pendule simple de  $T=2\text{sec}$ ) puis de mesurer  $g$ . « Il a continué ainsi à affirmer que dans une demie seconde un corps tombe de trois pieds du repos, et dans une seconde, de douze. La mesure, qui est environ 80 pour cent de notre valeur actuelle, représente une amélioration majeure par rapport à celle de Galilée. »<sup>45</sup>

En ce qui concerne Giovanni Battista Riccioli, Westfall nous dit, qu'emporté par son objectif de précision, il a essayé de déterminer la longueur du pendule à secondes. Il a crée un pendule qui battait le  $\frac{1}{6}$ ème de la seconde et avec l'aide d'une horloge humaine (une chorale entraînée à chanter au rythme du pendule), il a déterminé la distance parcourue par un corps en chute libre dans une seconde. Riccioli contrairement à Galilée et Mersenne, nous dit Westfall, n'était pas en train de mesurer  $g$ , car il était convaincu que les corps ne tombaient pas avec la même vitesse. Il a conclut ainsi que la chute d'un corps précis qui pèse huit *ounces* tombe de « quinze pieds (Romains) dans une seconde, un chiffre qui correspond bien à 10 pour cent près de notre valeur pour  $g$ . »<sup>46</sup> (Les expériences de Riccioli seront également reprises au Chapitre VI de cette thèse.)

Toujours dans une suite chronologique, après Riccioli, Westfall traite la question de la mesure de  $g$  chez Christiaan Huygens. Huygens est le savant qui a crée la première

---

<sup>44</sup> Ibid., 70. Trad. pers. « To seventeenth-century science Galileo bequeathed both the pendulum and a grossly imperfect measurement of  $g$ . »

<sup>45</sup> Ibid., 71-72. Trad. pers.: « Thus he continued to assert that in half a second a body falls three feet from rest, and in one second, twelve. The measurement, which is about 80 percent of our value, represents a major improvement on Galileo's. »

<sup>46</sup> Ibid., 72. Trad. pers.: « fifteen (Roman) feet in one second, a figure well within 10 percent of our value of  $g$ . »

Horloge de précision et ceci grâce à un principe simple : le mouvement oscillatoire du pendule n'est pas isochrone. Huygens, nous dit Westfall, cherche à déterminer les conditions dans lesquelles un tel isochronisme serait possible. Il a ainsi d'abord établi géométriquement la courbe dans laquelle l'isochronisme pendulaire devient possible : cette courbe est la cycloïde. Ce concept mathématique a trouvé son application dans les Horloges à pendule. De cette manière Huygens a pu déterminer la longueur du pendule à seconde et trouver la valeur de  $g$ . « Il a calculé ainsi que dans une seconde un corps grave parcourt une distance approximative partant du repos de 15 pieds (de Paris), 1 pouce, comme il l'exprime dans son *Horologium*, ou plus exactement, 15 pieds, 1.1207 pouce, le chiffre que l'on continue à accepter pour  $g$  en effet. »<sup>47</sup> (Le travail de Huygens sera discuté dans le Chapitre VI de cette thèse.)

Westfall aborde enfin le travail de Newton. Il le définit comme le produit de son temps, l'enfant de la Philosophie Naturelle mathématique absolument assimilée. Il est pour lui celui qui a élevé la tradition mathématique de son temps à un niveau supérieur, celui qui a établi à titre définitif le caractère moderne de la science. Dans cette partie Westfall change légèrement son approche. Il ne parle plus uniquement de la recherche de  $g$  mais également de l'usage du pendule dans l'œuvre de Newton, dans ses manuscrits de jeunesse jusqu'à la rédaction des *Principia*. Le lien que Newton fait entre le pendule simple et le pendule conique, des tentatives de la mesure du temps à l'usage du pendule, et les expériences du pendule pour la recherche de l'existence de l'éther. (Ces manuscrits seront discutés plus en détail dans le Chapitre III de cette thèse)

C'est ainsi que le voyage de la précision dans la mesure du temps de Westfall arrive à son terme. Et celui-ci de conclure :

« Les *Principia* de Newton sont apparus en 1687, presque un siècle, à deux ou trois années près, après la composition des notes de Galilée du *De cealo* que j'ai citées plus haut. Durant ce siècle, la pensée scientifique s'est déplacée d'un monde à un autre, et les caractéristiques essentielles de ce nouveau monde étaient les mathématiques et la

---

<sup>47</sup> Ibid., 73-74. Trad. pers.: « Thus he calculate that in one second a body falls from rest through approximately 15 (Parisian) feet, 1 inch, as he put in the *Horologium*, or more exactly, 15 feet, 1.1207 inches, in effect the figure we continue to accept for  $g$ . »

précision quantitative. La théorie n'était maintenant acceptable que si elle correspondait, non pas au texte d'Aristote, non pas aux écritures Saintes, non pas à des arguments plausibles, non pas à des qualités observées, mais à des quantités trouvées dans la nature. Pour l'essentiel sans les instruments élaborés que l'on suppose maintenant comme parties intégrales de l'entreprise scientifique, mais sans pour autant en être dépourvue de simples, la science a appris durant ce siècle à mesurer la nature. Il me semble qu'il n'existe pas d'autre changement aussi fondamental dans l'histoire de la pensée Occidentale. »<sup>48</sup>

Il est vrai qu'aujourd'hui quand il s'agit de la précision dans la mesure du temps on présuppose l'existence d'instruments de grande précision. Durant le XVIIe siècle il a fallu inventer et construire les instruments de la mesure du temps. Dans ce contexte on peut dire que l'invention d'un instrument de mesure du temps est en quelque sorte synonyme d' « *apprendre à mesurer le temps* ». Westfall expose dans cette conclusion un autre aspect de la précision : sont statut d'élément de validation d'une théorie. Cet aspect de la précision a fait son apparition durant le XVIIe siècle. Le problème de cette affirmation est qu'elle applique cette idée aux savants du XVIIe dans leur ensemble. Est-ce que la vérité de la théorie galiléenne ou newtonienne peut être jugée comme invalide au XVIIe siècle car elle ne correspond pas à un résultat de mesure ? Peut-on étudier la précision comme élément de validation d'une théorie de la même manière chez Galilée et chez Newton?

Westfall considère a priori que l'objectif des savants du XVIIe siècle, était la mesure de  $g$ . Il réduit la précision dans la mesure du temps à la mesure de l'accélération de la gravité. Ce faisant il superpose notre vision du monde à la vision du monde des savants du XVIIe siècle.

---

<sup>48</sup> Ibid., 84. Trad. pers.: « Newton's *Principia* appeared in 1687, only a couple of years less than a century after Galileo composed the notes on *De cealo* that I cited earlier. During that century, scientific thought had moved from one world into another, and the central characteristics of the new world were mathematics and quantitative precision. Theory was now acceptable only if it corresponded, not to the text of Aristotle, not to the word of Scripture, plausible arguments, not to observed qualities, but to the quantities found in nature. Largely without the elaborate instruments that we now assume as integral parts of the scientific enterprise, though not without one simple one, science had learned during the century to measure nature. It appears to me that there has not been a more fundamental change in the history of Western thought. »

La présentation critique de ces deux articles nous a permis de mieux définir le cadre de cette thèse. Tout d'abord, nous ne prétendons pas faire ici l'histoire de la pensée scientifique du XVIIe siècle dans son intégralité, ou même donner une réponse à la question du passage entre les deux Philosophies Naturelles. L'angle choisi pour notre sujet nous contraint de n'étudier que certains des acteurs clés nécessaires à notre objectif. Nous allons étudier l'œuvre de savants au cas par cas, dans leurs évolutions et non pas sous le prisme d'une pensée scientifique unique et homogène. Nous allons considérer que les préoccupations des savants du XVIIe siècle étaient bien différentes de celles des scientifiques d'aujourd'hui. Nous n'allons pas ainsi réduire la précision dans la mesure du temps uniquement à la détermination précise de  $g$ . Nous allons juger de la vérité ou de la fausseté des résultats présentés par les savants du XVIIe siècle en les replaçant dans leur contexte intellectuel tout en cherchant à comprendre leur rôle dans ce contexte. Par conséquent nous n'allons pas les comparer aux résultats de mesures contemporaines. Nous allons essayer d'éviter les *a priori* de la superposition de l'esprit du progrès technologique et de l'innovation liée à la notion de précision dans la mesure du temps lors de l'étude des œuvres de savants du XVIIe siècle. Au contraire nous allons considérer cette relation de la précision au progrès comme un élément à rechercher dans les œuvres de ces savants. Nous allons tout d'abord définir la notion de précision dans la mesure du temps sans la considérer *a priori* comme intrinsèquement liée à la mathématisation de la nature. Enfin nous étudierons le rôle de la précision dans la mesure du temps dans les trois branches de la pensée scientifique présentées dans l'introduction de cette thèse afin de déterminer son émergence.

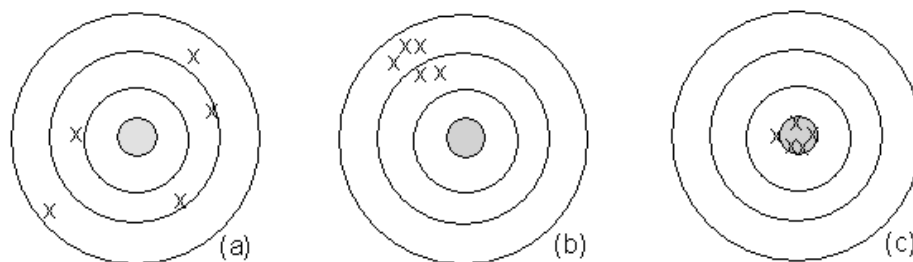
### 3. La notion de précision.

Dans les deux articles de Koyré et de Westfall, le terme précision est amplement utilisé sans être pour autant défini. Ce que l'on retrouve dans les deux cas est le lien entre la précision dans la mesure du temps et l'instrument utilisé dans cet objectif. Aujourd'hui nous ne pouvons pas nous permettre d'utiliser ce terme sans le définir, surtout qu'il existe une branche scientifique bien identifiée appelée la *Métrologie du temps* qui nous



impose d'en donner la définition. Dans le *Vocabulaire international de métrologie*<sup>49</sup>, le terme de « précision » appliqué à la mesure, qui existe toujours en langue anglaise, a disparu de la terminologie française au profit du terme de *fidélité*. La définition de ce terme dans le vocabulaire de la communauté des métrologues recouvre : « des conditions de répétabilité, des conditions de fidélité intermédiaire ou des conditions de reproductibilité »<sup>50</sup>. La fidélité d'une mesure, ou *measurement precision* en anglais, se distingue de ce que les métrologues appellent l'exactitude (*accuracy*) : « Le terme «fidélité de mesure» est quelquefois utilisé improprement pour désigner l'exactitude de mesure. »<sup>51</sup>

Un exemple souvent utilisé par cette communauté pour exprimer avec clarté la distinction entre les deux termes est celui du tir à l'arc. La grande précision (fidélité) de mesure est représentée par la répétabilité réussie, alors que l'exactitude est représentée par la grande proximité avec l'objectif visé, ou la valeur souhaitée.



(a) Inexact et imprécis (b) Inexact mais précis (c) Exact et précis

Fig. 1.1 Ce schéma est une version simplifiée des schémas utilisés souvent par les métrologues lors de leurs conférences au sujet de la différence entre exactitude et précision. (ex. Vig. R.J. (Novembre 2011), *Accurate Clocks and their Applications*. Princeton)<sup>52</sup>

Ceci nous montre le besoin qu'a ressenti cette communauté d'une définition des termes utilisés en son sein.

<sup>49</sup> BIPM (2008), *Vocabulaire international de métrologie-Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*

<sup>50</sup> Ibid. 22.

<sup>51</sup> Ibid.

<sup>52</sup> [princetonacm.acm.org/downloads/AccurateClocksVig.pdf](http://princetonacm.acm.org/downloads/AccurateClocksVig.pdf)

Si l'on s'intéresse maintenant aux dictionnaires historiques de la langue française et anglaise nous trouvons que l'usage du terme précision en lien avec l'instrument qui l'accompagne est très tardive, et que la distinction entre précision et exactitude n'existe pas. Dans le *Dictionnaire historique de la langue française*<sup>53</sup> on trouve la notice suivante :

« Le nom correspondant PRÉCISION n.f. est directement repris (v. 1380) au dérivé latin impérial *praecisio*, *-onis* « action de couper, de retrancher », d'où concrètement « ce qui est coupé, rognure » et spécialement en rhétorique, « réticence ». Introduit en français avec le sens concret d' « action de ronger », le mot s'est spécialisé assez tard, d'abord en philosophie pour l'acte abstrait de retrancher, de circonscrire par la pensée (1512). ■ Ce sens étymologique a disparu après le XVII<sup>e</sup> s., tandis que le mot commençait à désigner, en relation avec l'adjectif *précis*, la qualité de ce qui est déterminé avec exactitude dans l'espace et dans le temps (1606), puis les fait précis, les détails (1682, surtout au pluriel), la qualité de la personne qui s'exprime avec netteté, rigueur (1688), la qualité de ce qui est représenté dans l'esprit avec netteté (1690). □ Par la suite, le mot désigne la qualité de ce qui fonctionne avec exactitude (1794), notamment dans *instrument de précision* (1855) surtout appliqué à la mesure, et celle d'une personne qui fait les gestes exactement appropriés à une situation, une action (1801). ■ *Précision* a pour dérivé PRÉCISIONNISTE n. et adj. (1941) « personne chargé d'un travail de précision ». ■ IMPRECISION n. f., qui semble être en usage avant imprécis (dans une thèse de Condillac, en 1841), tant en sciences que dans l'usage générale, est devenu usuel.»

Le terme précision a donc fait son entrée sur la scène du langage français par la porte de la philosophie pour servir les besoins de la réflexion. L'exactitude n'est pas seulement liée à la précision mais elle a même sa définition propre vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. Au milieu du XIX<sup>e</sup>, le lien entre précision et instruments de précision s'établit définitivement. Dans le *Oxford English Dictionary*<sup>54</sup> on trouve le même développement

---

<sup>53</sup> Rey, A. ([1992] 2006), Vol. 2, 1840.

<sup>54</sup> Dictionary, O. E. ([2003] 2017). *Oxford English Dictionary. The definitive record of the English language*, Oxford University Press, ([http://www.oed.com/viewdictionaryentry/Entry/149667? print](http://www.oed.com/viewdictionaryentry/Entry/149667?print)) : « precision, *n.* and *adj.* (...) Etymology: < Middle French, French *précision* action of cutting off, trimming (c1380), exactitude (1606) and its etymon classical Latin *praecisiōn-*, *praecisiō* act of cutting off, act of breaking off (in speech), truncated end, in post- classical Latin also separation, schism (late 4th cent.), excommunication (13th

du terme, pour les mêmes besoins, et durant les mêmes périodes historiques. Ces deux dictionnaires ne doivent pas être considérés comme des références exactes pour décrire l'évolution de la précision au cours des siècles mais plutôt pour en donner une idée générale.

Si la précision dans la mesure est si tardivement liée aux instruments, de quel type de précision parle-t-on alors quand on se réfère à la genèse de la précision dans la mesure du temps dans la nouvelle Philosophie naturelle du XVIIe siècle (comme la définition l'envisage en 1606) ? Dans le dictionnaire de Trévoux on trouve une définition très intéressante de la précision :

« PRÉCISION n.f. Justesse, exactitude. (...) La Géométrie est la seule science qui va jusqu'à la dernière *précision*, jusqu'à l'exacte justesse non seulement sensible, mais à toute celle qui est imaginable. »<sup>55</sup>

La notion de précision est intrinsèquement liée à la notion d'exactitude. Elle exprime ainsi une grande justesse mais cette grande précision n'existe que dans le domaine géométrique. Seule la géométrie peut revendiquer une grande précision. Cette précision n'est pas seulement la plus grande, elle caractérise aussi le sensible et l'intelligible. Elle peut être exprimée au sein du réel et au sein de l'imaginaire. Elle n'est nullement liée à une mesure et encore moins à un instrument de mesure. Cette définition prend une

---

cent. in British sources), precision, exactitude (from 13th cent. in British sources) < *praecis-* , past participial stem of *praecidere* PRECIDE v. + *-iō* -ION suffix<sup>1</sup>. Compare Spanish *precisión* (1507 or earlier), Italian *precisione* (a1642).

A. n. 1. Chiefly *Philos.* The action or an act of separating or cutting off, *esp.* the mental separation of one fact or idea from another; abstraction, definition. 1529 (...)

(...) 2.a. An instance of exactness or preciseness; a particular, nicety, minute detail, *esp.* of language. 1695 (...)

(...) b. The fact, condition, or quality of being precise; exactness, accuracy. 1698

(...) c. The degree of refinement in a measurement, calculation, or specification, *esp.* as represented by the number of digits given. Contrasted with *accuracy* (the closeness of the measurement, etc., to the correct value). 1842 (...)

d. *Statistics.* The reproducibility or reliability of a measurement or numerical result; a quantity expressing this. 1876 (...)

<sup>55</sup> Dictionnaire, D. T. (1738-1742), *Dictionnaire universel françois et latin*, vulgairement appelé «Dictionnaire de Trévoux», Nancy : Édition Lorraine, 1050.

forme encore plus claire dans le dictionnaire de Chambers<sup>56</sup>. Chambers ne prend même pas la peine de donner une définition du terme *précision* et nous renvoie directement au terme d'*abstraction*. L'abstraction selon Chambers est l'opération de l'esprit visant à séparer des choses qui sont unies ou coexistent ensemble. La faculté de faire abstraction peut être employée de trois manières différentes. Premièrement quand l'intellect considère une partie d'une chose, comme si cette partie était distincte de la chose elle-même. Deuxièmement quand l'esprit ne prend en compte la manière d'être d'une chose sans considérer la chose elle-même, ou quand l'esprit étudie un attribut ou une qualité ou même plusieurs qui subsistent à la même substance sans prendre en considération la substance même. Cette deuxième manière de faire abstraction est communément utilisée par la science de la géométrie, souligne Chambers. Et troisièmement c'est la capacité de l'esprit à formuler une idée abstraite, nommée, qui devient une représentation générale de tout objet du même genre. L'exemple donné par l'auteur est la blancheur, du lait, de la neige etc. une qualité partagée entre des choses réelles ou imaginaires. Cette troisième manière d'abstraire est inspirée par la notion de l'abstraction développée dans l'œuvre du philosophe britannique John Locke. Dans son ouvrage majeure *Essai sur l'entendement humain* au Livre II chapitres XI, XXIII et au Livre III Chapitre VIII<sup>57</sup>, il développe son idée d'abstraction et en vient à dire que ce processus intellectuel est un trait caractéristique de l'être humain qui le distingue de toute forme de vie animale.

Si l'on regarde à présent un dictionnaire spécialisé dans les arts et les sciences du début du XVIIIe siècle, qui porte le titre *Lexicon Technicum*<sup>58</sup>, on a la surprise de constater que les termes précision (après le terme *Precipitation* suit le terme *Predial*) et exactitude (le terme *Exaction* suit directement le terme *Exaereticis*) ne sont pas référencés. Les

---

<sup>56</sup> Chambers, E. (1680 (ca.)-1740), *Cyclopædia, or, An universal dictionary of arts and sciences*, London: James and John Knapton...Andrew Johnson, and Thomas Osborn, 861. « PRECISION, PRAECISIO, in the Schools, the same with Abstraction. See ABSTRACTION. »

<sup>57</sup> Locke J. (1735), *Essai philosophique concernant l'entendement humain*, traduit par M. Coste, Amsterdam : Chez Pierre Mortier.

<sup>58</sup> Harris J. (1704), *Lexicon technicum or an universal English dictionary of arts and sciences : explaining not only the terms of art but the arts themselves*, London : Printed for Dan. Brown, Tim. Goodwin (...) and Francis Coggan.

domaines de connaissance pour lesquels le terme de précision a un sens sont uniquement au cours du XVII<sup>e</sup> siècle ceux de la philosophie et la géométrie.

Tout en prenant en compte la grande évolution de la notion de précision au sein de la pensée nous allons tenter de donner notre propre définition de la précision dans la mesure du temps, définition qui nous suivra tout au long de cette thèse. La précision dans le contexte étudié est synonyme d'exactitude.

Dans cette étude, la précision dans la mesure du temps est la quête infinie de la subdivision du temps, en parties toujours plus subtiles, par un instrument de mesure du temps.

Il nous faut alors définir ce qu'est un instrument de mesure du temps. C'est un phénomène terrestre, régulier et perpétuel, naturel ou artificiel, qui représente de par son mouvement la définition astronomique des subdivisions du temps. Dans notre cas il s'agit du pendule à secondes communément utilisé par les savants. Le pendule à secondes est une notion également évolutive. Chez Galilée le pendule à secondes est considéré comme le pendule simple de longueur telle que  $T=1\text{sec}$ , alors que chez Huygens et Newton le pendule à secondes est considéré comme le pendule simple de longueur (variable selon la latitude du lieu) telle que  $T= 2\text{sec}$ .

Nous redonnons ici la définition astronomique d'une seconde du temps. C'est la 86400<sup>e</sup> partie d'une journée solaire moyenne.<sup>59</sup>

Nous avons jusqu'ici concrétisé les objectifs et la méthodologie à suivre dans cette thèse, nous avons défini la notion de précision dans la mesure du temps comme nous l'entendons dans cette étude, nous allons par la suite définir le temps. En effet, avant de pouvoir étudier la mesure du temps, il faut d'abord savoir ce que l'on veut mesurer. La notion de temps qui nous intéresse principalement ici est celle présentée dans les *Principia* de Newton. Cependant, le temps, avant d'obtenir son statut de notion absolue, a connu son propre cheminement évolutif tout au long du XVII<sup>e</sup> siècle. Son rôle n'a pas

---

<sup>59</sup> La durée moyenne du jour solaire est 24 heures. Cette durée est considérée immuable contrairement à la durée du jour solaire vrai qui est variable au cours de l'année.

toujours été le même au sein des différentes théories. À l'image de la Philosophie, vue comme la construction d'un système de pensée, la Philosophie Naturelle mathématisée, vue comme un système de description du monde, donne une place décisive à la notion de temps. Cette place n'est pas néanmoins immuable, elle dépend de la construction du système dans lequel elle se trouve. Le temps ainsi ne joue pas le même rôle et n'a pas le même statut dans la théorie galiléenne et dans la théorie newtonienne. Dans le dessein de démontrer cette évolution nous allons étudier la notion du temps chez Galilée puis chez Barrow, comme une étape préparatoire pour arriver à la notion du temps absolu chez Newton. Nous explorerons enfin le temps des *Principia*, et sa critique par la traductrice de l'ouvrage en français : Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil, plus communément connue sous le nom de Marquise du Châtelet.

## II. LE TEMPS ET SA MESURE

### 1. Les géomètres Philosophes de la nature.

Aujourd'hui l'usage du langage mathématique dans le cadre d'activités scientifiques est une pratique courante. Les recherches d'histoire des sciences occidentales nous confirment que cette pratique n'était néanmoins pas toujours privilégiée comme le langage adéquat pour les sciences et plus particulièrement pour la science de la Nature. Les recherches historiques, menées dans un effort de compréhension du développement mathématique comme langage adapté à l'appréhension des phénomènes naturels, ont montré que le langage utilisé depuis Aristote jusqu'à la fin du XVI<sup>e</sup> début XVII<sup>e</sup> siècle, était le langage verbal. Cependant l'étude de cette période historique est une opération particulièrement complexe. Les facteurs qui ont permis un changement dans la réflexion savante sont multiples. Il est vrai que l'affirmation du passage d'un langage argumentatif à un autre n'est pas évidente. L'entrée du langage géométrique dans le monde physique se trouve de manière quasi systématique plongée dans un cadre philosophique et théologique d'importance variable selon le savant. Cette période historique qu'on appelle communément *Révolution Scientifique* est la période principalement étudiée dans cette thèse. Le terme de *Révolution Scientifique*, longuement critiqué par les historiens des sciences, représente ici chronologiquement une partie de ce que Gérard Jorland<sup>60</sup> appelle la première Révolution Scientifique, qui s'étend de Copernic à Newton. Il faut bien préciser une *partie*, car les auteurs étudiés ici ne représentent qu'une quantité très restreinte des acteurs du XVII<sup>e</sup> siècle (mais tous d'une importance majeure : Galileo Galilei, Christian Huygens et Isaac Newton). À chaque fois que le terme sera utilisé dans cette thèse il se rapportera non seulement à la période historique étudiée mais aussi à plusieurs idées qui l'accompagnent. D'abord l'idée qu'« il faut toujours penser une révolution non pas en termes de mutation soudaine, (...), mais de transformation progressive, non pas dans l'instant mais dans la durée ».<sup>61</sup> De cette sorte « Si toute révolution est une transformation, toute transformation conserve toujours

---

<sup>60</sup> Jorland, G. (2002), « La notion de révolution scientifique aujourd'hui. », in *Revue européenne des sciences sociales. European Journal of Social Sciences*, (XL-124), 131-146.

<sup>61</sup> *Ibid.*, 133.

quelque chose, elle laisse toujours quelque chose invariant. »<sup>62</sup> L'auteur exprime ainsi un grand bouleversement extrêmement complexe, caractérisé par une richesse intellectuelle exemplaire.

Lors de cette période la pratique mathématique fait son apparition au sein de la Physique comme un outil capable de décrire des phénomènes naturels terrestres. Lorsqu'on utilise ici le terme « mathématique », en se référant au commencement de la période historique étudiée, on fait appel à tout ce qui est d'ordre géométrique. La géométrie à ses débuts n'était pas considérée comme une branche des mathématiques mais comme les mathématiques elles-mêmes.<sup>63</sup> Par extension lorsque l'on considère l'application des mathématiques en Physique nous parlons de la géométrisation de la Nature comme l'a définie Michel Blay :

« (...) il faut comprendre une démarche dont l'objet consiste à reconstruire les phénomènes du mouvement à l'intérieur du domaine de l'intelligibilité géométrique, de telle sorte que ces phénomènes se trouvent soumis à l'emprise de la raison géométrique et puissent être l'objet d'une mise en forme déductive sur le modèle des *Éléments* d'Euclide. »<sup>64</sup>

L'usage tardif de la géométrie au sein de la Physique ou, pour utiliser un terme plus approprié à la période historique étudiée, au sein de la Philosophie Naturelle, n'exclut pas son usage privilégié depuis l'Antiquité au sein de l'Astronomie. On trouve dans les dictionnaires du début du XVIII<sup>e</sup> siècle à la définition des mathématiques<sup>65</sup> non seulement la géométrie mais aussi toutes les branches des mathématiques considérées comme telles. Néanmoins la géométrie et l'arithmétique sont toujours considérées comme le fondement de toute mathématique. Platon les appelle « les deux ailes du Mathématicien ». Il y a ainsi ce qu'on appelle la Mathématique simple, abstraite et la

---

<sup>62</sup> Ibid.

<sup>63</sup> Rey, A. ([1992] 2006). « Géométrie », in *Dictionnaire historique de la langue française*, Paris : Paris : Le Robert, Vol. 2, 1580. « Le mot s'est utilisé au XVII<sup>e</sup> s. au sens extensif de mathématique ».

<sup>64</sup> Blay M. (2010), *Penser avec l'infini : la fécondité d'une notion mathématique et philosophique, de Giordano Bruno aux Lumières*, Paris : éditions Vuibert, 37.

<sup>65</sup> Dictionnaire, D. T. (1738-1742), *Dictionnaire universel françois et latin*, Nancy: édition lorraine.



Mathématique mixte. Dans la Mathématique simple on trouve la géométrie et l'arithmétique, dans la mixte on se réfère à l'Astronomie, l'optique etc. Une autre division possible des Mathématiques à cette époque peut être faite entre Mathématiques spéculatives et pratiques. Le nom de l'auteur associé à l'introduction et à la défense de cette pratique au sein de la Philosophie Naturelle est celui de l'Astronome, Physicien, Philosophe et Ingénieur Galileo Galilei. Tout au long du XVIIe siècle cette pratique s'établit progressivement comme règle. Cette instauration ne se fait pas cependant de manière anodine. Le langage mathématique fût longuement critiqué, notamment parce que c'est un langage qui ne révèle pas les relations causales entre les phénomènes et ne dit rien sur la nature des choses. Ce langage traite, par définition, de la nature comme un ensemble de quantités mesurables, de grandeurs. Il exclut ainsi tout ce qui est qualitatif, tout ce qui ne succombe pas à une mesure précise. « Le qualitatif peut être ordonné, mais non mesuré. Le « plus ou moins » que nous utilisons en référence à la qualité nous permet de construire une échelle, mais non d'appliquer une mesure exacte. »<sup>66</sup>. Cette critique trouve ses origines dans la Physique d'Aristote,<sup>67</sup> mais l'idée existe déjà sous une autre forme au sein de l'œuvre platonicienne. Si l'on parle autant de ces deux grands philosophes de l'antiquité grecque dans une période pourtant si éloignée comme le XVIIe siècle, c'est parce que l'influence de certaines de leurs œuvres, (comme la Physique d'Aristote et le Timée de Platon), dans le cadre des interprétations propres des savants d'alors, est considérable tout au long de ce siècle. Les différentes interprétations des idées principales de ces deux grands philosophes jouent un rôle important dans la nouvelle manière de voir la Philosophie Naturelle à travers le prisme géométrique. Cette nouvelle manière de voir les phénomènes naturels a préparé le terrain à l'unification entre les Arts (la mécanique en tant que travail artisanal) et le travail spéculatif de la Nature et du Cosmos dans son ensemble. Pour mieux appréhender la difficulté des savants à accepter la géométrie comme outil de la Philosophie Naturelle, nous allons présenter ici de manière très succincte le rôle des mathématiques dans la philosophie des deux auteurs cités. Ce rôle a divisé d'une certaine manière les savants, avec une intensité variable, tout au long du XVIIIe siècle.

---

<sup>66</sup> Koyré, A. ([1966] 1973), *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris : Gallimard, Note 3, 291.

<sup>67</sup> Αριστοτέλης (2008), *Φυσικά Γ'-Δ'*, εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια Μπετσάκος Β., Θεσσαλονίκη : εκδόσεις Ζήτρος & Αριστοτέλης (2010), *Φυσικά Α'-Β'*, εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια Μπετσάκος Β., Θεσσαλονίκη : εκδόσεις Ζήτρος.

L'analyse de ces œuvres antiques ne consiste pas à éclaircir le style ou le genre mathématique des auteurs mais à étudier le rôle de la géométrie dans le contexte philosophique de chacun. On verra ici comment la géométrie fait le lien entre l'homme et le divin, entre le monde sensible et le monde intelligible dans le cas de Platon<sup>68</sup> et les problématiques soulevées dans l'usage de la géométrie comme outil d'interprétation de la nature dans l'œuvre d'Aristote. Cette étude va nous permettre d'entrer dans la problématique de l'introduction de la géométrie comme outil de la Philosophie du XVIIe siècle. Elle va nous donner également la clé du comment et du pourquoi de la genèse de la précision dans la mesure du temps au sein des communautés savantes de cette période. Finalement elle nous révélera surtout son usage au sein des théories physiques. Cette étape est nécessaire et nous permettra de passer par la suite à l'étude de son rôle au sein de la théorie de la gravitation universelle de Newton. La géométrisation de la Nature a permis progressivement à la précision dans la mesure du temps de jouer le rôle d'élément de support des théories physiques. Ce rôle acquiert progressivement une importance telle que les communautés scientifiques d'aujourd'hui se réfèrent à la précision des mesures comme éléments de validation, de confirmation ou non des théories scientifiques<sup>69</sup>.

Avant d'en arriver là, un long voyage intellectuel a accompagné la géométrie comme langage et comme outil. Un débat a eu lieu tout au long du XVIIe siècle concernant l'adéquation de l'abstraction géométrique comme moyen de description des phénomènes naturels. Avec le recul nécessaire on peut dire qu'il était schématiquement

---

<sup>68</sup> Nous allons particulièrement insister sur le rôle des mathématiques dans le *Timée* de Platon dans la quatrième partie du Chapitre V de cette thèse.

<sup>69</sup> Un exemple qui confirme l'importance de la précision dans la mesure du temps comme élément de confirmation d'une théorie aujourd'hui est le projet PHARAO. Ce projet « fournirait un moyen unique de chercher dans un référentiel d'éclipse une éventuelle variation de la constante  $G$ . La comparaison entre l'horloge spatiale et celles disponibles sur Terre, qui fonctionnent sur des transitions différentes et qui dépendent de façons diverses des constantes fondamentales, permettrait, pendant l'intervalle de temps de l'éclipse, de découvrir si le potentiel gravitationnel et la vitesse des stations terrestres sont toujours constants, si le principe d'équivalence comporte une faille. (...) Il se trouve que des découvertes de la recherche spatiale ainsi que de récents développements de mesures mettant en jeu la phase atomique, telles les horloges atomiques à fontaine, pourraient apporter une réfutation, ou une confirmation, indiscutable sur ce phénomène aberrant venant démentir la relativité. » Bagdoo, R. LA MISSION PHARAO/ACES ET L'EFFET ALLAIS.

centré entre la théorie aristotélicienne, la théorie platonicienne et leurs interprétations respectives. La place de la géométrie dans chacune de ces deux théories détermine son importance et son rôle. Dans l'œuvre d'Aristote on trouve trois formes de connaissance, la Philosophie première, la Physique (ou la philosophie seconde) et les Mathématiques. La Philosophie première traite l'être comme tel ( $\delta\upsilon\ \kappa\alpha\theta'\ \epsilon\alpha\upsilon\tau\acute{o}$ ), et tout ce qui est lié de manière essentielle à cet être. La Physique et les Mathématiques traitent le même objet, les êtres sensibles (ou les corps naturels), mais elles le traitent de manière différente, chose qui ne permet pas de partager le même statut épistémologique. Le mathématicien applique principalement l'abstraction intellectuelle à la matière et au mouvement (-changement) de ces objets, et les traite comme des états statiques inaltérés. Il fait en outre abstraction des êtres en tant qu'êtres, ou corps naturels et il n'étudie que leur figure. Les corps matériels dans ce cas sont étudiés intellectuellement et de manière abstraite. Le mathématicien étudie la ligne droite en tant que telle sans se soucier du corps auquel elle s'attache. Le physicien de son côté étudie les corps naturels matériels, comme des êtres dans des états dynamiques, des êtres qui se meuvent et qui se transforment. Quant à la figure, à la forme, pour le Philosophe Naturel il s'agit de la représentation des limites de tels êtres. Aristote voit dans l'approche mathématique le monde des Idées de Platon qui est nettement séparé du monde sensible. Pour Platon la géométrie exprime une réalité autre que celle du monde sensible. Pour Aristote, les objets géométriques sont des objets abstraits, « dans les deux cas, entre les mathématiques et la réalité physique il y a un abîme »<sup>70</sup>. Pour la Physique aristotélicienne le seul Principe au-delà de tout Principe est la Nature, et la Nature est étudiée par la Physique dans sa totalité (sans aucune partie qui se suffit à elle-même), elle est considérée comme un ensemble des qualités. Il existe pourtant des mathématiques appliquées nous dit Aristote :

« C'est bien là encore ce que prouvent les parties des mathématiques qui se rapprochent le plus de la physique ; l'optique, l'harmonie et l'astronomie. En un certain sens, elles sont tout à fait l'inverse de la géométrie. Ainsi, tandis que la géométrie étudie la ligne qui est bien physique, mais qu'elle ne l'étudie pas telle que cette ligne est dans la nature ; l'optique, au contraire, étudie la ligne mathématique, non pas en tant que mathématique,

---

<sup>70</sup> Koyré A. ([1948] 1971), « Du monde de l' « à-peu-près » à l'univers de la précision. », in *Études d'histoire de la pensée philosophique*, Paris : Gallimard, Collection Tel, 342.

mais en tant qu'elle joue un rôle dans la réalité naturelle. »<sup>71</sup>

Alors que la géométrie est indifférente à la ligne comme limite de l'être, l'optique, l'harmonie et l'astronomie (en tant que géométries appliquées dirait-on aujourd'hui) étudient quant à elles les propriétés géométriques des lignes qui appartiennent exclusivement aux corps naturels. Cette distinction entre approche physique et approche mathématique soutenue par Aristote domine la pensée pré-mathématique de la Physique. Une critique ardue s'exerce sans cesse à l'encontre de l'approche mathématique par les aristotéliens. Une belle illustration de l'intensité de cette critique aux débuts du XVIIe siècle est le passage suivant. Cette lettre envoyée par Galilée au Grand Duke de Toscane en Septembre 1611, dans laquelle il évoque sa controverse avec Lodovico delle Colombe sur les propriétés du froid:

« Je m'attends à une terrible attaque de l'un de mes adversaires, et je l'entends presque déjà crier à mes oreilles que c'est une chose de traiter des questions physiquement et une autre d'en traiter mathématiquement, et que les géomètres devraient s'en tenir à leurs fantaisies et ne pas se mêler des questions philosophiques, où les conclusions sont différentes des questions mathématiques. Comme si la vérité pouvait n'être pas une, comme si de nos jours la géométrie était un obstacle à l'acquisition de la vraie philosophie, comme s'il était impossible d'être géomètre autant que philosophe, et qu'on dut inférer comme une conséquence nécessaire que si quelqu'un connaît la géométrie il ne peut connaître la physique et ne peut raisonner physiquement des questions physiques ! ».<sup>72</sup>

---

<sup>71</sup> Aristote (1861), *Physique*, traduit par Saint-Hilaire B., Paris : Librairie Philosophique de Ladgrange, Livre II, Chapitre II, 194a. : « Δηλοῖ δὲ καὶ τὰ φυσικώτερα τῶν μαθημάτων, οἷον ὀπτική καὶ ἁρμονική καὶ ἀστρολογία· ἀνάπαλιν γὰρ τρόπον τιν' ἔχουσιν τῇ γεωμετρίας. Ἡ μὲν γὰρ γεωμετρία περὶ γραμμῆς φυσικῆς σκοπεῖ, ἀλλ' οὐχ ἢ φυσική, ἢ δ' ὀπτική μαθηματικὴν μὲν γραμμὴν, ἀλλ' οὐχ ἢ μαθηματικὴ ἀλλ' ἢ φυσική. »

<sup>72</sup> Galileo G. (1960), *Discourse on bodies in water*, translated by Salsbury Th., Introduction and Notes by Drake St., Urbana: University of Illinois Press. Introduction XIX, concernant la lettre de 09/1611 au Grand Duke, Stillman Drake nous dit qu'elle n'a jamais été publiée mais que le manuscrit est très bien conservé. Trad. pers. basée sur celle de Stillman Drake:

« Here I expect a terrible rebuke from one of my adversaries, and I can almost hear him shouting in my ears that it is one thing to deal with matters physically, and quite another to do so mathematically, and that geometers should stick to their fantasies and not get entangled in philosophical matters as if truth could ever be more than one; as if

Dans cette contestation Galilée soulève un point primordial : la revendication de la vérité. La vérité est unique, mais les méthodes pour l'atteindre peuvent être multiples. Il semblait jusqu'ici que la seule manière d'accéder à la vérité était la réflexion philosophique. Les philosophes, nous dit Galilée, caractérisent les géomètres qui étudient les phénomènes naturels comme des *fantaisistes*, un terme qui n'appartient nullement à la vérité philosophique. La pensée géométrique est vue par les philosophes comme une abstraction de l'esprit incapable de vérité quelconque. L'objectif de la Philosophie Naturelle est ainsi la vérité. La question de la vérité dans ce contexte est assez complexe. Elle est dans un premier temps purement philosophique, mais nous ne pouvons pas la traiter comme telle sans prendre un compte son aspect théologique. L'esprit chrétien domine la réflexion philosophique du XVIIe siècle. Et puis, selon Galilée, elle est aussi géométrique. Pour mieux comprendre cette contestation galiléenne, nous allons essayer de nous rapprocher des définitions des termes majeurs utilisés par Galilée. Le dictionnaire de Trévoux, bien que rédigé plusieurs années après les théories galiléennes, peut être considéré comme une source fiable concernant les définitions des termes utilisés dans celles-ci. En effet, le noyau de ses définitions est copié du *Dictionnaire* d'Antoine Furetière<sup>73</sup>, pur produit du XVIIe siècle. Pour commencer, quel est le sens du mot vérité utilisé ici ?

« VERITE, f.f. Certitude d'une chose qui est toujours la même, être pèrmanent, & qui ne change point. *veritas, verum*. On appelle Dieu l'éternelle *vérité*. Il est la *vérité* éternelle. Les Théologiens donnent ce nom à Dieu par excellence. »<sup>74</sup>

Le terme vérité est ainsi intrinsèquement lié à Dieu. La vérité est Dieu. Quand Galilée nous parle de la vérité, qui est une, il nous parle de la connaissance de Dieu. Il supporte l'idée que la géométrie peut être une méthode ou un chemin non contradictoire de la philosophie, qu'elle-même peut nous mener à Dieu. Il ne voit pas pourquoi le seul

---

geometry up to our time had prejudiced the acquisition of true philosophy; as if it were impossible to be a geometer as well as a philosopher and we must infer as a necessary consequence that anyone who knows geometry cannot know physics, and cannot reason about and deal with physical matters physically ! »

<sup>73</sup> Furetière A. (1690), *Dictionnaire Universel contenant generalement tous les mots françois, tant vieux que modernes, & les termes de toutes les sciences et des arts*, La Haye : Leers A. et R.

<sup>74</sup> Dictionnaire, D. T. (1738-1742).

raisonnement privilégié à la connaissance de Dieu devrait être la Philosophie. On peut donner raison à Galilée. Aujourd'hui l'idée de plusieurs méthodes démonstratives d'acquisition de la vérité (ou même des vérités), qui n'est probablement plus de l'ordre du divin, ne pose plus aucun problème. Mais qu'en est-il pour ses contemporains ? Pourquoi semblent-ils tant irrités avec cette idée ? La réponse sera donnée par la suite des définitions :

« PHILOSOPHIE, f.f. Étude de la Nature & de la Morale, fondée sur le raisonnement. »<sup>75</sup> L'étude de la Nature est effectivement réservée à la Philosophie par définition, il semble difficile d'attribuer la moindre petite place à la géométrie.

« PHILOSOPHER, v.n. Raisonner, réfléchir ; vaquer à la Philosophie, à la recherche des causes de la Nature, à la connaissance de Dieu & de soi-même. »<sup>76</sup> La recherche de la vérité, comme acquisition de la connaissance de la seule et unique vérité, qui est Dieu, est absolument et exclusivement de l'ordre du philosophe par définition. Mais qu'en est-il alors de la Géométrie ?

« GÉOMETRIE, f.f. Science qui enseigne à mesurer la superficie, ou la matière en toutes ses dimensions, longueur, largeur & hauteur. *Géométria*. Ce mot signifie à la lettre, la mesure de la terre. »<sup>77</sup>

Comment Galilée peut-il oser dans cet environnement revendiquer que la Géométrie puisse contribuer à la recherche de la vérité ? Comment « mesurer » peut dévoiler une vérité quelconque ? Trévoux tente la mise en paix entre l'idée galiléenne et tout ce qui est purement philosophique par définition. Lors de sa définition du terme « mathématiquement » il nous montre une relation autre entre géométrie et vérité :

« MATHÉMATIQUEMENT, ADV. D'une manière certaine & géométrique. *Mathematicé, geometricé*. Les vérités de l'Évangile ne se peuvent démontrer *mathématiquement* ; mais elles sont fondées sur des démonstrations morales, qui tiennent l'esprit dans un aussi

---

<sup>75</sup> Dictionnaire, D. T. (1738-1742)

<sup>76</sup> Ibid.

<sup>77</sup> Ibid.

grand repos, que les démonstrations mathématiques pourroient faire. On ne peut prouver mathématiquement qu'il y ait une ville de Rome ; cependant on en est aussi assuré qu'on l'est des vérités mathématiques. »<sup>78</sup>

Les points communs présentés ici par Trévoux entre Philosopher et faire de la Géométrie sont de l'ordre du démonstratif. Dans les deux cas, la démonstration est la manière de faire. Mais attention, ce n'est pas pour autant que les deux démonstrations ont la même valeur aux yeux de la vérité divine (ou des vérités théologiques). Elles ne sont pas du même genre. Il n'y a que les démonstrations morales qui, par définition, sont philosophiques et donc ont accès à la vérité. Si l'on cherche un point qui peut lier les deux démonstrations, pourtant de statut radicalement différent, c'est l'effet produit sur l'esprit. Les deux méthodes démonstratives, philosophiques et mathématiques, sont capables d'amener l'esprit dans un état de grand repos. Mais ce n'est pas pour autant que l'on peut revendiquer que la démonstration géométrique nous dise la moindre chose sur la vérité. Il n'est pas question de confondre certitude mathématique et vérité comme certitude d'une chose éternelle. Peut-être que Galilée voit ici justement dans cette notion de vérité, la certitude mathématique comme complémentaire à la démonstration philosophique afin d'accéder à la vérité. Mais si tel est le cas, cela veut dire que Galilée ne croit pas qu'il y est de certitude dans les démonstrations philosophiques, il met en doute tout l'édifice de la réflexion philosophique.

Si la *Certitude* comme définie par Trévoux est une *Vérité assurée*, la définition de la vérité elle-même devient problématique. Cela nous fait dire que la *Vérité* est la *Vérité assurée* d'une chose éternelle. Nous avons certes rajouté le terme « assurée » qui suppose un processus de confirmation, dans notre cas la démonstration philosophique. La certitude nous dit Trévoux à la suite de sa définition est « proprement une qualité des jugements de notre esprit ; c'est l'adhésion de notre esprit à la proposition que nous affirmons ; c'est la force avec laquelle nous y adhérons. »<sup>79</sup>. C'est comme si Galilée nous demandait « de passer du côté obscur de la force », du côté mathématique, si l'on considère le côté clair la réflexion philosophique. La revendication de la vérité divine par les géomètres était un fait condamnable par l'église catholique. Si la voie par laquelle l'œuvre divine se

---

<sup>78</sup> Ibid.

<sup>79</sup> Ibid.

dévoile dans toute sa splendeur est la voie géométrique, quelle est la place de l'église dans cette affaire ? C'est elle qui a revendiqué et établi en premier le lien entre Dieu et ses créations. Il est ainsi interdit de revendiquer la vérité divine aux moyens des géomètres. L'église catholique ne permet aux géomètres de parler des résultats démonstratifs qu'au nom de l'hypothèse et non pas au nom de la vérité. La revendication de Galilée était ainsi difficile à accepter.

« Même s'il est vrai, (... que Galilée) n'a jamais prétendu que la nature était écrite en caractères mathématiques mais que c'était la philosophie naturelle qui parlait ce langage, de sorte qu'elle ne peut nous renseigner sur la nature que pour ses objets qui peuvent être exprimés en termes de triangles, cercles et autres figures géométriques, il n'empêche que cette position épistémologique, destinée à étendre le champ de la science mathématique, a elle aussi une portée ontologique (...). Elle conduit en effet à la distinction entre qualités premières et qualités secondes, c'est-à-dire ces propriétés de la nature qui ne dépendent pas de nos sens, comme la forme, la taille, l'état de mouvement ou de repos, contrairement à celles qui en dépendent comme la couleur, la chaleur, l'odeur. On notera que le programme galiléen de quantifier les qualités, par conséquent de transformer la physique qualitative aristotélicienne en physique quantitative, ne s'est pas arrêté aux qualités premières qu'il énumérait : après la forme et le mouvement, la couleur, la chaleur, et toutes les autres qualités secondes sont devenues l'objet de la physique puis de la chimie. Mais même ce simple partage, tel que l'effectue Galilée, est ontologique. Autrement dit, décider que n'est scientifique que ce qui est mathématisable relève d'un principe doublement ontologique: d'une part, parce que les mathématiques opèrent un feuilletage de l'être; d'autre part, parce que la distinction entre qualités premières et qualités secondes constitue un critère de discrimination entre la nature en soi et la nature pour nous. Le mathématisable n'est donc pas seulement épistémologique, il est bien aussi ontologique puisqu'il met en présence de la nature telle qu'elle est en elle-même. »<sup>80</sup>

Dans ce cadre de revendication de la vérité divine par les géomètres (dans le XVIIe siècle il s'agit de la vérité divine universelle et non plus de la vérité philosophique universelle,) le temps mathématisé et mathématisable a vu son émergence. Mais ce n'est pas pour

---

<sup>80</sup> Jorland G. (2002), 135-136.



autant qu'il est resté identique tout au long du XVIIe siècle au sein des théories scientifiques. Le temps mathématisé, qui revendique lui aussi une place parmi les vérités divines, a subi une transformation. Cette transformation lui a été dictée par les priorités des savants, et le modèle du monde qu'ils visualisaient. Nous allons par la suite étudier de près cette transformation. Nous allons commencer avec la mathématisation du temps pour finir avec sa divinisation.

## 2. Galileo Galilei, le temps comme *paramètre* de descript

L'apparition du temps mathématisé au service de la description des phénomènes naturels trouve sa place dans l'œuvre galiléenne. La notion du temps chez Galilée, à notre avis, est cependant source de plusieurs confusions. On a tendance à parler du temps chez Galilée comme si le temps était la variable  $t$  connue de tous, celle qui figure dans toutes les équations de la physique. Ici, nous allons démontrer que la variable  $t$  héritée de Newton n'est pas de même nature physique que le  $T$  utilisé par Galilée. Mais alors qu'entendons-nous par « *temps* » dans l'œuvre de Galilée ? Tout d'abord ce  $T$  n'est pas une variable, et encore moins un paramètre. Le temps chez Galilée n'a pas de fonction. On pourrait l'appeler en toute précaution « *paramètre* » de description. L'intérêt premier de Galilée était l'étude du mouvement. Le problème majeur de son époque était l'engendrement du mouvement. Galilée, pour donner une réponse à ce problème, introduit le temps comme un continuum ayant pour représentation spatiale une ligne droite. En introduisant le temps il fait un choix théorique dans le but de mathématiser, ou plutôt de géométriser le mouvement. Comme nous dit Maurice Clavelin :

« (...) passant du stade de la description à celui de l'explication, le mouvement se trouve soumis à des lois quantitativement exploitables, capables donc d'assurer la prévision et du même coup l'emprise de la raison sur la nature (...) Erigé en phénomène autonome, le mouvement devient en fait un objet de raison, au même titre que les objets mathématiques, doté comme eux d'une définition génétique, comme eux susceptible d'une investigation méthodique dans ses propriétés fondamentales. »<sup>81</sup>

---

<sup>81</sup> Clavelin M. (1996), *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris : Albin Michel, 279

La géométrie euclidienne pour Galilée représente beaucoup plus qu'un simple modèle d'organisation du savoir, elle est le seul moyen par lequel la Nature peut être comprise. La géométrie est le moyen par lequel l'humain peut lire le grand livre de la Nature. La fameuse phrase de Galilée « ...*L'Univers...est écrit en langue mathématique*<sup>82</sup> » témoigne de notre propos.

En ce qui concerne la mesure du temps, la confusion continue. Il n'est pas question chez Galilée de mesure du temps, mais de mesure du mouvement. Le mouvement est mesuré par rapport à un autre mouvement régulier. Parlant des temps égaux, Galilée essaie de représenter un mouvement régulier par rapport auquel tout autre mouvement peut être comparé et prouvé - régulier ou irrégulier, accéléré, uniforme etc. Et pourtant nous lisons toujours des phrases comme celle ci:

« Le choix du temps comme variable de la loi dynamique (chez Galilée) représente une innovation conceptuelle très importante à une époque où la mesure exacte du temps ne faisait pas partie des préoccupations des savants ni d'ailleurs, comme les historiens nous l'assurent, de la société. »<sup>83</sup>

Le problème de ce type de présentation de la présence du temps dans l'œuvre de Galilée est qu'il fait croire au lecteur que l'intérêt primordial de Galilée était la mesure exacte du temps, à contre courant de son époque, ce dont on peut douter. Ce qui préoccupait plutôt Galilée comme tous ses contemporains était le mouvement, comme nous l'avons mentionné plus haut. Le temps étant toujours secondaire. En lisant la troisième journée des *Discours concernant deux sciences nouvelles* sur la partie du mouvement des graves, un lecteur attentif peut constater par lui-même qu'il ne s'agit pas de la mesure du temps mais de celle du mouvement. Et ainsi, que la préoccupation première de Galilée n'était point celle du temps ; mais bien celle du mouvement. Il y a effectivement une innovation, avec l'introduction du temps, mais ce temps galiléen diffère largement de ce que Newton appelle temps. La vraie innovation galiléenne est d'avoir réussi à engendrer le mouvement. Ne pas faire la distinction entre le temps comme variable et le temps

---

<sup>82</sup> Avec le terme mathématique Galilée désigne la géométrie puisque il utilise les figures géométriques.

<sup>83</sup> Paty, M. (2001). Réflexions sur le concept de temps. *Revista de filosofía*, (25), 15.

galiléen, c'est commettre une erreur historique fatale : celle de l'anachronisme. Quand on parle d'histoire des sciences, il faut faire la distinction entre les théories établies à certaines périodes et les cadres historiques distincts. Sinon les termes comme celui du temps dans notre cas se chargent de significations qui ne sont pas les leurs.

Avant Galilée, tout traitement d'expérience se faisait par analogie suivant la tradition aristotélicienne. Cette tradition voulait que l'espace soit privilégié par rapport au temps. Si les distances s'expriment en unités, les durées, elles, restent abstraites et les unités utilisées (l'année, le mois, le jour) ne sont pas adaptées à une observation physique de l'étude du mouvement dans les phénomènes terrestres. Aristote était présent dans les esprits et Lucrèce l'accompagnait: « on voit qu'il n'y a pas de temps sans mouvement ni changement. »<sup>84</sup> « Le temps n'existe pas non plus par lui-même: c'est la durée des choses qui nous donne le sentiment de ce qui est passé, de ce qui se fait encore, de ce qui se fera ensuite; et il faut avouer que personne ne peut concevoir le temps à part, et isolé du mouvement et du repos des corps. »<sup>85</sup>

Dans le *Discours concernant deux sciences nouvelles*, comme son nom l'indique, il est question, pour Galilée, d'établir deux nouvelles sciences. Celle de la mécanique (de la statique) et celle du mouvement (et de la *dynamique*). Dans la troisième journée du *Discours* il s'agit de celle du mouvement. La question du mouvement est très ancienne. L'engendrement du mouvement dans l'œuvre de Galilée devient une nouveauté remarquable. Nous allons voir comment se fait l'introduction de la notion du temps accompagnée par sa représentation respective dans l'œuvre galiléenne. Cette troisième journée se divise en trois parties : a) à l'étude du mouvement régulier ou uniforme, b) au mouvement naturellement accéléré, c) au mouvement violent ou de projection. Avant même que la première partie de cette troisième partie ne commence, Galilée fait déjà référence aux temps égaux.

---

<sup>84</sup> Aristote (1996), *La Physique*, traduction par Carteron H., Paris : Belles Lettres, IV, 218b 33 – 219a 1.

<sup>85</sup> Lucrèce (1899), *La nature des choses*, traduction par Lefèvre A., I, 459-460.

« Nul en effet, que je sache, n'a démontré que les espaces parcourus en des temps égaux par un mobile partant du repos ont entre eux même rapport que les nombres impairs successifs à partir de l'unité. »<sup>86</sup>

Nous voyons bien que, dans cet énoncé, il n'est pas question du « temps » en soi, mais de « temps égaux ». Cela veut dire que, pour Galilée il y a une notion de temps multiple, de plusieurs « durées égales ». Ce choix de termes utilisés au sujet du temps démontre la différence entre le temps galiléen et le temps newtonien. Galilée n'a pas besoin de la définition d'un temps absolu mais de durées relatives identiques. Ces temps égaux, on les retrouve ensuite à plusieurs reprises. D'abord lors de la première définition du mouvement uniforme. Plus loin dans l'avertissement, il nous donne un élément de plus :

« : il peut en effet advenir que pendant des temps égaux déterminés un mobile parcourt... »<sup>87</sup>

Ces temps égaux, sont déterminés par le physicien. Ils ne sont pas choisis librement par la nature mais ils peuvent être déterminés par le savant. Cette détermination de durées égales ici est entièrement arbitraire. L'objectif est l'usage des proportions afin d'établir des relations entre les quantités étudiées. Ainsi Galilée poursuit sa réflexion dans l'Axiome I : « Au cours d'un même mouvement uniforme, l'espace franchi pendant un temps plus long est supérieur à l'espace franchi pendant un temps plus bref »<sup>88</sup>. Les temps ainsi peuvent être plus longs ou plus courts. Pour un lecteur contemporain, il est clair que Galilée ne nous parle plus du temps mais des durées différentes pendant lesquelles s'effectue le mouvement. Nous ne pouvons pas avoir des temps longs ou des temps courts mais nous pouvons facilement envisager de courtes ou longues durées. Cet aspect du « temps » galiléen est présent régulièrement dans son œuvre. Dans l'énoncé de l'Axiome III une notion très intéressante s'ajoute, celle de l'Intervalle<sup>89</sup>. La signification première du terme « intervalle » est liée à l'espace pour décrire la distance d'un lieu à un autre, puis il est utilisé également pour le temps. Il peut signifier une

---

<sup>86</sup> Galilei G. (1995), *Discours concernant deux sciences nouvelles*, traduction Clavelin M., Paris : PUF, 125.

<sup>87</sup> Ibid, p126.

<sup>88</sup> Ibid.

<sup>89</sup> Ibid.

durée temporelle ou une période de temps qui sert de séparation entre deux faits. On voit que Galilée, par sa formulation selon la traduction de Clavelin, est à la recherche d'un type de périodicité. Une division temporelle en parties égales peut faire allusion à un mouvement périodique comme celui du pendule. Ici les temps égaux se font remplacer par *les mêmes intervalles de temps*.

#### « Théorème I – Proposition I

Si un mobile animé d'un mouvement uniforme parcourt, avec une même vitesse, deux distances, les temps des mouvements seront entre eux comme les distances parcourues. »<sup>90</sup>

On voit ici que les temps, toujours au pluriel, sont liés à des mouvements. À ce point une traduction légèrement différente mais qui renforce notre propos est celle de Pierre Souffrin : « Si un mobile animé d'un mouvement uniforme parcourt deux espaces avec la même /*velocitas*/, les durées des mouvements seront entre elles comme les espaces parcourus »<sup>91</sup> Le choix du traducteur confirme notre hypothèse. Galilée ne nous parle pas du temps mais des durées du mouvement. Et s'il nous parle de temps, ce temps - ou ces temps - sont liés aux mouvements. « Ce que nous comprendrons aisément en réfléchissant sur l'étroite affinité entre le temps et le mouvement :... »<sup>92</sup> Les temps ne sont pas indépendants du mouvement, mais au contraire sont les temps des mouvements. Il y a une sorte d'appartenance : à chaque mouvement, son temps. Ce qui signifie bien que le mouvement ne se passe pas dans le temps, comme c'est le cas pour le temps absolu, mais que chaque mouvement possède un temps qui lui est propre. Parce qu'il y a mouvement il y a temps et non le contraire. Et non seulement, les temps sont liés à des mouvements mais ils sont aussi comme les distances. Une comparaison fort intéressante entre temps et espace est réalisée. Le « temps » galiléen est là mais à l'image de l'espace euclidien. La preuve arrive à la suite de la démonstration de ce théorème. Quand on regarde la représentation du temps, ou plutôt des temps du mouvement dans ce cas-là, cette ressemblance à la représentation spatiale nous saute aux yeux !

---

<sup>90</sup> Ibid

<sup>91</sup> Souffrin P. (2012), *Ecrits d'histoire des sciences*, Paris : Les Belles Lettres, 178, note 27.

<sup>92</sup>Ibid., 131.

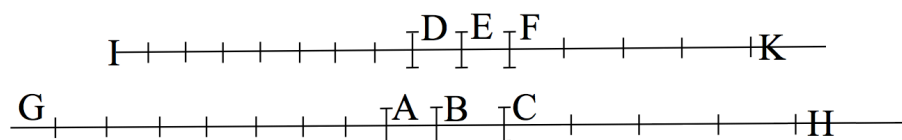


Fig. 2.1. Cette figure est une reproduction fidèle de celle qui illustre dans la traduction française du *Discours galiléen*<sup>93</sup>.

*AB* et *BC* sont les distances parcourues, *DE* le temps du mouvement le long de *AB*, et *EF* le temps du mouvement le long de *BC*. Il y a un lien de proportionnalité entre les temps et les distances dans le mouvement uniforme. Mais on voit bien que le temps *DE* est plus petit que le temps *EF*. Ce qui est logique quand on réfléchit par rapport au mouvement et aux distances parcourues, mais pas quand on réfléchit directement par rapport au temps. Une réflexion basée sur le temps (absolu) donnerait plutôt tel mouvement se passe dans tant de temps. Ici nous avons un temps de mouvement d'une longueur proportionnelle à la distance parcourue qui lui correspond. Le temps au sens absolu n'a pas lieu d'être dans la pensée galiléenne. Il dépend du mouvement et est proportionnel à la distance parcourue. Un temps est toujours un temps de mouvement. Ici la remarque que nous avons énoncée plus tôt sur le fait que les temps galiléens sont plutôt des durées prend tout son sens. En ce qui concerne sa représentation, il est inutile de dire que c'est une représentation spatiale, le temps est à l'image de l'espace. Une ligne droite divisée en plusieurs parties plus grandes et plus petites, proportionnelles aux distances parcourues.

Plus loin Galilée établit une autre relation intéressante entre le temps et la vitesse. Mais sur ce point, il faut faire très attention parce qu'encore une fois, ce que nous appelons vitesse aujourd'hui n'a pas le même sens chez Galilée. La vitesse à l'époque de Galilée était liée à la distance parcourue par le corps, elle est vue par le prisme du mouvement et non par celui du temps. Des informations intéressantes sur le sujet peuvent être tirées de l'ouvrage de Pierre Souffrin, *Écrits d'Histoire des sciences* :

---

<sup>93</sup> Ibid. 127.

« L'analyse critique des textes disponibles fait apparaître une tradition de la cinématique théorique s'étendant de la Physique d'Aristote à la période contemporaine des disciples de Galilée, dans laquelle « *velocitas* » sans autre qualification désigne la conception holistique de la mesure du mouvement. Dans cette tradition préclassique, « *velocitas* » reçoit deux acceptions, qui correspondent à la comparaison de mouvements soit sur des durées égales, soit sur des parcours égaux. L'acception représentée par l'expression « les vitesses sont entre elles comme les espaces parcourus en des temps égaux » est largement dominante... »<sup>94</sup>

« L'analyse quantitative du mouvement a précédé les premières conceptions théoriques de vitesse instantanée »<sup>95</sup>

Par le terme *vitesse instantanée*, P. Souffrin entend la définition de la vitesse comme une grandeur ou mesure du mouvement dans l'instant et il appellera *vitesse holistique* toute conception relative à un mouvement considéré sur une durée. Dans le cas de Galilée pouvons-nous parler de vitesse holistique ou de vitesse instantanée ? Pour l'instant, nous n'avons rencontré que des temps comme durées et non pas des temps comme instants. Puisque la notion d'instant est éclipsée, nous ne trouvons pas de raison de parler de vitesse instantanée. Selon Pierre Souffrin dans le premier théorème de la troisième journée la notion de vitesse n'a pas d'autre fonction que la dénomination du mouvement uniforme.<sup>96</sup> Pour éclaircir encore notre propos nous allons continuer notre étude avec la deuxième partie de la troisième journée sur le mouvement naturellement accéléré, où il est question de la chute des graves.

« je dis qu'est également ou uniformément accéléré ce mouvement qui, partant du repos, s'ajoute à lui-même en des temps égaux des moments (*momenta*) égaux de vitesse. »<sup>97</sup>

Il est question ici pour la première fois d'une référence à des *moments égaux* de vitesse. Galilée ne nous parle toujours pas de moments ou instants dans le temps mais encore et toujours de temps égaux, et de moments égaux de vitesse.

---

<sup>94</sup> Ibid., 157.

<sup>95</sup> Ibid., 159.

<sup>96</sup> Ibid., 178.

<sup>97</sup> Galilei G. (1995), 131.

« SARG. Si j'imagine un corps grave tombant à partir du repos, c'est à dire de l'absence de toute vitesse, puis, alors qu'il se meut, augmentant sa vitesse proportionnellement au temps ; si j'imagine, par exemple, qu'en huit battements de pouls il acquiert huit degrés de vitesse, dont quatre après le quatrième battement, deux après la deuxième, et un après le premier, - ne s'ensuit-il pas, puisque le temps est divisible à l'infini, qu'en diminuant toujours la vitesse dans le même rapport, il n'y aura pas de degré de vitesse si petit, ou encore de degré de lenteur si grand, par lequel ne soit passé le mobile après être parti de l'infinie lenteur, c'est à dire du repos ? »<sup>98</sup>

La vitesse pour Galilée est proportionnelle au temps. La théorie euclidienne des proportions est celle principalement utilisée par Galilée. L'utilisation de cette théorie implique un langage particulier. La définition des termes impliqués dans cette théorie nous semble nécessaire pour appréhender la totalité de cet essai. Dans ce cadre « mesurer » veut dire mettre en rapport et « dans un temps donné » signifie « les temps de deux mouvements mis en rapport dans la comparaison sont égaux ». De son côté, « la vitesse est comme telle grandeur » signifie « les espaces parcourus en des temps égaux sont entre eux comme telles grandeurs sont entre elles » ou « les temps de parcours d'une même distance sont entre eux inversement comme telles grandeurs sont entre elles ».<sup>99</sup>

On voit, dans le passage mis en référence ci-dessus, que la périodicité choisie par l'auteur est celle du pouls. Mais nous savons bien qu'il n'y a pas de vrai isochronisme entre les battements. Nous savons aussi que les battements de la même personne peuvent différer selon la situation, ou, que la durée entre deux battements de deux personnes différentes ne sera pas la même non plus. Il y a une relativité dans la mesure de la durée qui implique une grande inexactitude scientifique. Mais tenons-nous au fait que Galilée cherche un mouvement périodique. Comme nous l'avons vu plus haut, Galilée nous parle de moments de vitesse et de degrés de vitesse. Il est obligé de se poser la question de la division de la vitesse puisqu'il a adopté un point de vue holistique sur celle-ci. Cette question de division est intrinsèquement liée au paradoxe de Zénon d'Elée et à l'infini. Pour engendrer le mouvement, il est nécessaire de se débarrasser de la

---

<sup>98</sup> Ibid.

<sup>99</sup> Souffrin P. (2012), 175-176.



question de l'infini. Une démonstration de cette entreprise est celle de la chute des graves. La géométrisation de ce mouvement repose la question de l'infini. Il paraissait naturel que, pour calculer l'augmentation de la vitesse d'un mobile, il fallût utiliser l'espace comme variable, et non pas le temps. Cette tradition fut visiblement conservée par Galilée, mais elle fut aussi grandement améliorée pour arriver à ce que nous appelons « *la physique mathématique* ». Comment cela s'est-il produit?

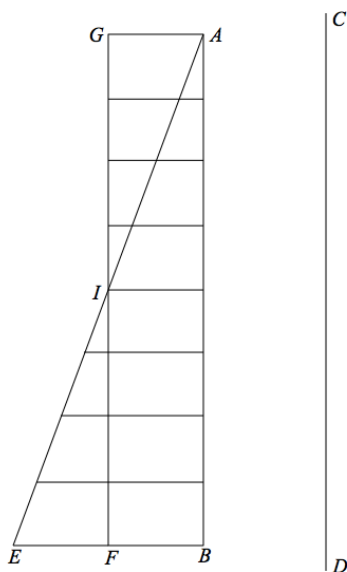


Fig. 2.2. Cette figure est une reproduction fidèle de celle qui illustre dans la traduction française du *Discours galiléen*<sup>100</sup>.

#### Théorème I — Proposition I

« Le temps pendant lequel un espace donné est franchi par un mobile, partant du repos, avec un mouvement uniformément accéléré, est égal au temps pendant lequel le même espace serait franchi par le même mobile avec un mouvement uniforme, dont le degré de vitesse serait la moitié du plus grand et dernier degré de vitesse atteint au cours du précédent mouvement uniformément accéléré.

Représentons par la ligne AB le temps pendant lequel un mobile, partant du repos en C, franchira d'un mouvement uniformément accéléré l'espace CD; on représentera le plus grand et dernier des degrés de la vitesse accrue dans les instants du temps AB par la ligne EB, formant avec AB un angle quelconque ; menons AE : toutes les lignes parallèles à BE, tirées des différents points de la ligne AB, représenteront les degrés de vitesse

<sup>100</sup> Galilei G. (1995), 140.

croissants après 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. Comme d'autre part à tous les instants, pris un à un, de l'intervalle de temps AB correspondent tous les points, pris un à un, de la ligne AB, et comme les parallèles menées à partir de ces points et comprises dans le triangle AEB représentent les degrés croissants de la vitesse grandissante, tandis que de leur côté les parallèles contenues dans le parallélogramme représentent autant de degrés de la vitesse non croissante, mais égale, il est clair qu'autant de moments de vitesse seront consumés dans le mouvement accéléré d'après les parallèles croissantes du triangle AEB, que dans le mouvement uniforme d'après les parallèles du parallélogramme GB : en effet, ceux des moments qui font défaut dans la première moitié du mouvement accéléré (c'est-à-dire ceux qui sont représentés par les parallèles du triangle AGI) sont compensés par les moments que représentent les parallèles du triangle IEF. Il est donc manifeste que des distances égales seront parcourues en un même temps par deux mobiles dont l'un, partant du repos, se meut d'un mouvement uniformément accéléré, et l'autre d'un mouvement uniforme que caractérise un moment de vitesse égal à la moitié du plus grand moment de vitesse atteint par le premier. »<sup>101</sup>

Dans ce passage de la troisième journée Galilée traite de l'accélération. On voit ici un usage du temps qui nous semble familier. Quelque chose qui frappe pourtant est la représentation du temps et son fonctionnement à l'intérieur de sa théorie. Dans l'analyse de ce passage notre objet est toujours le temps et non pas la vitesse. On va attirer l'attention du lecteur sur le début du théorème. Galilée écrit bien « le temps » et non pas « les temps » ou « l'intervalle du temps » ou « le temps du mouvement ». Pourtant il ne faut pas confondre « le temps » qui est écrit ici avec le temps absolu. Son contexte même nous dévoile qu'il est toujours question de durée déterminée. Il ne faut pas oublier que le temps dont il est question dans le texte est représenté par un segment

---

<sup>101</sup> Ibid., 139- 140.

$AB$  qui a un début et une fin, divisé à l'image de l'espace pour participer à une démonstration géométrique. Il n'est nullement absolu, et est mesuré. Plus loin, il est question de « *degrés de la vitesse accrue dans les instants du temps  $AB$*  ». Si l'on interprète cette phrase avec nos outils de connaissance contemporains et sans prendre en compte le contexte, on peut facilement conclure que Galilée parle des instants du temps au sens habituel du terme. Encore une fois il faut faire très attention à ce que Galilée entend par instant. Le segment  $AB$  est divisé en huit petits segments égaux qui représentent les temps égaux dont Galilée nous a parlé plus haut, le moment de vitesse est alors, comme un élément externe défini par cette partition de la durée. La question de l'infini ne permet pas à Galilée de saisir un instant. Puisque le temps comme la vitesse sont infiniment divisibles, il n'est pas question d'instant. Pour mieux comprendre la notion d'instant dans l'œuvre galiléenne, nous allons traiter brièvement la question de l'infini et les solutions données à ce problème.

La question de l'infini, étudiée laborieusement par Zénon au moment où les grandeurs irrationnelles font leur apparition, a introduit la séparation entre nombre et grandeur géométrique<sup>102</sup>. Il faut savoir que les nombres à l'Antiquité pour les Pythagoriciens avaient une correspondance absolue avec les grandeurs. Le problème de l'infini est déjà résolu depuis l'Antiquité par Eudoxe et repris par Aristote. La définition du continu donnée par Aristote est la suivante : « ce qui est divisible en parties, elles-mêmes toujours divisibles »<sup>103</sup>. De cette façon, Aristote exclut les quantités infiniment petites indivisibles. L'infini reste en puissance mais non en acte. Cette nouveauté introduite par Aristote, l'infini en acte et l'infini en puissance répond à toutes les questions de Zénon concernant l'infini. Pour Zénon, l'infini est un infini en acte, ce qui veut dire que dans le cas du mouvement, il devait observer des arrêts du mobile pendant son mouvement, alors que l'infini en acte semble être un acte intellectuel.

« Tel, par exemple, le point à l'égard de la ligne ; la division du continu aboutissant toujours à des parties finies, le point ne sera que la limite sans grandeur de ces parties ; il sera ce qui sépare les parties du continu, sans être lui-même du continu, et par là il est

---

<sup>102</sup> Pour une étude approfondie voir Clavelin M. ([1968] 1996), « De la continuité du mouvement local », in *La Philosophie Naturelle de Galilée*, Paris : Albin Michel,

<sup>103</sup> Aristote, *Physique*, Livre VI, Chapitre I, 231 b.

définitivement exclue toute tentation de recomposer la grandeur à l'aide d'éléments infiniment petits et cependant déterminés. »<sup>104</sup>

La déduction du mouvement continu est faite puisque tout mouvement est lié à une trajectoire linéaire. « (...) comme le mouvement, le temps se caractérise donc par une continuité absolue. Aussi est-il possible de lui appliquer les mêmes conclusions qu'à la grandeur, et notamment en ce qui concerne le problème de l'infini par composition ou de l'infini par division, le temps, comme grandeur, ne contiendra que l'infini en puissance et jamais en acte. On voit encore en quel sens la notion d'instant devra être prise ; pas plus que le point n'est un élément dont la répétition infinie constituerait la ligne, pas davantage le temps n'est formé d'instant successifs, mais distincts. Comme le point en fait, l'instant n'est qu'une limite introduite de l'extérieur et grâce à laquelle une certaine durée peut être déterminée, soit par rapport à la durée qui le précède, soit par rapport à la durée qui le suit. « Limite commune » du passé et de l'avenir ou, si l'on préfère, « extrémité du temps en deçà de laquelle il n'y a rien de l'avenir, et, inversement, de l'avenir au-delà de laquelle il n'y a rien du passé », l'instant, bien situé dans le temps ne saurait être le temps. »<sup>105</sup>

Une des conséquences majeures de la continuité est l'impossibilité d'un mouvement dans l'instant puisque par définition l'instant n'a pas de durée, il n'est donc pas divisible. « parler d'un mouvement dans l'instant serait donc parler d'un mouvement situé non pas dans le temps, mais dans ce qui est la limite du temps, c'est à dire hors de toute expérience possible. »<sup>106</sup> Cette conséquence introduit le problème du début et de la fin du mouvement. Aristote conclut que puisque l'instant est une limite indivisible, « - limite idéale d'un intervalle temporel, mais sans durée - »<sup>107</sup> la séparation du mouvement de son repos initial et son repos final est inévitable. Pour Zénon la question de la continuité du mouvement paraissait irrationnelle, entre autre parce que le temps pour lui n'enveloppe pas l'infini de la même manière que l'espace. Pour Zénon le temps est fini.

---

<sup>104</sup> Clavelin, M. (1996). *La Philosophie Naturelle de Galilée, Essai Sur les Origines Et la Formation de la Mécanique Classique*, Paris: Albin Michel, 55.

<sup>105</sup> Ibid., 57, les phrases entre guillemets sont prises du livre de la *Physique* d'Aristote, VI.

<sup>106</sup> Ibid.

<sup>107</sup> Ibid., 61.

On voit ici comment la théorie aristotélicienne de la continuité en rapport avec le temps se met en pratique dans l'œuvre de Galilée.

Il en est de même pour les degrés de la vitesse. Il y a un parallèle entre les deux notions. Degrés de vitesse et instant temporel ont une correspondance immédiate qui permet à l'auteur le calcul de degrés de vitesse. Un instant, pour nous aujourd'hui, représente une limite, mais une limite comme un élément interne du temps, l'instant comme limite dans l'œuvre de Galilée n'est pas un. Du point de vue de l'infini, selon Zénon, la limite n'existe pas. Une division à l'infini est une division qui n'atteint pas à une limite quelconque. Même si l'instant se représente par un point du segment, ce point est encore et toujours divisible. L'introduction de l'instant comme limite extérieure du temps signifie la fin de l'infini.

« Convenons de représenter par la ligne AB un flux de temps avec un premier instant A, »<sup>108</sup>

Ici Galilée nous parle d'un *flux de temps*. Cette apparition de la notion de *flux* n'est pas étonnante. L'origine du mot est un emprunt (1306) au latin *fluxus* « écoulement », dérivé de *fluxum* (qui nous a donné la fluxion), supin du verbe *fluere* « couler » (qui nous a donné le fleuve, le fluide etc.). Le flux a donc le sens d'« écoulement » à propos d'un liquide. En 1532 un sens figuré se rajoute pour désigner une grande quantité (d'où flux de bouche « bavardage »). Flux désigne aussi à partir 1580 le mouvement de l'eau, pour une rivière, la marée montante et au sens figuré un mouvement comparable à celui de la marée (fin XVIIe siècle). Par analogie le mot s'emploie en physique.<sup>109</sup> Il prête au temps un mouvement. Il n'est plus question du temps du mouvement mais d'un flux de temps. Il y a une certaine continuité indéniable dans la notion de vitesse et du temps à ce niveau. Le temps et l'espace sont pensés comme des continums avec une évolution parallèle. Il y a quand même un paradoxe dans toute cette pensée. Galilée utilise l'infini divisible qui se trouve dans la continuité pour prouver qu'un corps passe par tous les degrés de vitesses mais il est capable de calculer le degré de vitesse à un instant

---

<sup>108</sup> Galilei G. (1995), 140.

<sup>109</sup> Rey, A. ([1992] 2006), Dictionnaire historique de la langue française, sous la direction d'Alain Rey, Paris : Le Robert.

quelconque puisque le temps et la vitesse sont proportionnels. Mais comme nous l'avons mentionné plus haut, la notion d'instant ou du calcul instantané introduit une finitude, un nombre déterminé dans l'infinie division du mouvement. La question de l'infini n'est pas résolue par Galilée mais elle est plutôt voilée par des propos contradictoires qui semblent convenir à son entreprise d'engendrement du mouvement.

Nous avons vu que le temps galiléen est un continuum qui inclut dans son sein des limites. Il y a plusieurs temps différents rattachés à des mouvements, le découpage du temps est à l'image du découpage du mouvement comme le montre très bien les figures précédentes. Et ces temps différents correspondent plus à ce qu'on appelle « durées » dans le langage courant puisqu'ils peuvent être plus longs ou plus courts. Le temps unique découpé en une série d'intervalles égaux n'existe pas chez Galilée : les intervalles changent de taille à l'image du mouvement. Ces temps nécessitent la recherche d'un mouvement périodique régulier terrestre à l'image du mouvement apparent des astres. Le pouls est un moyen de déterminer le temps, mais il n'est pas fiable. Sa régularité n'est pas assurée. Ce moyen a été utilisé par Galilée. Le mouvement oscillatoire du pendule s'offre aussi comme instrument de mesure du temps. Galilée n'a cependant considéré le pendule comme un instrument fiable que vers la fin de sa vie. Il ne l'a pas utilisé dans son étude de la chute libre des corps graves. Le pendule comme instrument dans la mesure du temps a été pensé par Galilée plus comme un chronomètre pour les observations astronomiques que comme un instrument précis de la mesure du temps qui lui servira à la construction de sa théorie du monde. Tout ceci sera traité en détail dans cette thèse au Chapitre V.

Nous allons par la suite exposer le passage du temps traité dans la théorie comme paramètre de description, au temps traité comme un mouvement uniforme perpétuel. Cette transformation est liée à la transformation de la géométrie elle-même. La géométrie galiléenne est une géométrie qui représente les phénomènes de manière statique. La géométrie newtonienne n'est pas du même genre. C'est une géométrie dynamique, dont le cadre reste statique (euclidien). C'est une géométrie représentative à l'image des phénomènes en mouvement qu'elle étudie. Galilée représente le mouvement uniformément accéléré par un triangle. Il découpe arbitrairement ce triangle en parties pour représenter des *paquets* de vitesse et de temps. Newton, lui,

avec l'introduction de la notion de force et le traitement des mouvements dans l'infiniment petit, peut considérer les vitesses instantanées et les instants de temps à chaque point de la ligne. Le temps dans ce cadre suit son évolution. Il devient lui aussi dynamique.

### 3. Isaac Barrow, la construction du temps absolu.

Avant de commencer l'étude de l'émergence de la mesure du temps et de sa précision dans la théorie de la gravitation universelle de Newton, il nous faut là aussi définir ce que le temps représente dans cette théorie.

Nous avons mentionné que la géométrisation de la Nature, le tournant dans la pensée d'une argumentation qualitative à une argumentation quantitative, trouve sa trace la plus forte dans l'œuvre de Galilée. Mais l'utilisation de la géométrie dans l'œuvre galiléenne n'est pas la même que dans l'œuvre newtonienne. Galilée ne définit pas les termes ou les notions utilisés dans sa théorie. Il utilise le temps, un temps particulier qui va de pair avec les outils géométriques à sa disposition. La philosophie naturelle de Galilée manque de dynamique, c'est une géométrie statique. Son temps ainsi ne peut pas être un temps dynamique mais reste un temps qu'on pourrait caractériser comme un paramètre de description. Sans dynamique et sans une théorie géométrique capable de proposer une solution au problème de l'infini, il est impossible de calculer la vitesse ou le temps instantanés, de considérer le début ou la fin du mouvement<sup>110</sup>. Aristote dans sa physique livre III traite l'infini dans le cadre de la physique naturelle, la nature étant le principe du mouvement<sup>111</sup>, interrogeant son statut ontologique, de son existence (ou

---

<sup>110</sup> Le problème de l'infini a été traité et développé dans l'œuvre de Michel Blay.

<sup>111</sup> Le mouvement pour Aristote n'est pas un simple déplacement mais il est entéléchie. Aristote (1862), *Physique*, Livre III, Chapitre I, traduit par Saint-Hilaire B., Paris : Librairie Philosophique de Ladrangé, § 7-9 :

« il y a autant de genres de mouvement et de changement qu'il y a de genres de l'être. Et comme dans chaque genre on peut distinguer l'être en acte ou entéléchie et l'être en puissance, l'acte ou entéléchie, c'est-à-dire la réalisation de l'être qui était en puissance, selon ce qu'est cet être, c'est le mouvement. Ainsi l'altération est le mouvement de l'être altéré en tant qu'altéré; le développement et la réduction sont le mouvement de l'être qui se développe, et de l'opposé, à savoir l'être qui se réduit; car il n'y a pas ici d'expression commune pour ces deux idées; la génération et la destruction sont le mouvement de l'être qui est engendré et qui se détruit; de même que la translation est le

non existence), de la manière de son existence (ou de son non existence), et de son essence (εἰ ἔστι, πῶς ἔστι, τί ἔστιν).

L'absoluité du temps, soutenue dans les *Principia* par Newton, ne vient pas de nulle part<sup>112</sup>. Newton étant élève d'Isaac Barrow s'inscrit dans une tradition mathématique qui ne permet pas l'élaboration du temps au sein des mathématiques sans connaître la signification de ce terme.

Isaac Barrow<sup>113</sup> a commencé sa carrière académique à Cambridge en 1660 en tant que Professeur de Grec ancien. Trois ans plus tard, il était désigné Professeur Lucasien à la Chaire de Mathématiques, à l'Université de Cambridge, un poste qui n'existait pas auparavant. L'amour des mathématiques pour Barrow a commencé paradoxalement à l'étude de l'histoire de l'Église, et plus précisément de la Chronologie. Barrow s'est rendu compte lors de ses lectures que la Chronologie dépendait de l'Astronomie et l'Astronomie à son tour de la Géométrie. C'est ainsi qu'il s'est retrouvé à étudier les œuvres d'Euclide, d'Archimède, d'Apollonius et d'autres scientifiques plus contemporains par la suite.

Dans ces Lectures Mathématiques, la première lecture est une défense de la science des Mathématiques qui est en même temps une présentation introductive: ce que sont les

---

mouvement de l'être transféré. Ce qui prouve bien l'exactitude de cette définition du mouvement, c'est que, par exemple, quand une chose constructible, en tant que nous ne la considérons qu'à cet égard, est en entéléchie et se réalise, elle est construite ; le mouvement alors est la construction ; de même encore pour l'acte d'apprendre, l'acte de guérir, l'acte de rouler, de sauter, l'acte d'arriver à l'âge mûr, à la vieillesse, etc. ».

Voir aussi Aristote, *Physique*, Livre VIII, chapitre I.

<sup>112</sup> Les influences de Newton concernant l'idée du temps absolu sa nature et son ontologie sont multiples. Rupert Hall a présenté cette diversité dans son article Hall R.A. (1992), « Newton and the absolutes : sources », in Harman M.P. & Shapiro A.E. (eds.), *The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the History of the Exact Sciences*, Cambridge : Cambridge University Press, 261-285. Hall fait référence à tous les travaux antérieurs à ceux de Newton, l'influence de Walter Charleton démontrée par Westfall R. dans sa biographie newtonienne, l'influence néo-platonicienne via les lectures de Henry More démontrée par McGuire J.E. et ainsi de suite. Ici l'accent sera mis sur l'influence de Isaac Barrow.

<sup>113</sup> Barrow I. (1759), « Some Account of The Life of Dr. Isaac Barrow », *The Theological Works of Isaac Barrow, D.D. Master of Trinity College, Cambridge*, Cambridge : At the University Press, Vol.I, xxxviii- liv.



mathématiques, leur objet et leur division, la méthode démonstrative des mathématiques (analyse et synthèse) et l'histoire des mathématiques de leur émergence à leur progrès. Barrow pour défendre l'étude de cette science fait appel aux Anciens, aux Pythagoriciens, à Platon, à Aristote, à Proclus etc. Le sens du terme mathématique donné par Barrow « pour atteindre à la Connaissance de quelque chose dont nous étions ignorants jusqu'alors ; »<sup>114</sup>, ou comme tout ce qui est susceptible de connaissance<sup>115</sup> faisant référence à la *République* de Platon « Toute sorte de Connaissance et de Calcul mental (*mental Mathematics*) ou de Discipline (*or Discipline*) provient d'une Connaissance antérieure ». Barrow étudie même le sens étymologique résultant des textes philosophiques de l'Antiquité. Sa présentation a un air platonicien. Il présente les mathématiques comme la réminiscence<sup>116</sup> d'une connaissance préexistante. Mais il n'adhère pas complètement à cette idée, car pour Barrow l'étude des mathématiques ne donne pas un accès direct à la connaissance absolue de la vérité, mais elle est une étape nécessaire d'initiation, une préparation de l'esprit qui jette les bases pour la suite, suivant en cela encore une fois l'exemple des anciens (Platon La République, Proclus, Xénocrate etc.). L'étude des mathématiques est ainsi primordiale pour les jeunes esprits afin d'arriver à la sagesse des anciens. Selon Theon le Smyrneus herméneute des mathématiques platoniciennes, Barrow nous dit, que la méthode à suivre pour arriver à la Sagesse et à la connaissance sacrée des Mystères est divisée en cinq parties : la Purgation, l'Initiation, l'Inspection, une connaissance parfaite des Mystères, et la Dignité de la béatitude absolue, de la bénédiction du bonheur. La Purgation préparatoire correspond à l'Etude des Mathématiques, l'Initiation à la Philosophie et l'Inspection à la Théologie<sup>117</sup>. Les mathématiques sont vues comme la porte d'entrée de l'édifice divin. Le chemin est long, mais les étapes sont bien déterminées. La nécessité de leur étude par

---

<sup>114</sup> Barrow I. ([1684] 1734), *Mathematical Lectures*, traduction par Kirby J., London: Austen S, 2. Trad. pers.: « to attain to the Knowledge of something we have hitherto been ignorant of ; ».

<sup>115</sup> Ibid. « everything which is capable of being learned » (faisant référence à Platon 7 de République) « Every kind of Learning and mental Mathematics (or Discipline) is made from a previous Knowledge. » (Aristote 2. Post. Anal. Initio).

<sup>116</sup> Ibid., 4. « last may properly called *Discipline*, as being a kind of Remembrance, (...) may properly respect any Knowledge for the acquiring of which we come, not indeed perfectly, yet in some measure, prepared from a certain previous (though somewhat obscure Notion) of the thing to be learned ; in which Case the Mind executes the Office of a Mistress teaching and instructing herself.»

<sup>117</sup> Ibid. 7.

les jeunes esprits n'est pas à redouter. Et si le terme de *mathématiques* a une mauvaise réputation, les seuls responsables, selon Barrow, en sont les auteurs Romains qui souffraient d'ignorance, et cette dernière les a conduit à des barbaries langagières<sup>118</sup>.

Comme on l'a vu la science des mathématiques se sépare en deux catégories : en mathématiques pures et abstraites d'un côté, en mathématiques mixtes ou concrètes de l'autre. Par exemple, une ligne droite peut être conçue dans son absoluité et son universalité comme l'intervalle le plus court entre deux points et elle se prête aux démonstrations géométriques. Ou bien elle peut aussi être vue comme l'intervalle dessiné de sorte à unir le centre du Soleil et le centre de la Terre et signifier la distance entre les deux corps par exemple, et dans ce cas elle peut devenir l'objet de l'astronome, de l'opticien, du musicien etc.<sup>119</sup>

Barrow présente de manière détaillée la construction du temps absolu dans ses Lectures Géométriques. Ces Lectures sont issues des cours enseignés à l'Université de Cambridge durant l'année 1665. Elles n'étaient pas sujet de publication et c'est pour cette raison que Barrow a décidé de les publier *puris Naturalibus*. Newton avait la charge de la version à publier<sup>120</sup>. Dans ces lectures, Barrow veut introduire un nouveau champ mathématique le « *Original of Mathematical Hypotheses* ». Ce nouveau champ étudie la multitude des modes de conception des Grandeurs (*magnitudinem*), autrement dit la génération de la variété des genres de Grandeurs. Dans ce contexte les Grandeurs ne sont pas données mais conçues et produites d'innombrables manières. À la tête de la hiérarchisation des modes de génération de Grandeurs repose le mouvement local, car sans mouvement rien ne peut se produire, rien ne peut se générer, Principe célèbre posé par Aristote dans sa Physique. Sans le mouvement la Physique n'a pas lieu d'être. Le Principe général qui en résulte est le suivant : Toute Grandeur est mobile, nous dit Barrow, du point (comme le minimum de la Grandeur) à l'infini (comme le maximum de la Grandeur) et l'entre deux (toutes les Grandeurs intermédiaires finies).<sup>121</sup> Le travail

---

<sup>118</sup> Ibid. 9.

<sup>119</sup> Ibid. 12.

<sup>120</sup> Barrow I. (1735), *Geometrical Lectures: Explaining the Generation, Nature and Properties of Curve Lines*, traduction par Newton I., London : Printed for Stephen Austen, at the *Angel and Bible* in St. Paul's Church-Yard.

<sup>121</sup> Ibid., 3.

des Mathématiciens consiste ainsi à imaginer et à étudier toutes les différentes combinaisons des mouvements possibles (rectilignes, circulaires, accélérés, décélérés etc.) et à les traiter selon leur nombre et leurs qualités. La manière dont se porte un mouvement (progressif ou circulaire) et la quantité de la force motrice sont leurs centres d'intérêts. Mais nul ne peut étudier la quantité de la force motrice sans le temps. « Mais parce que les Mathématiciens font un usage fréquent du Temps, ils doivent avoir une Idée claire de la signification de ce Mot, sinon ils sont des Charlatans. »<sup>122</sup> Après cette déclaration provocatrice Barrow est obligé de définir le temps, et il le fait à la suite avec beaucoup de précaution et dans un effort d'éviter toute fioriture (*λεπτολογήματα*). Voici sa définition :

« Le Temps (pour parler de manière abstraite), est la continuité (*continuance*) de toute Chose dans son propre Être. »<sup>123</sup>

*Continuité* comme l'état de permanence dans l'existence. Ce qu'il faut entendre par le temps de Barrow en tant que continuité de la chose dans son propre être, est tout simplement la durée de l'existence des êtres. Il y a des choses qui existent plus longtemps que d'autres, d'autres moins que d'autres et ainsi de suite.

« Le Temps est par conséquent<sup>124</sup> absolument Quantité (*Ergò tempus absolutè quantum est*), en admettant d'une certaine Façon les affection premières de la Quantité, de l'Égalité, de l'Inégalité, et de la Proportion »

Le Temps de manière absolue est ainsi Quantité. Le terme Quantité désigne par définition une limitation qui va de pair avec la notion de durée. Selon le dictionnaire historique de la langue française,

---

<sup>122</sup> Ibid., 4 trad. pers. de l'anglais : « But because Mathematicians frequently make use of Time, they ought to have a distinct Idea of the meaning of that Word, otherwise they are Quacks. ».

<sup>123</sup> Ibid., 4-5. trad. pers. de l'anglais : « Time (to speak abstractedly) is the continuance of any Thing in its own Being ».

<sup>124</sup> Ibid., 5. trad. pers. de l'anglais : « Time absolutely therefore is Quantity, in admitting in some Manner the chief Affections of Quantity, Equality, Inequality, and Proportion ».

« Quantum n. m., Quanta pluriel est emprunté (1642) au latin *quantum* « quelle quantité », substantivation du neutre de l'adjectif *quantus*. Le mot a été introduit en scolastique pour désigner une quantité finie et déterminée ».

Dans le dictionnaire Oxford, latin –anglais on trouve à la définition de *quantus*

« De quel taille, degré, somme, etc.; (pl.) quel nombre. b. *-us est*, à sa taille totale, longueur, etc. (mettant l'accent sur le fait que les sommes entières sont impliqués) »<sup>125</sup>

Prenant en compte les deux définitions on peut se permettre de conclure que dans le cas de Barrow le « *quantum* » est la substantivation du neutre de l'adjectif *quantus*, lequel, quand il est suivi par le *est* désigne une quantité dans toute sa grandeur. Le temps ainsi, selon Barrow est Quantité au sens de sa grandeur totale. Est-ce que le temps de Barrow existait avant la création du monde ? Est-ce que ce temps coule indépendamment du monde matériel et au-delà de lui ?

Indubitablement oui. Barrow est de l'avis que le temps existait avant la création du monde au même titre que l'espace. L'existence de l'espace au delà du monde matériel, là où il n'y a que le vide, est évidente pour lui. Dieu est omniprésent et il doit être quelque part, il existe ainsi un espace infini sans que son existence soit corrélative de la création du monde. Puisqu'il y a espace, il y a temps. Et Barrow poursuit sa réflexion encore plus loin, il soutient qu'il est très possible que quelque chose existait avant la création du monde, et que, peut-être, il y a quelque chose dans cet espace infini qui est capable de ce genre de continuité : un soleil émettait sa lumière bien avant et que, peut-être, le même ou un autre comme celui-ci émet de la lumière encore à travers des espaces Imaginaires !

Tout cela est possible car le Temps de Barrow n'implique pas une existence réelle ou une existence synchrone, mais seulement la possibilité de la continuité de l'Existence, au même titre que l'espace exprime seulement la capacité de contenir une grandeur. Le

---

<sup>125</sup> Glare P.G.W. (eds.) ([1982] 1984), *Oxford Latin Dictionary*, New York : Oxford University Press, 1541. Trad. pers. : « Of what size, degree, amount, etc. ; (pl.) of what number. b *-us est*, in all its size, length, etc. (emphasizing that the full amount is involved). »

Temps de Barrow, quant à sa nature absolue, n'implique pas de mouvement. Il est indépendant de tout mouvement (des étoiles fixes etc.) que l'on soit endormi ou éveillé, en mouvement ou en repos, le temps s'écoule perpétuellement avec un rythme stable, il n'a pas d'*αρχή* (*Arkhè*) et *τέλος* (*télos*), et si un tel commencement et une telle fin existent (dans le sens de l'apparition et de la disparition des choses), que ce soit au repos ou en mouvement, seul un esprit supérieur au notre pourrait l'appréhender.

À propos de la mesure du temps absolu, il faut suivre la logique des Quantités. Les Grandeurs en tant que telles sont indépendantes de toute mesure, elles sont des Quantités absolues. Afin de pouvoir exprimer quelque chose du genre de ces Quantités il faut les mesurer. Dans la même logique le Temps absolu étant une Quantité il est inaccessible, imperceptible, et le seul moyen de concevoir le genre de la Quantité du Temps et de le mesurer.

Pour Barrow nous avons deux moyens pour estimer les Quantités, par l'extension du mouvement perçu de l'extérieur ou de l'intérieur. De l'extérieur par un changement qui peut affecter nos sens et de l'intérieur par l'excitation de l'âme due à une opération de l'esprit. La Quantité du Temps, en tant qu'observable, dépend de l'extension du mouvement. L'auteur, afin de souligner cet aspect, cite deux vers de Lucrèce tirés de son ouvrage *De rerum natura* : « et il faut avouer que personne ne peut concevoir le temps à part, et isolé du mouvement et du repos des corps. »<sup>126</sup> Le point de vue de Lucrèce est cependant très différent de celui défendu par Barrow sur la nature du temps puisque quelque vers plus haut il écrivait :

« Le temps n'existe pas non plus par lui-même: c'est la durée des choses qui nous donne le sentiment de ce qui est passé, de ce qui se fait encore, de ce qui se fera ensuite; »<sup>127</sup>

---

<sup>126</sup> Traduction française de M. Nisard, Paris, 1857. La traduction utilisée par Barrow: Lucretius T. Carus (1714), *Of the Nature of things*, traduction par Creech T, London : Matthews J., Livre I, 1.460-1.470 : « No Thought can think on Time; that's still confess'd: But thinks on Things in Motion, or at Rest. »

<sup>127</sup> Ibid. « Time of it self is Nothing: But from Thought Receives its Rise; by lab'ring Fancy wrought From Things consider'd, while we think on some As Present, some as Past, and some to Come. »

Pour Lucrèce, le Temps est un être qui trouve sa naissance même dans la pensée, même si nulle pensée, au moins avouée, ne peut le concevoir, et non pas une Quantité absolue qui coexiste avec un espace infini au delà du monde matériel.

Barrow par la suite critique le temps de la *Physique* d'Aristote<sup>128</sup> (qu'il appelle « the Philosopher ») surtout en ce qui concerne sa perception. Allons voir cette critique de plus près. Barrow cite trois phrases d'Aristote en grec,<sup>129</sup> suivies de trois phrases en anglais, du Livre IV de la *Physique* consacrées à l'étude de l'espace, du vide et du temps.

« Nous convenons cependant que le temps ne peut exister sans changement ; car nous-mêmes, lorsque nous n'éprouvons aucun changement dans notre pensée, ou que le changement qui s'y passe nous échappe, nous croyons qu'il n'y a point eu de temps d'écoulé <sup>130</sup> » , « *When we wake we cannot perceive or tell how much Time has passed during our Sleep* »

« il est évident que le temps n'existe pour nous qu'à la condition du mouvement et du changement<sup>131</sup> » , « *We do not perceive the Thing, therefore there is no such Thing* »

« car, selon que le mouvement est grand, autant de son côté le temps semble toujours avoir de grandeur.<sup>132</sup> » « *for as much Motion as there was, so much Time seems to have been elapsed.* »

On pourrait penser que par la suite Barrow a traduit les phrases grecques, mais à part la troisième citation, les deux autres ne semblent pas être des traductions. Pour la première Aristote écrit que le temps n'est peut-être pas mouvement (*μεταβολή*) mais son existence ne peut pas être pensée sans mouvement. C'est par la suite qu'Aristote

---

<sup>128</sup> Aristote, *Physique*, Livre IV, Chapitre XVI, 218b – 219a. Traduction française par Saint-Hilaire B.

<sup>129</sup> Chaque citation est suivie par une « *traduction* » de Barrow en italique dans le texte en anglais.

<sup>130</sup> Traduction française par Saint-Hilaire B. « (Ἀλλὰ μὴν οὐδ' ἄνευ γε μεταβολῆς·) « ὅταν γὰρ μηδὲν αὐτοὶ μεταβάλλωμεν τὴν διάνοιαν ἢ λάθωμεν μεταβάλλοντες, οὐ δοκεῖ ἡμῖν γεγονέναι χρόνος, »

<sup>131</sup> Aristote, *Physique*, Livre IV, Chapitre XVI, 218b – 219a. « φανερόν ὅτι οὐκ ἔστιν ἄνευ κινήσεως καὶ μεταβολῆς χρόνος. »

<sup>132</sup> Ibid., 219a. « ση γὰρ ἡ κίνησις, τοσοῦτος καὶ ὁ χρόνος αἰεὶ δοκεῖ γεγονέναι. »

nous présente un cas de la mythologie grecque, celui de l'île de Sardos où les gens se rendaient en pèlerinage auprès des tombes des héros (les enfants d'Hercule), où ils dormaient, dans l'espérance d'être guéris de quelque maladie. Et à leur réveil, ils n'avaient aucun sentiment du temps écoulé car ils joignent le  $\nu\tilde{\nu}$  (maintenant) du juste avant l'endormissement avec le  $\nu\tilde{\nu}$  du réveil. Aristote souligne ainsi la nature non identique des  $\nu\tilde{\nu}$ , car si tous les  $\nu\tilde{\nu}$  étaient identiques le temps n'existerait pas (*οὐκ ἂν ἦν χρόνος*). Il s'agit ici pour Aristote de la présentation d'un exemple pris par la mythologie grecque. Le philosophe ne veut pas prouver que l'existence du temps suppose nécessairement la conscience humaine. Il veut simplement souligner que nous connaissons tous et acceptons le lien essentiel entre le temps et le mouvement. La « traduction » de Barrow pour la première phrase correspond plutôt à un *résumé* de l'analyse du mythe de Sardos par Aristote. Barrow accepte le fait que l'on ne peut pas percevoir le temps sans mouvement, mais de là à conclure que le temps n'existerait pas parce que nous ne l'avons pas perçu lui paraît non justifiable, chose qui semble découler tout naturellement de sa vision du temps.

Pour la deuxième citation Aristote écrit qu'il est évident que le temps n'est pas mouvement mais qu'il n'existe pas sans le mouvement. La « traduction » de Barrow ici n'est pas une traduction littérale mais le résultat d'un raisonnement à partir de la phrase d'Aristote.

Pour Barrow le seul moyen de concevoir le temps est le mouvement.

Pour Aristote le temps n'existe pas sans mouvement.

Si l'affirmation d'Aristote était vraie, dans le cas de la non existence du mouvement le temps n'existerait pas non plus. Si de plus la phrase de Barrow est vraie, on arrive au syllogisme suivant : la non-perception de la chose est la non-existence de la chose. Inutile de dire que Barrow n'adhère absolument pas à cette idée, puisque son temps est un temps qui existe indépendamment de tout mouvement, indépendamment de sa perception même.

La troisième citation est paradoxalement une traduction fidèle de la phrase d'Aristote. Sur ce point Barrow est entièrement d'accord. Le mouvement vu comme mesure du

temps : tant de mouvement, tant de temps. Ce que Barrow fait avec ces citations est assez impressionnant. Il traite une petite partie du temps chez Aristote en dehors de son cadre théorique, en dehors de la fonction du cadre philosophique aristotélicien. Pour le critiquer, après l'avoir décontextualisé, il utilise des présupposés de sa propre théorie. Ce comportement vis-à-vis du temps aristotélicien peut être expliqué de deux manières. Soit Barrow suit une stratégie précise vis-à-vis du temps aristotélicien afin d'établir sa propre théorie, soit c'est une question d'interprétation. En ce qui concerne la première hypothèse Alain de Libera<sup>133</sup> fait le même constat concernant la lecture d'Aristote par Roger Bacon :

« Dans la multiplicité de ses traductions le texte d'Aristote perd plus ou moins son identité. Le phénomène apparaît clairement avec la *Métaphysique*. Si l'on considère, par exemple, les trois commentaires que lui a consacrés Roger Bacon lors de son séjour à Paris (1237-1247) (...) on constate qu'il a utilisé plusieurs textes de base. (...) Cette versatilité même montre que l'auteur recherche moins le meilleur texte que la version la plus adaptée à ses besoins- il s'agit, à chaque fois, d'avoir le texte le plus complet possible, compte tenu des lacunes adultérant chaque version. Le souci est moins philologique – on ne compare pas les traductions pour les passages qu'elles ont en commun – que matériel- on les complète l'une par l'autre en regardant ce qu'elles sont seules à livrer. »

La grande différence entre la lecture de Bacon et la lecture de Barrow, c'est que Barrow était un excellent connaisseur du grec ancien et qu'il avait accès au texte dans sa langue d'origine. Bacon peut choisir l'interprétation du texte qui lui convient mais Barrow peut se fier à la sienne. Comme le dit Pierre Hadot :

« ce sont les contre-sens et les incompréhensions qui, très souvent, ont provoqué une évolution importante dans l'histoire de la philosophie, et qui, notamment, ont fait apparaître des notions nouvelles. »<sup>134</sup>

---

<sup>133</sup> De Libera A. (2014), *La philosophie médiévale*, Paris : PUF, 361.

<sup>134</sup> Hadot P. (1968), « Philosophie, Exégèse et Contre-sens », in *Akten des XIV. Internationalen Kongresses für Philosophie*, Vienne : Herder & Co, Vol I, 337-338.



Comme dans notre cas du temps absolu. D'un autre côté, il ne faut pas oublier que le cadre théorique de Barrow n'est pas un cadre philosophique mais un cadre théologique. C'est une certaine conception de Dieu qui fait émerger ce genre de temps absolu chez Barrow. Le temps aristotélicien ainsi n'est pas critiqué en lui-même, mais le système philosophique dont il fait partie est remis en question par Barrow à travers un prisme théologique.

Tant de mouvement, tant de temps, car une certaine *quantité* du mouvement correspond à une certaine quantité de temps, une quantité de temps peut être appelée durée. Et c'est la perception de cette durée qui nous permet d'imaginer la continuité des choses. Mais quel mouvement envisager pour la mesure du temps ? Le temps absolu qui coule uniformément nous impose le type de mouvement que l'on doit utiliser pour sa mesure, le mouvement uniforme d'un corps. Barrow nous dit explicitement que tout mouvement n'est pas apte à mesurer le temps, seulement le plus simple, uniforme et de rythme régulier : « la Chose mue partout en conservant une Force constante, et étant transportée dans un Milieu homogène ». <sup>135</sup> Le mouvement qui mesure le temps s'effectue ainsi dans un milieu uniforme, et nous avons ici l'introduction d'une force, qui doit rester constamment la même durant ce mouvement.

« Un tel Corps mobile doit donc être choisi pour la Détermination du Temps, dans la mesure où il garde constamment une Impulsion égale, en Rapport avec les intervalles de son Mouvement, et qu'il se meut dans un Milieu uniforme. » <sup>136</sup>

Barrow propose par la suite un mouvement avec les caractéristiques mentionnées plus haut : le mouvement apparent du Soleil, des astres, celui de la création du monde selon l'écriture sainte en grec :

« Dieu dit : Qu'il y ait des luminaires dans l'étendue du ciel, pour séparer le jour d'avec la nuit ; que ce soient des signes pour marquer les époques, les jours et les années ; » <sup>137</sup>

---

<sup>135</sup> Barrow I. (1735), 9. « the Thing moved every where retaining an equal Force, and being carried along in a uniform Medium. ».

<sup>136</sup> Ibid. « Such a moveable Body must therefore be pitched upon for the Determination of Time, as at least constantly keeps an equal Impetus, with Regard to the periods of its Motion, and runs thro' an equal Space ».

Ce passage représente une de plus anciennes définitions de la mesure du temps faisant le lien avec les phénomènes célestes. Le temps ainsi trouve ses premières divisions selon le mouvement apparent des astres. L'auteur par la suite inscrit ouvertement le passage de la primauté de la mesure du temps du ciel à la Terre. Il est vrai que les mouvements du Soleil et des Astres, nous dit Barrow, ont une certaine régularité, mais pour la confirmer ou la rejeter, il faut la comparer à un autre mouvement régulier, à un chronomètre artificiel fait avec précision<sup>138</sup>, comme un sablier destiné à mesurer l'heure. Si l'on considère que le sable (ou l'eau) contenu dans le sablier reste le même en ce qui concerne sa forme, sa quantité et la force de sa descente (« Force of Descending »), et si le passage (le toyau fin ou le diaphragme) ne se déforme pas, et si le milieu (l'air) reste quasiment intact, tout cela au moins pour une courte durée temporelle (« in a short Space of Time »), on peut alors comparer le mouvement du sable avec le mouvement du soleil représenté sur un cadran solaire et juger la périodicité de ce dernier. Mais puisque pour juger de la régularité du mouvement solaire on le confie aux instruments de mesure de temps artificiels, la mesure du temps ne peut plus être une affaire céleste mais doit devenir une affaire terrestre.

Ce que Barrow nous invite à faire est de définir le temps par un mouvement uniforme, régulier, décrit par un corps soumis à une force constante, et une fois le temps défini par le mouvement, de mesurer la *quantité* de ce mouvement, c'est-à-dire la durée d'un mouvement quelconque, dans le temps ; ou autrement dit de rapporter toute quantité de ce mouvement au mouvement uniforme.

« ce qui en Réalité n'est pas autre chose que la comparaison des Mouvements à d'autres mouvements à l'Aide du Temps ; »<sup>139</sup>Ce qui est assez curieux dans cette affaire est que Barrow implique le Temps là où il n'a pas lieu d'être. Il nous dit que son raisonnement résulte du raisonnement sur la mesure de l'espace. On suppose une partie de l'espace et pour définir d'autres parties de l'espace on les compare à cet espace prédéfini. On définit

---

<sup>137</sup> Γεν. 1,14. « Καὶ εἶπεν ὁ Θεός· γενηθήτωσαν φωστῆρες ἐν τῷ στερεώματι τοῦ οὐρανοῦ εἰς φαῦσιν ἐπὶ τῆς γῆς, τοῦ διαχωρίζειν ἀνὰ μέσον τῆς ἡμέρας καὶ ἀνὰ μέσον τῆς νυκτός· καὶ ἔστωσαν εἰς σημεῖα καὶ εἰς καιροὺς καὶ εἰς ἡμέρας καὶ εἰς ἔνιαυτούς· »

<sup>138</sup> La précision ici se réfère à l'isochronisme parfait de l'instrument.

<sup>139</sup> Barrow I. (1735), 13. « which in Reality is no more than comparing some Motions with others by the Assistance of Time ; ».

l'espace par l'espace et le mouvement par le mouvement, alors que dans la citation ci-dessous d'Aristote il définit le mouvement par le temps et le temps par le mouvement. Nous ne trouvons pas la place du Temps nécessaire suivant ce raisonnement, d'autant plus que pour soutenir son propos il cite Aristote encore une fois décontextualisé :

*« Et non seulement nous mesurons le mouvement par le temps; mais nous pouvons encore mesurer le temps par le mouvement, parce qu'ils se limitent et se déterminent mutuellement l'un par l'autre. That is, We not only measure Motion by Time, but also Time by Motion, because they determine each other. »<sup>140</sup>*

Chez Aristote il existe une relation de dépendance entre le temps et le mouvement, si le mouvement existe, le temps existe. La détermination mutuelle entre le temps et le mouvement est une conséquence naturelle. Barrow veut rendre le temps indépendant du mouvement. Il suit le raisonnement qui nous dit que : ce n'est pas parce qu'il y a mouvement qu'il y a temps. Ce n'est pas l'idée du mouvement qui dicte celle du temps. Le temps existe indépendamment du mouvement mais pour le saisir, ou pour le rendre mesurable et utilisable, Barrow nous invite à le considérer comme un corps en mouvement uniforme. Le temps absolu est une tentative en ce sens. Il y a une contradiction dans ce raisonnement. Alors que le temps est indépendant du mouvement dans les Lectures Géométriques, Barrow le définit à l'image d'un mouvement : celui d'un corps qui suit un mouvement rectiligne uniforme sous l'action d'une force constante. L'auteur nous demande de considérer le temps ainsi et ensuite de comparer tout autre mouvement à celui-ci afin de déterminer sa durée et son genre (uniforme, accéléré, décéléré). Il faut considérer ici, que seule l'existence du temps est indépendante du mouvement sans rapport de cause à effet. Pour l'utiliser néanmoins comme référence de détermination de tout mouvement, il faut le considérer comme un mouvement uniforme à l'infini. Ce temps n'est peut être pas qualifié par Barrow d'absolu mais c'est ce temps mis en mouvement, puisqu'il a une vitesse constante et suit un mouvement uniforme, et il sera adopté par Newton dans sa définition du temps absolu. Le temps n'est plus un paramètre descriptif, mais une notion dynamique.

---

<sup>140</sup> « Οὐ μόνον δὲ τὴν κίνησιν τῷ χρόνῳ μετροῦμεν, ἀλλὰ καὶ τῇ κινήσει τὸν χρόνον διὰ τὸ ὀρίζεσθαι ὑπ' ἀλλήλων ».

#### 4. Isaac Newton, le temps absolu, une éternité dynamique.

Nous avons étudié jusqu'ici l'évolution du temps et son passage de paramètre de description à sa construction comme temps mathématique, absolu. Nous allons à présent étudier la notion de temps dans la théorie newtonienne. Quand on se réfère ici à la théorie newtonienne, nous parlons de la théorie de la gravitation universelle comme présentée dans les *Principia*. Car le temps dans l'intégralité de l'œuvre newtonienne exprime une dualité. Il y a le temps absolu des *Principia*, celui qui nous intéresse ici, et le temps de la théorie des Fluxions. Il nous faut faire la part des choses car comme Guicciardini N.<sup>141</sup> l'a très bien souligné, le contexte dans lequel les deux temps sont nés, mathématiquement parlant, est différent. Il n'y a donc aucune relation entre les deux. Le temps des Fluxions n'étant pas absolu il partage avec le temps absolu l'uniformité de son écoulement. Newton, dans la théorie des Fluxions, insiste sur le fait que n'importe quelle variable peut jouer le rôle du temps à condition qu'elle « *augmente par une Fluxion uniforme* ». Le temps ainsi perd son aspect absolu mais il conserve son écoulement uniforme.

Afin de créer une image plus complète de la notion du temps dans les *Principia*, notre objectif dans ce chapitre est l'étude du temps dans son aspect ontologique tout en faisant le lien avec le temps mathématique construit par Barrow. Une telle étude est indispensable puisque le rapport entre le temps comme Quantité absolue et mesure du temps est établi. Mesurer le temps signifie comprendre le genre de Quantité qu'est le temps nous dit Barrow, comme on l'a vu dans le chapitre précédent, et Newton après lui.

Afin de réussir la mise en rapport entre la Quantité absolue et la mesure du temps, il faut considérer le temps premièrement comme faisant partie du cadre générale de la Philosophie Naturelle newtonienne et comme une nécessité de la description dynamique du mouvement. On appelle ici cadre général le contexte dans lequel s'est développée la théorie de la matière, du mouvement et des forces. Ce cadre est caractérisé par le rapport entre Dieu, l'espace et le temps comme présenté dans la

---

<sup>141</sup> Guicciardini N. (à paraître), « Newtonian absolute time vs fluxional time », Nicolaidis E. & Morfouli M. (eds), in *Accuracy of the measures and mobility of astronomers*, Paris: CNRS

Scholie générale des *Principia*, et il est d'une importance majeure, car « (...) l'image générale du monde newtonien doit être comprise dans le contexte de sa conception de la nature et de l'existence de Dieu. Ce qui est crucial dans cette conception est le regard que Newton porte sur Dieu comme un agent intelligent et actif qui existe de manière éternelle et omniprésente. Conformément à cette idée de Dieu, la doctrine que l'espace et le temps sont des existants est ancrée dans la conception de Newton de l'existence Divine. Puisque toutes choses créées existent avec Dieu dans le même cadre spatio-temporel absolu, le mouvement absolu des choses y est rapporté exclusivement. D'ailleurs, l'intelligibilité de cela est en soi fondée sur l'intelligibilité de l'existence Divine. Elles tiennent ou tombent ensemble. Affirmer ainsi que l'espace et le temps absolus sont des réifications des quantités mathématiques de Newton, ou que le mouvement absolu exige le postulat de ces entités, c'est perdre de vue la signification théologique fondamentale du raisonnement newtonien. C'est d'ailleurs comme si « on mettait la charrue avant les bœufs. » (...) La finalité de Newton va au-delà de l'explication des phénomènes naturels, aussi importante soit-elle. Son désir ultime était de rendre le Créateur et la totalité de la création intelligible à l'entendement humain. »<sup>142</sup>

Nous nous alignons ici sur l'idée du désir ultime de Newton pour étudier l'aspect ontologique du temps, de sa nature et de son rapport à Dieu, vu par l'auteur dans les *Principia*. Avant de présenter le temps des *Principia* nous allons présenter deux passages qui peuvent nous aider à mieux appréhender cette notion et voir l'influence du temps

---

<sup>142</sup> McGuire J.E. (1978), « Existence, Actuality and Necessity: Newton on Space and Time », in *Annals of Science*, 35, 313. Trad. pers. de l'anglais :

« (...) Newton's general picture of the world has to be understood in the context of his conception of God's nature and existence. Crucial to this conception is Newton's view of God as an active and intelligent agent who exists omnitemporally and omnipresently. Accordingly, the doctrine that space and time are existents, is rooted in Newton's conception of Divine existence. Since all created things exist along with God in the same absolute spatio-temporal framework, the absolute motion of things is with respect to that alone. Moreover, the intelligibility of this is itself grounded in the intelligibility of Divine existence. They stand or fall together. Hence to claim that absolute space and time are reifications of Newton's mathematical quantities, or that absolute motion requires the postulation of these entities, is to miss the fundamentally theological significance of Newton's reasoning. Moreover, it is to put the cart before the horse. (...) Newton's aim goes beyond explaining the phenomena of nature, important though this is. Ultimately, he wished to render the Creator and the whole of creation intelligible to human understanding. »

d'Isaac Barrow (dans la réflexion newtonienne que nous venons d'exposer dans le chapitre précédent).

### i. De la Gravitation

Le premier passage est relatif aux notions d'espace et de temps vues et élaborées par Newton dans son ouvrage *De Gravitatione*<sup>143</sup>. La date de ce manuscrit n'est pas fixée par les historiens, mais on a tendance à le classer parmi les manuscrits des années 1660, sûrement entre 1664 et 1668<sup>144</sup>. Son titre habituel nous est donné tout simplement par le début de sa première phrase « De Gravitatione et æquipondio fluidorum et solidorum in fluidis scientiam duplici methodo tradere convenit. ». Dans ce texte Newton exprime ses idées sur l'espace, les corps et Dieu. L'étude de ces notions peut être vue comme la réaction critique de Newton vis-à-vis de leurs définitions par d'autres philosophes du XVIIe siècle (Descartes principalement, Gassendi, More, Barrow...). Néanmoins l'aspect ontologique de ce texte reste source de controverses entre philosophes et empiristes<sup>145</sup>. Nous ne prendrons pas part au débat. Nous allons considérer que les deux approches jouent chacune à sa manière un rôle plus ou moins important sur l'approche de Newton. C'est dans ce contexte là que nous allons étudier de plus près la notion de temps qui émerge du *De Gravitatione*. Le temps y est toujours traité de pair avec l'espace. Après une définition concernant l'espace, Newton répète souvent que ce qui est dit de l'espace est valable aussi pour le temps. Nous parlons ici de temps mais quand Newton parle du temps dans ce texte il l'appelle exclusivement durée et ce pour une raison précise. Pour Newton comme pour Barrow, le temps est la continuité de l'être dans son être propre. Voici comment Newton définit la durée lors de la quatrième propriété de l'espace :

---

<sup>143</sup> La version utilisée ici est celle présentée par De Gandt F. et traduite en français par Biarnais M.-F. dans : Newton I. (1995), *De la Gravitation, suivi de Du Mouvement des corps*, Paris :Gallimard.

<sup>144</sup> Hall R.A. (1992), « Newton and the absolutes: sources », in *The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the History of the Exact Sciences*, Harman M.P. & Shapiro A.E. (eds.), Cambridge : Cambridge University Press, 261.

<sup>145</sup> Janiak, A. (2008). *Newton as philosopher*, Cambridge : Cambridge University Press, 155.

« 4. L'espace est une affection de l'être en tant qu'être. Aucun être n'existe ni ne peut exister sans être rapporté, de quelque manière, à l'espace. Dieu est partout, les esprits créés sont quelque part, le corps est dans l'espace qu'il remplit et toute chose qui n'est ni partout ni quelque part, n'a pas d'être. Il suit de là que l'espace est un effet émanant d'un être qui existe à titre premier, puisque, quel que soit l'être que l'on pose, l'espace est posé par là même. On peut produire les mêmes affirmations sur la durée : autrement dit, tous les deux sont des affections ou des attributs de l'être selon lesquels on désigne la quantité d'existence de n'importe quel individu sous le rapport de l'étendue de sa présence et sous le rapport de sa persévérance dans son être. Ainsi, la quantité de l'existence de Dieu sous le rapport de la durée a été éternelle et sous le rapport de l'espace où il est présent, infinie ; quant à la quantité d'existence d'une chose créée selon sa durée, elle a été égale à la durée qui s'est écoulée depuis le début de son existence : et [cette quantité] selon l'amplitude de sa présence, est égale à l'espace qu'elle occupe.

D'ailleurs, pour éviter qu'on imagine à partir de là que Dieu est étendu et fait de parties divisibles comme les corps, il faut savoir que les espaces eux-mêmes ne sont pas divisibles en acte et que, de plus tout être a un mode propre d'être présent aux espaces. Ainsi, en effet, la relation de la durée à l'espace est bien différente de celle du corps à l'espace. Car, nous n'assignons pas une durée différente aux différentes parties de l'espace mais nous disons que toutes durent ensemble. Un moment dans cette durée est le même à Rome et à Londres, le même sur Terre, sur les astres et dans les cieux tout entiers. De même nous comprenons que chaque moment de durée est répandu à travers les espaces selon une manière qui lui est propre, sans qu'il faille concevoir des parties de durée : de même il n'est pas plus contradictoire que l'Esprit, selon une manière qui lui est propre, puisse être aussi répandu à travers l'espace sans que l'on conçoive en lui des parties. »

Newton ouvre son paragraphe en nous disant que l'espace ainsi que le temps, ou la durée, sont des affectations des êtres tant que les êtres se trouvent dans leur état d'existence propre. À la question du genre d'affectation qu'est le temps, Barrow nous a donné la réponse. Si l'on considère comme genres d'affectations de l'être la quantité, l'égalité, l'inégalité et la proportion, en ce qui concerne le temps, c'est une affectation du genre de la quantité comme définie dans le chapitre précédent.

Cette première phrase nous renvoie immédiatement à la définition du temps dans les Lectures Géométriques de Barrow : « Le Temps (pour parler de manière abstraite), est la continuité (*continuance*) de toute Chose dans son propre Être. ». Mais pour qu'on puisse considérer un être lorsqu'il existe dans son être propre il faut que cet être présente, dans son changement, ou dans sa transformation continue, quelque chose qui ne change pas. C'est bel et bien une théorie que Platon exprime dans *Timée*, prenant en compte le devenir de l'être. La solution donnée par le même auteur, à la recherche de cette chose qui ne change pas dans l'être, et qui le définit en tant que tel, est le rapport entretenu entre les formes intelligibles et les formes sensibles. Ce qui ne change pas est ce qui est de l'ordre de l'intelligible dans l'être, ce qui lui fait entretenir un rapport avec le sensible comme celui du rapport entre une création originale à sa copie. Cette idée de la partie qui persiste dans l'être, afin qu'il puisse être identifié comme tel, est absente dans le discours des deux savants. Mais pour pouvoir parler de la continuité de l'être il faut pouvoir identifier la chose en lui qui ne change pas, qui reste intacte, inaltérée. On peut faire l'hypothèse, puisque cette analyse de l'identification de l'être est absente, que la notion du devenir est absente également. Newton et Barrow nous parlent des êtres qui ne changent pas durant leur existence. De tels êtres ne peuvent être que les « êtres » mathématiques. Et l'existence de ces « êtres » mathématiques en question semble être définie par le temps et l'espace, car nul « être existe sans être rapporté, de quelque manière, à l'espace (et au temps) ».

« Dieu est partout » nous dit Newton, ou « omniprésent » comme nous dit Barrow, « les esprits sont quelque part », les corps aussi. L'espace est ainsi une condition nécessaire de l'existence de l'être. Car si une chose n'est pas dans l'espace, ou n'occupe pas une partie de l'espace elle n'existe pas. Newton ne le présente pas comme une condition nécessaire de l'existence de l'être, mais comme un effet qui provient naturellement de l'être lui même. On peut dire avec Newton, que puisqu'il y a être il y a espace. Ou que l'espace et le temps, comme Quantités, ou affectations des êtres, sont déterminés par l'existence de l'être. Sans l'existence de l'être il n'y pas de quantité à déterminer. Ces affectations sont ainsi des quantités de l'existence, autrement dit on traite l'existence quantitativement avec l'espace et le temps. L'espace est comme l'amplitude de la présence de l'être qui existe et le temps est comme la durée de l'existence de l'être en tant qu'être. De la même manière Newton traite également de l'existence de Dieu. Son



amplitude de présence en tant qu'être est infinie, et la durée de son existence éternelle. Pour Dieu l'application de la continuité de l'existence est facile, car Dieu par définition est le tout, et le tout est inchangé. Il inclut en lui son devenir à sa totalité, toutes ses possibilités d'être. Mais pour la continuité des êtres créés le problème persiste, comment définir la durée de la continuité de l'être en tant qu'être sans identifier ce qui ne change pas dans l'être et qui le détermine en tant que tel? On note ce défaut dans la réponse de Newton « la durée qui s'est écoulée depuis le début de son existence ». Le fait de traiter l'existence quantitativement n'enlève rien au problème du devenir qui inclut ici celui de l'origine.

Néanmoins, l'auteur sent le besoin par la suite d'exprimer son positionnement par rapport à un autre aspect de la continuité, celui formulé par le problème de l'infini. Newton adhère ici entièrement à la solution aristotélicienne. La divisibilité à l'infinie est un problème mathématique abstrait et non pas un problème physique, réel. Cette petite parenthèse sur l'infini était jugée nécessaire par l'auteur surtout sur la question de la divisibilité ou la non divisibilité de Dieu. Puisqu'il fait des analogies entre Dieu et ses créations, il nous faut nous aussi faire la part des choses.

Newton pose son cadre. Il nous parle du rapport entre les êtres le temps et l'espace. Il nous dit que la durée restera la même indépendamment de la durée individuelle de chaque être. Le cadre du temps absolu est établi. Le pas vers la *définition* du temps absolu qui coule uniformément sans avoir aucune relation à rien d'extérieur est franchi. Il fait d'ailleurs de même pour l'espace tout en développant cette idée de la durée :

« (...), je suppose que l'espace est donné comme une chose distincte du corps »<sup>146</sup>, « l'espace s'étend à l'infini de tous côtés »<sup>147</sup>, « Enfin l'espace a une durée éternelle et une nature immuable, et ce, parce qu'il est l'effet émanant d'un être éternel et immuable ; Si jamais l'espace n'avait pas existé, alors Dieu n'aurait été présent nulle part ; et par conséquent, ou bien il aurait créé ensuite l'espace (où lui-même n'était pas) ou bien – ce qui ne choque pas moins la raison- il aurait sa propre ubiquité. De plus, bien

---

<sup>146</sup> Newton I. (1995), *De la Gravitation, suivi de Du Mouvement des corps*, Paris : Gallimard, 113.

<sup>147</sup> Ibid., 125.

que peut-être nous puissions imaginer qu'il n'y ait rien dans l'espace, nous ne pouvons cependant pas penser que la durée n'existe pas même s'il était possible de concevoir qu'absolument rien ne dure. Cela est rendu manifeste par les espaces hors du monde dont nous ne pouvons pas penser qu'ils n'existent pas (lorsque nous imaginons que le monde est fini), bien qu'ils ne nous aient pas été révélés par Dieu, qu'ils ne soient pas connus par les sens et qu'ils ne dépendent pas, pour leur existence, des espaces intérieurs au monde. Mais on croit d'ordinaire que ces espaces ne sont rien. Pourtant, ce sont des espaces. Même si l'espace est vide de corps, il n'est cependant pas vide de lui-même. Il y a quelque chose, parce qu'il y a des espaces même s'il n'y a rien d'autre. Bien plus, il faut reconnaître que les espaces ne sont pas plus espaces là où le monde existe que lorsqu'il n'est pas, à moins peut-être de dire que Dieu, en créant le monde dans notre espace, a en même temps créé l'espace en soi ou qu'en annihilant ensuite le monde dans ces espaces, il annihilerait aussi les espaces en eux-mêmes. C'est pourquoi, tout ce qui a plus de réalité dans un espace que dans un autre, appartient à un corps et non à l'espace ; de même cela sera plus clairement évident si l'on abandonne le préjugé puéril et issu de l'enfance selon lequel l'étendue est inhérente au corps comme un accident dans un sujet sans lequel il ne peut pas exister véritablement. »<sup>148</sup>

L'espace comme le temps sont les effets qui trouvent leurs origines en Dieu qui, lui, est éternel, immuable et omniprésent. Newton nous invite à quitter toute idée d'individualité de la durée et de l'étendue en tant qu'existences dépendantes des choses. Le temps et l'espace existent indépendamment des choses sensibles ; ce n'est pas parce qu'il y a être qu'il y a durée et étendue. La durée et l'étendue de l'être sont leurs caractéristiques quantitatives mais la durée ou le temps en tant que Quantité absolue existe même si rien ne dure. Barrow l'a dit en premier et Newton le confirme : la mesure du temps comme durée d'un être en tant que tel nous permet de connaître le genre de Quantité du temps. Une durée inclut dans son sein la notion de continuité. La durée d'un être signifie la persévérance dans son être. Quand cette définition s'applique à Dieu cela donne le temps absolu, c'est-à-dire la durée infinie.

---

<sup>148</sup> Ibid., 130-131.

ii. MS Add 3965 Section 13, folios 541<sup>r</sup> – 542<sup>r</sup> et 545<sup>r</sup> - 546<sup>r</sup> (Fin des années 1690)

Concernant le deuxième passage présenté ici, il s'agit des manuscrits MS Add 3965 Section 13, folios 541<sup>r</sup> – 542<sup>r</sup> et 545<sup>r</sup> - 546<sup>r</sup> qui se trouvent actuellement à la Bibliothèque Universitaire de Cambridge. Ces manuscrits ont été portés à l'attention de la communauté des philosophes et historiens des sciences pour la première fois par McGuire J.E. en 1978 dans son article *Newton on place, time and God : an unpublished source*<sup>149</sup>. La date de ce manuscrit a été déterminée par McGuire vers la fin des années 1690. Cette période correspond à la révision de la première version publiée des *Principia* en 1687. Le manuscrit en question représente une partie de cette révision. Les idées formulées dans ce manuscrit font le lien entre le *De la Gravitation* et la Scolie Générale dans sa version finale de la troisième édition des *Principia*. McGuire présente dans son article une version manuscrite prenant en compte les deux manuscrits mentionnés plus haut. Le premier, étant en grande partie rayé par Newton et le deuxième étant une révision du premier. Ce manuscrit, dans sa forme finale, commence ainsi :

« Le Temps et le Lieu (*Locus*) sont des affections communes de toute chose sans lequel rien ne peut exister. Toutes les choses sont dans le temps en ce qui concerne la durée de l'existence, et dans l'emplacement en ce qui concerne leur amplitude de présence.

Le Temps et le Lieu par eux mêmes ne relèvent pas des sensations, mais ils sont mesurés au moyen de choses sensibles, comme les grandeurs des corps, de leurs positions, des mouvements locaux, et de tout changement effectué uniformément. Et le vulgaire considère ces mesures comme si elles étaient les choses mesurées, par exemple les jours, les mois, et les années comme si elles étaient le temps (...). Mais les temps du vulgaire, à cause des inégalités des mouvements célestes sont <et elles doivent l'être><sup>150</sup> corrigées par les équations astronomiques, en sorte qu'elles correspondent aux temps vrais (...). Et sur cette base les temps vrais et les espaces sont distingués par

---

<sup>149</sup> McGuire J.E. (1978), « Newton on place, time and God : an unpublished source », in *The British Journal for the History of Sciences*, Volume XI, part 2, No 38, 114-129.

<sup>150</sup> Ses signes <> sont introduites par McGuire afin de signaler les interpolations d'un manuscrit à l'autre.

ceux qui sont vulgaires et apparents. <Car les vrais temps s'écoulent uniformément et les vrais emplacements sont égaux aux corps qui les remplissent. >

(...) la Durée d'une chose n'est pas son écoulement, ou un changement en question, mais permanence et immuabilité dans le temps qui s'écoule. Toutes choses persistent autant qu'elles restent les mêmes en tout temps <La durée de chaque chose s'écoule, mais > sa substance <immuable > ne s'écoule pas, mais elle demeure toujours la même. »<sup>151</sup>

Newton répète ici l'idée que le temps et l'espace, ou le lieu, sont des affectations, mais cette fois-ci des affectations communes. McGuire nous dit qu'au XVII<sup>e</sup> siècle, il n'y a pas un point de vue unique parmi les savants de ce que peuvent être les affectations communes en question. Leurs significations varient comme varie le nombre de savants qui les utilisent<sup>152</sup>. Ces affectations étant communes, elles en deviennent donc universelles. McGuire nous propose de voir ici l'universalité des affectations comme les caractéristiques ontologiques relatives aux choses<sup>153</sup>. Nous avons défini plus haut, avec Barrow, le terme affectation comme utilisé par Newton dans le *De la Gravitation* comme une Quantité absolue. Sur ce point il est intéressant de voir aussi l'interprétation de Samuel Clarke. En 1713 Samuel Clarke, théologien britannique, ami proche de Newton et porte parole de la défense de son œuvre, commence une correspondance avec Joseph

---

<sup>151</sup> Ibid., 117. Trad pers. de la traduction anglaise du texte latin par McGuire J.E. :

« Time and Place are commun affections of all things without which nothing whatsoever can exist. All things are in time as regards duration of existence, and in place as regards amplitude of presence. And what is never and nowhere is not in *rerum natura*.

Time and Place in themselves do not fall under senses, but are measured by means of sensible things, such as magnitudes of bodies, their positions, local motions, and any changes uniformly made. And the vulgar take these measures to be the things measured, for example days, months, and years to be times, (...) But the times of the vulgar, because of the inequalities of celestial motions are <and have to be > corrected by astronomical equations, in order to correspond to the true times, (...) And on these grounds true times and places are distinguished from those vulgar and apparent ones. <For true times flow uniformly and true places are equal to the bodies filling them.>

(...) the Duration of a thing is not its flow, or any change, but permanence and immutability in flowing time. All thnigs endure in so far they remain the same at any time <The duration of each thing flows, but> its <enduring> substance does not flow, and is not changed with repsect to before and after, but always remains the same.»

<sup>152</sup> McGuire J.E. (1978), « Existence, Actuality and Necessity: Newton on Space and Time », in *Annals of Science*, 35, 465.

<sup>153</sup> Ibid., 466.

Butler, théologien et moraliste anglais, au sujet de la démonstration de l'existence de Dieu<sup>154</sup>. Lors de cet échange, Clarke traite le rapport établi par Newton entre Dieu, ses créations, le temps et l'espace. Dieu est la seule substance qui existe par elle-même. Ce n'est pas le cas du temps et de l'espace comme il le dit dans sa lettre du 10 Décembre 1713:

« *L'Espace* est une Propriété [ou un *Mode*] de la Substance Auto existante; mais non pas de toute autre Substance. Toutes les autres *Substances* sont *DANS l'Espace*, et elles sont *pénétrées par lui* ; mais la Substance Auto existante n'est pas *DANS l'Espace*, ou *pénétré par lui*, mais elle est elle-même (si je peux m'exprimer ainsi) le *Substrat* de *l'Espace*, le *Fondement* de l'Existence de *l'Espace* et de la *Durée en soi*. Lesquels [*l'Espace et la Durée*] étant évidemment *nécessaires*, sans pourtant d'être Eux-mêmes *Substances*, mais *Propriétés ou Modes* ; ceci montre de toute évidence que la *Substance*, sans laquelle ses Modes n'aurait pas pu subsister, est en soi *beaucoup plus* (si cela était possible) *Nécessaire*. Et comme *l'Espace* et la *Durée* sont *indispensables (needful)* (i.e. *sine qua non*,) à l'Existence de *toute autre chose* ; ainsi par conséquent est la *Substance*, à laquelle *Ces Modes* appartiennent de cette manière *particulière* que j'ai mentionnée antérieurement. »<sup>155</sup>

L'affectation est définie dans cette citation comme Propriété ou Mode d'être, et elle est réservée en tant que telle à la Substance ultime, à Dieu. Alors que toute autre substance, comme création de la Substance absolue, est considérée dans son existence dans l'espace et dans le temps. De cette manière l'affectation dans son universalité en tant qu'affectation commune de toute chose est mise en doute. Elle est vue comme un Mode d'être de La Substance, ou comme une caractéristique ontologique des autres

---

<sup>154</sup> Frank Ad. (1875), *Dictionnaire des sciences philosophiques*, Paris : Hachette, 225.

<sup>155</sup> Clarke S. (1738), *The Works of Samuel Clark D.D.*, London : Printed for John and Paul Knapton in Ludgate-Street, Vol. II, 745-746. Trad. pers.:

« *Space*, is a Property [*or Mode*] of the Self-existent Substance; but not of any other Substances. All other *Substances* are *IN Space*, and are *penetrated by it*; but the Self-existent Substance is not *IN Space*, nor *penetrated by it*, but itself (if I may so speak) the *Substratum* of *Space*, the *Ground* of the Existence of *Space* and *Duration itself*. Which [*Space and Duration*] being evidently *necessary*, and yet Themselves not *Substances*, but *Properties or Modes*; show evidently that the *Substance*, without which these Modes could not subsist, is itself *much more* (if that were possible) *Necessary*. And as *Space* and *Duration* are *needful*, (i.e. *sine qua non*,) to the Existence of *every thing else*; so consequently is the Substance, to which *These Modes* belong in that peculiar manner which I before mentioned.»

substances ; elle est pourtant absolument nécessaire. Cette nécessité souligne la nécessité de l'existence de Dieu. Puisque le temps et l'espace ont leur origine en Dieu, et sont des caractéristiques ontologiques des substances créées, l'existence de Dieu devient une nécessité indispensable.

Étant d'origine divine, le temps et l'espace ne peuvent pas être sujets du sensible, au moins dans leur absoluité. Leur mesure pourtant relève directement de l'observation sensible. Quand la mesure du temps s'identifie avec le temps lui-même c'est là que l'esprit vulgaire commet l'erreur dont Newton nous parle dans la Scholie qui suit les définitions.

Ce que Newton a manqué de faire dans le *De la Gravitation*, il ne manque pas de le faire ici. Nous avons mentionné plus haut le manque de détermination de la chose qui reste inaltérée durant l'existence de l'être, afin de pouvoir parler de la permanence de l'être en tant qu'être. Ici Newton le définit : il nous dit que c'est la substance de l'être qui reste immuable. La partie que l'être partage avec son créateur.

iii. Scholie des Définitions.

« SCHOLIE

Je viens de faire voir le sens que je donne dans cet Ouvrage à des termes qui ne sont pas communément usités. Quant à ceux de temps, d'espace de lieu et de mouvement, ils sont connus de tout le monde ; mais il faut remarquer que pour n'avoir considéré ces quantités que par leurs relations à des choses sensibles, on est tombé dans plusieurs erreurs. »<sup>156</sup>

La volonté de Newton n'est pas orientée vers une définition du temps. Les définitions données au début des *Principia* concernent les notions nouvelles que Newton utilisera dans sa théorie, mais le temps est une notion ancienne, et elle porte en elle une charge lourde de significations surtout philosophiques. Dans son ouvrage *De la gravitation*, avant de définir le lieu, le corps, le repos et le mouvement, il écrit une phrase similaire:

---

<sup>156</sup> Newton I. ([1756] 1759), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, par feu Madame la Marquise du Chastellet, Paris : Chez Desaint & Saillant..., Lamnert..., Livre I, 7.

« Les noms de quantité, de durée (temps) et d'espace sont trop connus pour pouvoir être définis par d'autres mots »<sup>157</sup>. Et malgré tout, il juge nécessaire de préciser, pour éviter toute erreur possible d'interprétation, comment il faut réellement les concevoir en réintroduisant, voir même en réinventant des définitions nouvelles. Son objectif était donc de s'éloigner des idées de temps, de lieu et de mouvement, vus par le prisme du sensible. Le temps, ou la durée ne dépend pas de l'existence ou de la non existence des êtres.

« Pour les éviter (les erreurs) il faut distinguer le temps, l'espace, le lieu, le mouvement, en absolus et relatifs, vrais et apparents, mathématiques et vulgaires.

I. 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. »<sup>158</sup>

Il faut souligner ici que la référence au temps absolu de Newton comme « l'horloge universelle », une notion utilisée couramment dans le monde des physiciens, ne se trouve pas dans les *Principia*. C'est Laplace qui l'a introduite vers la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. De plus dans cette « définition » du temps, nous constatons une séparation entre « temps absolu, vrai et mathématique », et « temps relatif, apparent et vulgaire » (le temps mesuré, perçu par nos sensations). Newton propose dès lors de considérer qu'il existe, sous-jacent aux notions qui nous viennent des relations aux objets sensibles, des notions absolues, en particulier un temps absolu, vrai et mathématique. Celui-ci s'oppose au temps du vulgaire, la mesure du temps prise pour le temps absolu lui-même. Penser au temps absolu de Newton, c'est penser au temps comme s'il existait une horloge cosmique qui rythmerait la vie de l'univers (d'où l'idée de l'horloge universelle).

---

<sup>157</sup> Newton I. (1995), *De la Gravitation, suivi de Du Mouvement des corps*, Paris : Gallimard, 112.

<sup>158</sup> Newton I. ([1756] 1759), Livre I, 8.

Cette *définition* du temps absolu comme *durée* fait apparaître un paradoxe. Admettons qu'elle soit vraie, que nous soyons tombés dans plusieurs erreurs en considérant le temps par sa relation aux choses sensibles. Supposons que le fait que le temps coule uniformément soit lié à la tradition galiléenne, à la relation intrinsèque entre temps et mouvement, et aussi au fait que Newton a besoin d'une grandeur continue qui se meut à une vitesse uniforme. Newton suit l'exemple du temps mathématique comme exprimé dans les Lectures Géométriques de Barrow. Ce dernier nous invite dans ses lectures à considérer comme temps le mouvement uniforme d'un corps, résultat d'une force constante qui agit sur lui de manière continue. Si l'on veut par la suite mesurer le mouvement d'un autre corps nous n'avons qu'à le comparer à celui-ci.

Mais il y a quand même un problème à surpasser... S'il est vrai que le temps est la durée, Newton fait l'hypothèse que la durée existe séparément des choses sensibles. Dans ce cas-là, il faudrait une explication de ce qu'est précisément cette durée en dehors des choses sensibles. C'est avec les sensations que nous pouvons considérer une durée. S'il y a une notion liée au sensible, c'est bien celle de la durée et non pas celle du temps. Pour pouvoir concevoir une durée, aussi grande ou petite soit-elle, il nous faut une mémoire. Sans mémoire, les instants successifs ne peuvent pas être enregistrés pour représenter la durée. Sans mémoire, chaque instant reste indépendant d'un autre et toujours au présent. Et ce présent devient un instant. En allant plus loin, si l'instant est une partie infiniment petite du temps, cela veut dire que cette partie a une durée infiniment petite qui doit être représentée etc. etc... Et il est évident que l'instant est considéré par Newton comme partie du temps et non pas comme une limite extérieure à celui-ci comme dans l'œuvre galiléenne.

Faisons une expérience de pensée. Imaginons-nous dans un espace géométrique unidimensionnel. Dans cet espace on perçoit un instant comme un seul point d'une ligne droite existante. Dans ce cas, l'instant qui existe au présent est représenté par le point, la durée par un segment et le temps par une ligne droite. Imaginons maintenant que nous n'ayions pas de mémoire. Nous ne percevrions ainsi qu'un seul point. Dans tous les cas, si nous ne percevons qu'un seul point et si nous sommes incapables de percevoir le segment ou la ligne, nous sommes dans l'impossibilité de percevoir la durée ou le temps. Et même en suivant cette représentation reste toujours le problème de la *définition* du temps vrai comme durée. Car si le temps dans notre schéma imaginaire est une ligne



droite et le temps est la durée, cela veut dire que la durée est la ligne droite. Image contradictoire par définition puisqu'une ligne droite n'a ni début ni fin. La durée quant à elle induit par définition la notion de limite (début et fin). Et pourtant c'est ce que Newton nous invite à admettre. Le temps absolu est la durée infinie. La durée suivie par l'adjectif *infinie* est une incohérence selon notre définition de la durée. À ce point, on ne peut faire qu'une seule hypothèse : si Newton insiste autant sur le terme *durée*, c'est parce que de notre expérience sensible nous ne pouvons observer que des durées. Nous n'avons que l'expérience de la durée, nous mesurons des durées. Le temps est une Quantité absolue. La mesure du temps nous donne une information sur le genre de cette Quantité. Puisqu'on mesure des durées, le temps en tant que Quantité absolue est du genre de la durée, mais étant d'origine divine il ne peut être qu'infini, à l'image de Dieu, son origine.

Platon définissait le temps dans le *Timée* comme l'image mobile de l'éternité immobile. Newton définit le temps comme la durée infinie. Cette durée infinie, d'un corps qui se meut uniformément sous l'action d'une force constante, est l'éternité. Dans les *Principia*, Newton ne se contente pas de la description des phénomènes naturels avec l'introduction des forces, il introduit une nouvelle notion d'éternité : l'éternité dynamique. L'éternité se met en mouvement.

Cette distinction entre temps absolu et temps relatif a été traitée par un grand nombre de commentateurs des *Principia*. Berkeley résumera cette idée en disant que :

« (Newton) suppose que ces quantités ont une existence hors de l'esprit ; et qu'elles sont ordinairement conçues en relation avec les choses sensibles, avec lesquelles néanmoins elles ne soutiennent, en leur nature propre, aucune relation. »<sup>159</sup>

Cependant le principe du temps comme durée fonctionne très bien dans la théorie newtonienne. Si l'on regarde rapidement à titre d'exemple les définitions de certaines notions utilisées par Newton et liées à la notion de temps, nous voyons que ce choix est absolument justifié.

---

<sup>159</sup> Berkeley G. (1710]1889), « Traité sur les Principes de la connaissance humaine », traduit par Renouvier Ch., in *La Critique Philosophique*, Paris : Au bureau de la Critique Philosophique, § 110.

### « Définition VII

La quantité accélératrice de la force centripète est proportionnelle à la vitesse qu'elle produit dans un temps donné »<sup>160</sup>

La quantité accélératrice et la vitesse dont nous parle Newton dans la définition VII nécessitent toutes deux une connaissance et une mesure de la durée. Ces deux grandeurs sont ainsi liées au temps, de sorte qu'il faut entendre par force centripète, la force responsable du mouvement, soit une quantité dépendante du temps. La quantité accélératrice est liée au temps par le fait qu'elle produit une variation de vitesse dans un temps donné, le temps étant entendu au sens de « durée ». Comme Michel Blay le souligne très bien :

« Il semble donc raisonnable de comprendre qu'il est question dans cette Définition d'augmentation de la vitesse plutôt que de taux d'augmentation, et que la quantité accélératrice doit simplement être considérée comme proportionnelle, le temps étant donné ou fixé, à la vitesse engendrée pendant ce temps. »<sup>161</sup>

Pour Newton cette accélération est donc une quantité proportionnelle au changement de vitesse dans un temps donné. Dans l'extrait de Michel Blay cité ci-dessus la notion de vitesse dans l'œuvre newtonienne semble être proche de celle de l'œuvre galiléenne. Cette vitesse engendrée pendant une durée prédéterminée est proche de ce que Pierre Souffrin appelle la « vitesse holistique ». Cependant, selon Souffrin nous pouvons aisément parler de « vitesse instantanée » dans l'œuvre de Newton (et post newtonienne). Souffrin fait bien la différence entre la « vitesse holistique » et la « vitesse instantanée ». La « vitesse holistique » est celle que nous avons vue dans la partie 1. de ce chapitre lors de notre étude du temps comme *paramètre* de description dans l'œuvre de Galilée. La notion d'« holistique » peut également s'appliquer au temps, comme à la vitesse, puisqu'on parle des *paquets* de temps, et de vitesses dans l'œuvre galiléenne. La vitesse instantanée, et l'instant comme limite interne du temps selon Souffrin, n'est possible que grâce à « (...) l'outillage du calcul infinitésimal, qui ne sera élaboré que par

---

<sup>160</sup> Newton I. ([1756] 1759), Livre I, 5.

<sup>161</sup> Blay M. (1995), *Les « Principia » de Newton*, Paris : PUF, 45. Voir aussi Blay M. (1999), *La naissance de la science classique au XVIIIe siècle*, Paris : Nathan univ., 94.

Leibniz, Newton et leurs contemporains, (...) »<sup>162</sup>. Afin d'appuyer cette idée Souffrin écrit :

« Une remarquable naïveté scientifique semble avoir incité les historiens à considérer le concept de « vitesse holistique » comme simple et trivial, et la mathématisation de celui de « vitesse instantanée » en termes de dérivée de l'espace par rapport au temps comme la seule mathématisation correcte possible. En fait, les historiens des sciences (et de la philosophie) traduisent systématiquement « velocitas » par « vitesse » entendue dans l'un de sens que le mot revêt actuellement en cinématique et cela, quelque soit l'époque du texte étudié. Or, le cadre dans lequel nous pensons actuellement la cinématique théorique est celui de la tradition consécutive à sa reformulation en termes de concepts de l'analyse infinitésimale, (...) dans cette tradition, le concept central désigné par « velocitas » sans qualification est celui de « vitesse instantanée »,<sup>163</sup>

Ce constat dévoile un changement de significations de concepts très important. Pour pouvoir considérer une vitesse instantanée, nous avons besoin d'abandonner l'idée de l'instant comme limite extérieure du temps et de l'intégrer dans le temps. À partir du moment où l'on considère l'instant comme élément temporel, il acquiert une durée qui lui correspond, même si cette durée est minime, ou infiniment petite comme nous dit Newton. La durée ainsi doit être comprise, si l'on suit la réflexion de Pierre Souffrin, comme un temps donné dont les instants sont des limites internes. La relation entre temps, durée et instant va se compliquer à l'époque de Newton mais c'est un sujet que nous aborderons ultérieurement.

Dans la définition suivante, le temps persiste dans son statut de durée comme définie ci-dessus :

#### « Définition VIII

La quantité motrice de la force centripète est proportionnelle au mouvement qu'elle produit dans un temps donné. »<sup>164</sup>

---

<sup>162</sup> Souffrin P. (2012), *Écrits d'histoire des sciences*, Paris : Les Belles Lettres, 119.

<sup>163</sup> Ibid., 162. Voir aussi dans le même ouvrage les pages : 187, 195-196, 200, 228, 239-240.

<sup>164</sup> Newton I. ([1756] 1759), Livre I, 6.

Nous remarquons ici (comme dans la définition VII) que la notion de proportion semble jouer le même rôle que dans l'œuvre galiléenne. De plus le temps est également *donné*, ce qui veut dire qu'il est déterminé, fixé, prévu, ou pour être plus précis qu'il s'agit non pas d'un temps mais d'une durée déterminée. Mais ce n'est pas pour autant que l'on peut identifier les deux durées. Elles ont une différence qualitative. En ce qui concerne la durée galiléenne l'instant est une limite externe et dans la durée de Newton l'instant est une limite interne. Dans les deux cas la durée est déterminée par le physicien. Nous parlons bien de durée et non pas de temps. La durée ici n'est pas celle du temps absolu mais celle du temps mesuré. Newton un peu plus loin dans la Scholie des définitions nous parle de la distinction entre ces deux durées : celle du temps absolu et celle du temps relatif.

« On distingue en astronomie le temps absolu du temps relatif par l'*équation du temps*. Car les jours naturels sont inégaux, quoiqu'on les prenne communément pour une mesure égale du temps ; et les Astronomes corrigent cette inégalité, afin de mesurer les mouvements célestes par un temps plus exact.

Il est très possible qu'il n'y ait point de mouvement parfaitement égal, qui puisse servir de mesure exacte du temps ; car tous les mouvements peuvent être accélérés et retardés, mais le temps absolu doit toujours couler de la même manière.

La durée ou la persévérance des choses est donc la même, soit que les mouvements soient prompts, soit qu'ils soient lents, et elle serait encore la même, quand il n'y aurait aucun mouvement, ainsi il faut bien distinguer le temps de ses mesures sensibles, et c'est ce qu'on fait par l'équation astronomique. La nécessité de cette équation dans la détermination des phénomènes se prouve assez par l'expérience des horloges à pendule, et par les observations des éclipses des satellites de Jupiter.

L'ordre des parties de l'espace est aussi immuable que celui des parties du temps ; car si les parties de l'espace sortaient de leur lieu, ce serait, si l'on peut s'exprimer ainsi, sortir d'elles-mêmes. Les temps et les espaces n'ont pas d'autres lieux qu'eux-mêmes, et ils sont les lieux de toutes les choses. Tout est dans le temps, quant à l'ordre de la succession : tout est dans l'espace, quant à l'ordre de la situation. C'est là ce qui détermine leur essence, et il serait absurde que les lieux primordiaux se mussent. Ces

lieux sont donc les lieux absolus, et la seule translation de ces lieux fait les mouvements absolus. »<sup>165</sup>

L'équation du temps nous dit Newton, c'est à dire la correction des inégalités du mouvement apparent du soleil, nous permet de créer une approximation du temps absolu. De cette manière nous pouvons utiliser cette approximation comme référence pour la mesure des mouvements célestes. Il avoue par la suite qu'aucun mouvement naturel régulier ne peut représenter le temps absolu. Ce mouvement de régularité parfaite n'existe pas dans la nature. Une conclusion tout à fait pertinente vu l'origine divine de temps absolu et de sa non relation au monde sensible. Cette équation du temps comme approximation du temps absolu est nécessaire nous dit Newton. Le temps absolu est représenté par un mouvement uniforme dont les parties sont immuables. Si l'on veut ainsi représenter le temps absolu par un mouvement uniforme autre que le mouvement apparent du soleil on peut utiliser les Horloges à Pendule. Pour que les parties exprimées de l'Horloge à Pendule soient immuables, à l'image du temps absolu, il faut que cette Horloge soit isochrone. Et pour définir les parties du temps qui seront représentées par l'Horloge, l'équation du temps est nécessaire. L'équation du temps est ainsi une approximation du temps absolu, et les parties du temps données par le mouvement oscillatoire du Pendule d'une Horloge, la représentation de cette approximation.

#### iv. Scholie Générale.

L'approximation du temps absolu est réalisée. Mais l'exploration du temps absolu ne s'arrête pas là. Comme dans son ouvrage *De la Gravitation* Newton ressent le besoin de la mise en rapport entre Dieu, l'espace et le temps. Restant fidèles à l'idée du désir ultime de Newton de rendre le Créateur et la totalité de la création intelligibles à l'entendement humain, nous allons voir de plus près la mise en place de ce rapport dans la Scholie Générale. « Newton était intimement persuadé de l'existence d'un Dieu, et il entendait par ce mot, non seulement un Être infini, tout puissant, éternel et créateur, mais un maître qui a mis une relation entre lui et ses créatures ; car, sans cette relation, la connaissance d'un Dieu n'est qu'une idée stérile (...) Toute la philosophie de Newton

---

<sup>165</sup> Newton I. ([1756] 1759), Livre I, 10.

conduit nécessairement à la connaissance d'un Être suprême, qui a tout créé, tout arrangé librement. Car, si selon Newton (et selon la raison) le monde est fini, s'il y a du vide, la matière n'existe donc pas nécessairement, elle a donc reçu l'existence d'une cause libre. »<sup>166</sup> nous dit Voltaire. Ce que Newton lui-même confirme dans cette Scholie.

« Il (Dieu) est éternel et infini, tout-puissant, et *omniscient*, c'est-à-dire qu'il dure depuis l'éternité passée et dans l'éternité à venir, et qu'il est présent partout dans l'espace infini : il régit tout ; et il connaît tout ce qui est et tout ce qui peut être. 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 il est présent ; il dure toujours et il est présent partout ; il est existant toujours et en tout lieu, il constitue l'espace et la durée.

Comme chaque particule de l'espace existe toujours, et que chaque moment indivisible de la durée dure partout, on ne peut pas dire que celui qui a fait toutes choses et qui en est le Seigneur n'est *jamais* et *nulle-part*. Toute âme qui sent en divers temps, par divers sens, et par le mouvement de plusieurs organes, est toujours une seule et même personne indivisible.

Il y a des parties successives dans la durée, et des parties coexistantes dans l'espace ; il n'y a rien de semblable dans ce qui constitue la personne de l'homme ou dans son principe pensant ; et bien moins y en aura-t-il dans la substance pensante de Dieu. Tout homme, en tant qu'il est un Être sentant, est un seul et même homme pendant toute sa vie et dans tous les divers organes de ses sens. Ainsi Dieu est un seul et même Dieu partout et toujours. Il est présent partout, non seulement *virtuellement*, mais *substantiellement*, car on ne peut agir où l'on n'est pas. Tout est mu et contenu dans lui, mais sans aucune action des autres êtres sur lui. Car Dieu n'éprouve rien par le mouvement des corps : et sa toute présence ne leur fait sentir aucune résistance, il est évident que le Dieu suprême existe nécessairement : et par la même nécessité il existe partout et toujours. (...) Nous le connaissons seulement par ses propriétés et ses attributs, par la structure très sage et très excellente des choix, et par leurs causes finales ; nous l'admirons à cause de ses perfections ; nous le révérons et nous l'adorons à cause de son empire, nous l'adorons comme soumis, car un Dieu sans providence sans empire et sans causes finales, n'est autre chose que le destin et la nature ; la nécessité

---

<sup>166</sup> Voltaire (1879), « Éléments de la philosophie de Newton », in *Œuvres Complètes de Voltaire*, Paris : Frères Garnier, Tome 22, 403.

métaphysique, qui est toujours et partout la même, ne peut produire aucune diversité, la diversité ; qui règne en tout, quant au temps et aux lieux, ne peut venir que de la volonté et de la sagesse d'un Être qui existe nécessairement. »<sup>167</sup>

Il semble indispensable pour Newton de définir Dieu avant de définir l'existence de toute chose dans le temps et dans l'espace. L'existence de Dieu même se définit par l'existence infinie du temps et de l'espace. Dieu doit exister quelque part. L'existence de Dieu est ainsi une condition nécessaire dans le système du monde conçu par Newton. Dieu est unique, un et seul. Dieu est une substance et non pas une image virtuelle, tout en étant un agent actif. Il se met en relation avec les êtres mais cette relation est à sens unique. Il a accès à tout ce qui est être mais les êtres n'ont pas accès à tout ce qui est Dieu. Même si Dieu possède toute sensation, comme celles des êtres, il les possède de manière différente des êtres. De cette façon il a accès à toute sensation des êtres, c'est pour cela qu'il est partout et qu'il sait tout. Contrairement aux êtres qui selon Newton n'ont aucun accès à lui, ni par leurs sensations ni par leur intelligence. C'est un Dieu invariant et indépendant des êtres. Les êtres peuvent avoir des idées sur ses attributs mais aucune concernant sa substance. Pourtant elle existe, nécessairement. Cette nécessité est évidente pour Newton. *Dieu existe* est une phrase admise à priori par lui, et elle est d'une nécessité irréfutable pour soutenir sa théorie. Si le désir ultime de Newton est de rendre Dieu et sa création intelligibles à l'esprit humain, la seule manière de faire, puisque l'humain n'a pas accès à tout ce qu'est Dieu en tant que Substance, est d'étudier ses attributs, ses propriétés, ses façons d'être. La seule condition de l'existence des êtres est d'exister dans le temps et dans l'espace. Il est ainsi pour Dieu et pour ses créations. Le temps et l'espace absolus n'ont aucun sens pour Newton si on les traite indépendamment de Dieu. L'idée de Dieu occupe une place primordiale dans la pensée newtonienne.

Nous avons vu jusqu'ici le lien intrinsèque entre la notion du temps absolu et l'idée d'un Dieu comme Substance absolue et les différents aspects du terme affectation, concernant la détermination du rapport du temps absolu avec Dieu et avec les êtres créés. Comment peut-on effectuer une approximation de ce temps absolu faisant usage des phénomènes sensibles ? Comment le temps absolu comme durée infinie de mouvement uniforme

---

<sup>167</sup> Newton I. ([1756] 1759), Livre II, 175-177.

induit-il une éternité mobile, une éternité dynamique jusqu'ici alors considérée comme immobile ? Nous avons clarifié le paradoxe du temps appelé durée par Newton dans ses principes, avec un usage au sein de la théorie qui facilite les opérations mathématiques et les définitions des quantités en tant que telles. Mais l'existence du temps absolu ne semble pas être acceptée par une partie des contemporains de Newton car elle présuppose une idée de la Substance première assez particulière. C'est grâce à cette idée que le temps peut être absolu et perdre toute relativité dans son absoluté. Nous allons ainsi voir par la suite comment la traductrice des *Principia* de Newton, une savante du XVIIIe siècle hors pair, critique l'existence du temps absolu ou du temps comme principe fondamental de l'existence des êtres. Dans un texte qui a comme objectif le mariage des philosophies qui lui sont contemporaines, la Marquise du Chatelet parle de la notion de temps. L'ouvrage en question s'intitule *Les Institutions de physique*.

#### 5. Marquise du Chatelet, une critique du temps absolu.

À ce point, nous allons faire appel à une œuvre importante, celle de la femme qui a entrepris la traduction des *Principia* en français en 1745, Madame du Châtelet. Son amour pour les sciences - et pour Voltaire - est bien connu. Les faits historiques attestent d'un travail des deux amants sur la science de la Physique et de la Métaphysique entre 1735 et 1739. L'exil de Voltaire en Angleterre de 1726 à 1729 a fait qu'à son retour en France, il n'est plus le même. Il devient grand supporteur des idées de Newton et c'est grâce à lui, et à son travail de vulgarisation, que l'œuvre de Newton se fait connaître du public français. Les quatre ans de travail commun des deux amants étaient fortement centrés sur les idées nouvelles de Newton. Cette petite introduction a comme objectif, en ce qui nous concerne ici, de souligner un fait : quand Madame du Châtelet a écrit et publié en 1740 les *Institutions de Physique*, elle connaissait fort bien déjà l'œuvre de Newton. Les *Institutions de Physique* sont souvent considérées, à tort, comme une présentation des idées de Leibniz. Mais au contraire :

« Elle pense pouvoir écrire une synthèse entre les systèmes de Descartes, Leibniz et Newton en se plaçant au-dessus des querelles »<sup>168</sup>

---

<sup>168</sup> «Madame du Châtelet», fiche pédagogique réalisée par Caroline Doridot, sous la direction d'Anne Zali pour la Bibliothèque National de France en 2006.



Il s'agit plutôt d'une unification des éléments des trois théories. Car l'objectif premier de cette femme savante était, comme noté dans l'avant-propos de son ouvrage, de rédiger un traité de connaissances physiques connues à son époque pour l'éducation scientifique de son fils. Dans ce traité, il y a un chapitre fort intéressant consacré au temps (Chapitre VI, *Du temps*) que nous allons exposer par la suite comme le résultat d'une étude approfondie de la notion de temps dans les œuvres d'auteurs qui lui sont contemporains. Pour Mme du Châtelet, le Temps n'est qu'un être abstrait, né de la succession de nos idées. Il est différent du mouvement, car le mouvement est réel contrairement au temps. Sa mesure ne peut jamais être exacte puisqu'il est né de la succession de nos idées. La vitesse de succession des idées diffère en chacun d'entre nous et selon les circonstances (d'où « *j'ai trouvé le temps bien long* »<sup>169</sup>). Cela dépend de la durée que nous allons considérer comme « *un* ». Autrement dit : il porte une certaine relativité dans sa subjectivité. Comment est-elle arrivée à cette conclusion ? Le chapitre commence avec une « analogie entre le temps et l'espace ». Jusqu'ici rien d'étonnant, puisque dans toute œuvre de physique mathématisée, que ce soit celle de Galilée (comme nous l'avons dans la partie I. de ce Chapitre) ou celle de Newton (au moins dans la première partie des *Principia*) la spatialisation du temps semble nécessaire.

« ...dans l'Espace, on considère simplement l'ordre des coexistants, en tant qu'ils coexistent, et dans la durée, l'ordre des choses successives, en tant qu'elles se succèdent, en faisant abstraction de toute autre qualité interne que la simple succession. »<sup>170</sup>

Ci-dessus on voit que la durée est également identifiée au temps, mais il y a un élément nouveau qui s'y ajoute, celui de la « *qualité interne* ». Il s'agit ici, d'un côté, de la détermination interne des êtres, ou des choses qui se succèdent, et d'un autre côté, des causes de la naissance de cette succession. Tout d'abord, l'auteur nous dit que l'on considère le temps en tant que l'ordre de la succession des choses. À la suite au §95 elle note à côté du texte dans le marge une phrase très provocatrice :

« L'idée ordinaire que l'on se fait du Temps est fausse »<sup>171</sup>

---

<sup>169</sup> Du Chatelet E. (1740), *Institutions de Physique*, Paris : Chez Prault fils, Chapitre VI (*Du Temps*), source Gallica BNF, §113, je me suis permise de transformer le texte de sa forme ancienne à sa forme moderne pour une lecture plus aisée.

<sup>170</sup> Ibid. §94.

De prime abord, on observe une cohérence avec Newton qui nous a expliqué que ce que l'on pense du temps ordinairement dans l'expérience commune ne peut induire que des erreurs à son sujet. Mais quand Newton utilise cette phrase, c'est pour nous signaler le danger d'étudier le temps sous le prisme du sensible, si l'on veut en trouver une définition vraie et surtout mathématique. Ici on voit qu'il s'agit d'un autre problème de la définition du temps.

« On considère ordinairement le Temps de même que l'Espace sous une image produite par des idées confuses : ainsi, on se le figure comme un Être composé de parties continues, successives, qui coule uniformément, qui subsiste indépendamment des choses qui existent dans le Temps, qui a été dans un flux continu de toute éternité, et qui continuera de même. Mais il est évident que cette notion du Temps comme d'un Être composé de parties continues et successives, qui coule uniformément, étant une fois admise, conduit aux mêmes difficultés que celle de l'Espace absolu ; c'est à dire, que selon cette notion, le Temps serait un Être nécessaire, immuable, éternel, subsistant par lui-même, et que par conséquent tous les attributs de Dieu lui conviendraient. »<sup>172</sup>

L'idée fautive que l'on se fait du temps est celle d'un temps (comme d'un Être) qui

- se compose des parties (continues et successives)
- coule uniformément (il a une vitesse constante)
- subsiste indépendamment des choses qui existent
- a été dans un flux continu de toute éternité et continuera de même

En somme, elle est en train de nous dire que l'idée fautive que l'on se fait du temps est celle que Newton nous a présentée comme le « temps vrai, absolu et mathématique » !

*« Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, et s'appelle durée. »*

Juste après, elle nous dit que le résultat d'une telle considération du temps est la création d'un Être qui a comme attributs les attributs de Dieu :

- nécessaire

---

<sup>171</sup> Ibid., §95.

<sup>172</sup> Ibid.

- immuable
- éternel
- subsistant par lui-même

Elle nous dit tout simplement que cette définition du temps nous amène à la création d'un être *divinisé*. Ce constat est très cohérent avec l'idée de Newton que le temps et l'espace émanent de Dieu etc. comme nous l'avons vu plus haut. Sa première préoccupation est de démontrer son propos.

« Le principe de la raison suffisante prouve que le Temps n'est rien hors des choses »<sup>173</sup>

Ici la Marquise utilise le principe de la raison suffisante apparu dans l'œuvre de Leibniz « *Confessio naturae* » en 1668. Il est vrai qu'au sujet du temps et de sa nature la Marquise est fortement inspirée par la réflexion leibnizienne. Ce principe philosophique affirme que «... jamais rien n'arrive sans qu'il y ait une cause ou du moins une raison déterminante, c'est-à-dire qui puisse servir à rendre raison a priori de pourquoi cela est existant plutôt que non existant et pourquoi cela est ainsi plutôt que de toute autre façon ». Leibniz a des difficultés à voir ou à imaginer ce qui pour Newton était une évidence nécessaire. Il a un point de vue radicalement différent. Pour Leibniz, il est toujours question de causalité. Parlant de ce principe, la Marquise se réfère à la discussion entre Clarke et Leibniz au sujet du temps de la création. Clarke a posé la question de savoir :

« pourquoi Dieu n'avait pas créé l'univers six mille ans plutôt, ou plus tard. »<sup>174</sup>

Leibniz répond tout simplement que si l'on fait l'hypothèse que le temps est absolu la question devient réelle et on doit reconnaître qu'il y a quelque chose qui s'est produit sans raison suffisante. Car puisque tous les instants sont égaux ce qui nous intéresse est la simple succession, et il n'y a pas de critère de préférence de cet instant plutôt que d'un autre. En ayant conservé la même succession des Êtres, la question ne se pose plus. Dieu

---

<sup>173</sup> Ibid., §96.

<sup>174</sup> Ibid.

peut avoir créé le monde n'importe quand. Mais cette considération va à l'encontre du principe de la raison suffisante.

Schopenhauer écrit en 1813 « De la quadruple racine du principe de la raison suffisante ». Selon lui, le principe est indémontrable, puisqu'il est en soi antérieur à toute démonstration. Il ne s'applique qu'à des représentations. Selon la loi de l'homogénéité logique, Schopenhauer voit la valeur universelle du principe en ce « que nous ne pouvons nous représenter aucun objet isolé et indépendant ». Mais Mme du Châtelet ne s'arrête pas là, elle va nous amener de la création du temps absolu à la naissance du temps en tant que notion abstraite.

« nous allons voir de plus, par l'analyse de nos idées, que le Temps n'est qu'un Être abstrait, qui n'est rien hors des choses, et qui n'est point par conséquent susceptible des propriétés que l'imagination lui attribue. »<sup>175</sup>

Mais pour y arriver, il nous faut d'abord voir comment on s'est formé cette idée du temps comme Être absolu. Pour considérer une succession des Êtres, il faut imaginer une suite continue d'existences qui sont dans l'impossibilité de la coexistence.

« L'existence du premier A. distincte de celle du second B. et celle du second B. distincte du troisième C. et ainsi de suite, et que nous remarquons que deux n'existent jamais ensemble ; mais que A. ayant cessé, B. lui succède, ... »<sup>176</sup>

Quand nous rapportons un Être dont l'existence persiste aux Êtres successifs, cela nous permet de dire qu'il a duré un certain temps. « On dit donc qu'un Être dure lorsqu'il coexiste à plusieurs autres Êtres successifs dans une suite continue »<sup>177</sup> L'auteur nous donne par la suite un exemple d'un corps qui se déplace dans l'espace. Ce corps emploie du temps pour parcourir telle distance quand on considère chaque point auquel il a existé distinct du suivant dans une succession d'occupations de points continus. Pour que le corps puisse exister au point 2, il faut qu'il cesse d'exister au point 1 dans une suite immédiate.

---

<sup>175</sup> Ibid.

<sup>176</sup> Ibid., §97.

<sup>177</sup> Ibid.

« Et en tant qu'on assemble ces divers existences, et qu'on les considère comme faisant un, on dit que ce Corps emploie du temps pour parcourir une ligne. »<sup>178</sup>

Ainsi arrive-t-elle à la conclusion que le Temps n'est pas réel, qu'il est tout simplement un mode de l'esprit qui compare des différentes durées des Êtres avec les mouvements (des corps célestes, terrestres, le mouvement de la succession des idées). Le temps est donc un Être abstrait. Et il est ainsi car nous arrivons à percevoir i) les Êtres en général, faire la distinction entre l'Être avec ou sans ses qualités internes, ii) la non coexistence des Êtres, iii) leur succession immédiate et continue (sans pouvoir faire exister un troisième entre deux). En somme nous arrivons à effectuer des abstractions avec notre esprit. Dans ce cas, nous avons fait abstraction des déterminations internes des Êtres et des causes qui se trouvent à l'origine de la naissance des successions. C'est pour cela qu'il nous paraît indépendant des choses et subsistant par lui-même.

« Mais comme nous pouvons aussi rendre à ces déterminations générales les déterminations particulières qui en font des Êtres d'une certaine espèce, en appliquant notre attention à la fois à leur existence successive, et à leurs déterminations particulières, il nous doit sembler que nous faisons exister quelque chose dans cet Être successif qui n'y existait point auparavant, et que nous pouvons de nouveau l'ôter sans détruire cet Être. »<sup>179</sup>

Le temps s'apparente ici à un outil. Nous pouvons l'utiliser quand il est question de la grandeur des durées, ou pour comparer les durées des Êtres, mais nous pouvons également l'ôter sans provoquer de dégâts. Le temps existe parce que les Êtres successifs existent et non pas le contraire. La place privilégiée que Newton a donnée au temps dans les *Principia* vient de lui être retirée.

« ... le Temps qui n'est que l'ordre des successions continues, ne saurait exister à moins qu'il n'existe des choses dans une suite continue ; ainsi, il y a du Temps, lorsque les choses sont et on l'ôte quand on ôte ces choses ; ... le Temps de même que l'Espace, n'est rien d'absolu hors des choses. »<sup>180</sup>

---

<sup>178</sup> Ibid.

<sup>179</sup> *ibid.*, §100.

<sup>180</sup> *Ibid.*, §103.

Pour finir Mme du Châtelet traite deux notions : l'instant et l'éternité. L'éternité ne peut être que celle de Dieu, et en ce qui concerne l'instant, elle le considère comme la seule mesure du temps qui soit universelle (puisque toute autre mesure est relative) car sa durée est connue par tous : la portion du temps qui s'écoule pendant qu'une seule idée reste dans notre esprit. C'est une idée d'une grande beauté et elle nécessite une grandeur d'âme pour la soutenir, même si même si l'on peut la mettre en doute.

Notre étude dans ce chapitre nous amène aux conclusions suivantes. Quand la notion de temps absolu de Newton est considérée sous un prisme philosophique et physique, elle présente un nombre considérable de problèmes embarrassants. Quand le temps est vu par le prisme purement mathématique au service d'une théorie physique, il semble être très convenable malgré les problèmes ontologiques soulevés surtout par Leibniz, et exposés avec finesse et intelligence par la Marquise du Châtelet dans les *Institutions de Physique*. L'exigence d'un espace et d'un temps absolus provient du fait que dans la loi du mouvement de Newton apparaît la notion d'accélération. Cette accélération est étudiée par rapport à l'espace. Si l'on veut que cette grandeur, l'accélération, ait un sens, il faut supposer que l'espace est au repos. Jusqu'ici la présence d'un temps absolu est justifiable, sans vouloir pour autant dire que Newton nous parle vraiment du temps. Nous disons juste qu'il a donné une caractéristique de plus au « temps » galiléen pour pouvoir créer un édifice solide pour sa propre théorie.

Sous le prisme de la nature du temps évoquée par l'auteur nous pouvons le résumer ainsi : le temps en devenant absolu obtient une réalité physique et une existence ontologique, il devient substance. Il y a deux manières de considérer le problème de cette attribution de réalité au temps (telle que Newton lui a attribué). Soit il y a une élévation du temps vers Dieu, le temps obtient le même statut que celui de Dieu, nous avons ainsi une *divinisation* du temps. Dans ce cas-là, il faut qu'on se pose la question de savoir si ce temps qui est défini comme durée par Newton, sans commencement, ni fin, indépendant de tout référentiel et infini, est toujours le *temps* (au sens de la durée) ? L'autre manière de voir ce problème est de faire l'hypothèse que Dieu s'abaisse au niveau du *temps*, c'est-à-dire que Dieu se *matérialise* et/ou se « *physicise* ». On voit clairement que du problème du temps absolu émerge un autre grand problème, celui de l'existence de Dieu. Newton est entièrement responsable de cette confusion.

« Newton lui-même et ses contemporains doués du sens critique se sentaient gênés d'attribuer aussi bien à l'espace même qu'à son état de mouvement une réalité physique, mais il n'y avait pas en ce temps d'autre issue, si l'on voulait donner à la Mécanique un sens clair. »<sup>181</sup>

Mais en étudiant son œuvre nous avons l'impression que la question pour Newton est une question pratique, et non pas une question ontologique. Il est vrai que Newton dans les *Principia* dit et répète que son propos n'est ni ontologique, ni causal. Il est d'ailleurs très prudent en ce qui concerne le statut métaphysique du temps. S'il est obligé d'ajouter dans la Scholie générale une argumentation métaphysique à son œuvre, il le fait seulement pour répondre à ces adversaires. Malgré tout nous pouvons rapprocher cette double substance du temps de la philosophie physique et de la physique mathématique en acceptant que le temps est un précieux outil que l'on peut utiliser à loisir...mais dont on peut aussi se débarrasser aisément si besoin, et ce sans provoquer de dégâts d'aucun genre à partir du moment où on conserve la durée.

---

<sup>181</sup> Einstein, A. (1956), *La Théorie de la Relativité*, trad. Paris : Petite Bibliothèque Payot, 187.

### III. LA MESURE DU TEMPS ET SA PRECISION DANS LA CONSTRUCTION DE LA THEORIE DE LA GRAVITATION UNIVERSELLE DE NEWTON.

Dans ce chapitre, nous allons étudier le rôle de la précision de la mesure du temps dans la création ou plutôt dans le processus de construction de la théorie de la gravitation universelle de Newton jusqu'à sa version finale : la Proposition IV du Livre III des *Principia* de la troisième et dernière édition. On va se poser la question de savoir si la définition que nous avons donnée à la précision dans la mesure du temps dans l'introduction de cette thèse émerge lors de la construction intellectuelle de la théorie gravitationnelle de Newton. Si cette définition ne s'y trouve pas intégralement, nous examinerons si certains des éléments qui s'y rapportent s'y trouvent, comme le pendule pour la détermination de la mesure du temps. Une fois ces éléments identifiés, nous examinerons leur rôle et leur importance dans la construction de la théorie. Afin de réussir cette entreprise, il faudra, dans un premier temps, clarifier ce que nous appelons la construction de la théorie de la gravitation universelle de Newton. Le démarrage de cette construction, l'idée même de cette théorie, date selon Newton de la période 1665 - 1666. Nous avons jugé approprié de commencer cette partie par le témoignage de son auteur sur sa genèse, qui se trouve dans un brouillon écrit dans le cadre de la dispute entre Newton et Leibniz sur la priorité du calcul différentiel<sup>182</sup> :

« Au début de l'année 1665 j'ai trouvé la Méthode des séries approximantes & la Règle pour réduire tout ordre de tout Binôme à une telle série. La même année au mois de Mai j'ai trouvé la méthode des Tangentes de Grégoire & de Slusius, & en Novembre, j'avais la

---

<sup>182</sup> Ce extrait est apparu pour la première fois en 1888, dans le *Catalogue of the Portsmouth Collection of Books and Papers written by or belonging to Sir Isaac Newton*, édité à Cambridge aux éditions Cambridge University Press, dans la Préface, xvii, xviii, xix. Selon Whiteside il s'agit de la transcription du manuscrit MS. Add. 3968.41, 85<sup>r</sup>, présenté ici, lequel à son avis doit figurer dans une lettre de Newton à Des Maizeaux MS. Add. 3968.27 dans laquelle Newton souligne sa priorité de l'invention du calcul contre Leibniz. Whiteside D.T. (1966), « Newton's marvellous year: 1666 and all that » in *The Royal Society journal of the History of Science*, Vol 21, Issue 1, 32-41. Whiteside critique cette transcription comme « not very accurately transcribed » dans Whiteside (1966). La transcription est fidèle au manuscrit, les auteurs respectent les phrases supprimées par Newton, la critique de Whiteside porte plus sur le fait qu'elle est modernisée, les auteurs ont remplacé les *y<sup>e</sup>* par *the* etc. et ils ont rajouté des virgules en faveur d'une meilleure compréhension du texte.



was with difficulty that I should... consequence that I should... with a quiet life for the sake of it, & therefore I will not meddle with the controversy no further. / But whatever is done I do not think this business of such consequence that I should meddle with it any further.

If it be asked why I did not publish this book sooner, it was for the same reason that I did not publish the theory of colours sooner, & I gave the reason in my letter of 24 Octob. 1676.

And the testimony of these two ancient, knowing & credible witnesses may suffice to excuse me for saying in the Introduction to the book of Principles that I found the Method by the Regius, in the year 1665 & 1666. In the beginning of the year 1665 I found the Method of approximating series & the Rule for reducing any dignity of any Binomial into such a series. The same year in May I found the Method of Tangents of Gregory & before in November had the Inverse Method of Fluxions & the next year in January had the Theory of Colours & in May following I had entrance into the Inverse Method of Fluxions. And the same year I began to think of gravity extending to the surface of the Moon & Kepler's Rule from Kepler's rule of the parabolical lines of the Planets being in a sequential proportion of their distances from the centers of their Orbs. I deduced that the forces must keep the Planets in their Orbs, & that the forces of gravity must be reciprocally as the squares of their distances from the centers about which they revolve. I compared the force requisite to keep the Moon in her Orb with the force of gravity at the surface of the earth, & found them answer pretty nearly. I made a Proposition that by a day's journey was in the prime of my age, & I was in the year 1677 I found the Kepler's Proposition that by a centifugal force the reciprocals as the square of the distance a Planet must revolve in an Ellipsis & with a radius drawn to that center describe equal areas proportional to the times. And in the winter between the years 1683 & 1684 this Proposition with the Demonstration was entered in the Register book of the R. Society. And this is the first instance upon record of any Proposition in the higher Geometry published by a Demonstration of a Proposition upon another supposition. In the year 1689 Mr. Leibnitz published a Demonstration of a Proposition upon another supposition, but his Demonstration was erroneous, & I thought it was discovered that he was wrong for want of skill in the Method.

And Mr. Collins in his letter to Mr. Berkeley of Feb 21 1670 said that you found a general Proposition about the Squares of the Sides of a Triangle. And in his letter to Mr. Sloane he said this is demonstrated by my having in those days series for squaring of figures such in some cases breaks off & become finite. And in a letter to Mr David Gregory the brother of Mr James Gregory he said

These references are  
p. 219. l. 27. etc. etc. etc.  
p. 252. l. 14. etc. etc. etc.  
p. 219. l. 27. etc. etc. etc.  
p. 252. l. 14. etc. etc. etc.

Newton I., MS. Add. 3968.41, 85r, Cambridge University Library.

méthode directe des fluxions & l'année suivante en Janvier j'avais la Théorie des couleurs, & en Mai suivant j'accédai à la méthode inverse des fluxions. Et la même année, j'ai commencé à penser à l'extension de la gravité jusqu'à l'orbite de la lune et (après avoir trouvé comment estimer la force avec laquelle un globe en révolution à l'intérieur d'une sphère pressait la surface de la sphère), je déduisis, d'après la loi de Kepler selon laquelle la période de révolution des planètes est en proportion sesquialtère de la distance au centre de l'orbite, que les forces qui maintenaient les planètes dans leurs orbites devaient être inversement proportionnelles (reciprocally) aux carrés des distances des centres autour desquels elles tournent ; et ainsi je comparai la force nécessaire pour maintenir la Lune dans son Orbite à la force de gravité à la surface de la Terre, et découvris qu'elles se correspondaient de très près. Tout ceci se passa durant les deux années de peste 1665 et 1666. Car à cette époque, j'étais à la fleur de l'âge de l'invention et pensai aux mathématiques et à la philosophie plus qu'il ne m'est jamais arrivé depuis. Ce que Mr Huygens a publié depuis sur les forces centrifuges je suppose qu'il l'avait avant moi. Plus précisément l'hiver 1676-1677 j'ai trouvé la Proposition<sup>183</sup> que par une force centrifuge inversement proportionnelle (reciprocally) au carré de la distance, une Planète devait décrire une Ellipse autour du centre de force qui se situe dans l'ombilic inférieur de l'ellipse pour laquelle un rayon tiré vers ce centre décrivait des aires proportionnelles aux temps. Et à l'hiver entre les années 1683 & 1684 cette Proposition avec sa démonstration a été consignée dans le livre des Registres de la Société Royale. Et ceci est le premier moment enregistré de toute Proposition de haute Géométrie trouvée par la méthode en dispute. L'année 1689 Mr Leibniz, s'efforçant de me rivaliser, a publié une Démonstration de la même Proposition qui repose sur une autre supposition, mais sa Démonstration a été prouvée fautive par manque d'habileté dans la méthode.»<sup>184</sup>

---

<sup>183</sup> Ici Newton avait initialement écrit « the Keplers Proposition » mais il a supprimé le mot « Keplers ».

<sup>184</sup> Adams, J. C., Living, G., Luard, H. R., & Stokes, G. G. (1888). *A catalogue of the Portsmouth collection of books and papers written by or belonging to Sir Isaac Newton*. Cambridge : Cambridge University Press, xviii. Trad. Pers. :

« In the beginning of the year 1665 I found the method of approximation Series and the Rule for reducing any dignity of any Binomial into such a series. The same year in May I found the method of tangents of Gregory and Slusius, and in November had the direct method of Fluxions, and the next year in January had the Theory of Colours, and in May following I had entrance into the inverse method of Fluxions. And the same year I began to think of gravity extending to the orb of the Moon, and having found out how to

Dans ce témoignage, Newton, en nous dévoilant (au moins en partie) le cheminement de sa pensée, nous livre quelques étapes nécessaires à la construction de sa théorie de la gravitation. Après avoir mentionné des réflexions diverses sur la physique et les mathématiques, il définit ce que nous appelons ici l'universalisation de la gravité. Il nous dit en effet qu'il a commencé, très tôt, à l'âge de 24 ans, à imaginer la force de la gravité agissant à une distance considérable de la surface de la Terre, jusqu'à l'orbite de la Lune. Après avoir daté son idée, il met l'accent sur trois « périodes » phares de sa vie intellectuelle, qui lui ont permis de construire sa théorie. Lors de ces trois périodes : 1665-1666, 1679-1680 et 1684-1685, Newton ressemble les éléments nécessaires à ce but. Il résout aussi des problèmes mathématiques posés par son idée de gravitation universelle et a ainsi construit sa théorie au fil du temps, pour la présenter dans son ensemble dans son œuvre majeure, les *Philosophiae naturalis principia mathematica* parue pour la première fois en 1687. Néanmoins, alors qu'il semblerait que ce travail ait connu une certaine continuité dans la pensée newtonienne, il a été interrompu ou laissé de côté par son auteur, pendant de nombreuses années, pendant lesquelles Newton a consacré son temps à des travaux autres, et parfois même très éloignés du problème de la gravitation. Ce témoignage rétrospectif de Newton servira de guide à notre étude. Nous allons ainsi explorer de plus près les éléments nécessaires pour notre recherche, mentionnés ici par l'auteur. De cette manière nous allons progressivement dévoiler le

---

estimate the force with which [a] globe revolving within a sphere presses the surface of the sphere, from Kepler's Rule of the periodical times of the Planets being in a sesquialterate proportion of their distances from the centers of their orbs I deduced that the forces which keep the Planets in their Orbs must [be] reciprocally as the squares of their distances from the centers about which they revolve: and thereby compared the force requisite to keep the Moon in her orb with the force of gravity act the surface of the earth, and found them answer pretty nearly. All this was in the two plague years of 1665 and 1666, for in those days I was in the prime of my age for invention, and minded Mathematicks and Philosophy more than at any time since. What Mr Hugens has published since about centrifugal forces I suppose he had before me. At length in the winter between the years 1676 and 1677 I found the Proposition that by a centrifugal force reciprocally as the square of the distance a Planet must revolve in an Ellipsis about the center of the force placed in the lower umbilicus of the Ellipsis and with a radius drawn to that center describe areas proportional to the times. And in the winter between the years 1683 and 1684 this Proposition with the Demonstration was entered in the Register book of the R. Society. An this is the first instance upon record of any Proposition in the higher Geometry found out by the method in dispute. In the year 1689 Mr Leibniz, endeavouring to rival me, published a Demonstration of the same Proposition upon another supposition, but his Demonstration proved erroneous for want of skill in the method.»

rôle de la mesure du temps, de sa précision et de ses éléments constitutifs lors d'un long voyage intellectuel, des débuts de la construction de la théorie de la gravitation universelle jusqu'à sa publication.

La genèse de l'idée de la gravitation universelle date, selon l'auteur, de la période 1665-66 lors de son séjour dans sa ville natale, dans le Lincolnshire. Newton a été forcé de quitter Cambridge et ses études pour quelque temps à cause de la grande épidémie de « peste noire » à Londres et dans ses environs. Il existe des témoignages, des Mémoires<sup>185</sup> qui corroborent la version de Newton. Citons à titre d'exemple, celui d'Abraham de Moivre<sup>186</sup>, protestant et mathématicien français qui a émigré en Angleterre avec sa famille après la révocation de l'édit de Nantes. En arrivant à Londres, De Moivre étudie les *Principia* en profondeur et ses connaissances mathématiques lui permettent de les maîtriser assez rapidement. En 1692 il rencontre Edmund Halley et Newton pour la première fois et en 1697 il est élu membre (*Fellow*) de la Royal Society. Dans le mémoire présenté ci-dessous De Moivre donne une brève histoire intellectuelle de Newton, de ces lectures de jeunesse jusqu'à l'idée de la publication des *Principia*. Voici ce qu'il nous dit sur la période 1665-1666 :

« Mémoires relatifs à Sir Isaac Newton qui me sont confiés<sup>187</sup> par M<sup>r</sup> Abraham De Moivre en Novembre 1727

En (16)65 alors qu'il se trouvait à la campagne dans un jardin, il lui est venu à l'esprit, que la puissance de la gravité n'était pas limitée à une certaine distance de la terre, mais que cette puissance pouvait s'exercer à toute distance d'elle, & pouvait même aller aussi loin que la Lune, ensuite il en a tiré la conclusion que s'il était vrai que cette

---

<sup>185</sup> À voir aussi Pemberton H. (1728), « Preface », in *A View of Sir Isaac Newton's Philosophy* (<http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/OTHE00035>) & Whiston W. ([1749] 1753), *Memoirs Of The Life And Writings Of Mr. William Whiston ...*, London: Printed for Whiston J. & White B., 32-33.

<sup>186</sup> Complete Dictionary of Scientific Biography (2008), « Moivre, Abr. De. », New York : Charles Scribner's Sons, vol. 9, 452-455. & Moivre, Abr. de. in *Encyclopedia of Mathematics*. URL:

[http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Moivre,\\_Abraham\\_de&oldid=392](http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Moivre,_Abraham_de&oldid=392)

<sup>187</sup> Il s'agit ici de John Conduitt époux de la nièce de Newton.

puissance allait aussi loin que la Lune, il était très probable que cette puissance ou force de gravitation vers la terre était ce qui retenait la Lune sur son orbite,... »<sup>188</sup>

L'universalisation de la théorie gravitationnelle, Newton l'exprime dans son témoignage, et De Moivre le reprend, comme l'idée que la gravité, la force d'attraction qui est la cause de la chute des corps à proximité de la surface terrestre, ne se limite pas à son voisinage, mais s'étend à des distances beaucoup plus grandes, par exemple la distance Terre-Lune. L'auteur nous dit que dans sa jeunesse il eut l'idée que la gravité maintenait la Lune sur son orbite. La gravité fait ainsi perdurer le mouvement orbital de la Lune autour de la Terre et l'empêche de se mouvoir autrement. Ainsi, si la gravité ne s'exerçait pas sur la Lune, la Lune ne suivrait pas son mouvement orbital autour de la Terre, mais suivrait un mouvement rectiligne et uniforme (ou serait au repos) conformément au principe d'inertie (première loi de Newton), en supposant qu'elle n'est soumise à aucune autre force. Pour que la Lune puisse se trouver dans l'un de ces deux états initiaux, soit au repos soit en mouvement rectiligne uniforme, il faut l'imaginer seule, sans d'autres corps autour d'elle, ou avec d'autres corps dont la présence n'exercerait aucune influence sur elle. Cette supposition résulte de la mise en place du principe d'inertie. La force de la gravité, en agissant sur la Lune de manière continue, incurve sa trajectoire de la quantité requise pour la rendre orbitale. On trouve ce principe dans les écrits de jeunesse de Newton, dans le fameux Waste Book<sup>189</sup>. Il s'agit d'un carnet de notes que Newton a commencé à utiliser durant la période de la grande peste pendant son absence de Cambridge, aux alentours de 1664. Dans ce carnet on

---

<sup>188</sup> De Moivre A. (1727), *Memorandums relating to Sir Isaac Newton*, Ms. 1075.7, Joseph Halle Schaffner Collection, Chicago, Illinois, USA: University of Chicago Library.

« Memorandums relating to Sir Isaac Newton given me<sup>188</sup> by M<sup>r</sup> Abraham De Moivre in November 1727

In (16)65 being in the country in a garden, it came into his thought, that the power of gravity was not limited to a certain distance from the earth, but that this power would exert it self at any distance from it, & even would reach as far as the Moon, then he drew this conclusion that if it was true that this power reached as far as the Moon, it was very likely that this power or force of gravitation towards the earth was what contained the Moon in her orbit,...»

<sup>189</sup> Il s'agit de MS. Add. 4004, Cambridge University Library. Ce carnet de notes Newton l'a très probablement hérité de son beau-père (voir Herrivel (1965, 128-29)). La date du début de l'utilisation du carnet en question par Newton, est définie par les historiens grâce à la date notée par Newton lui-même sur la marge du folio 10r : « Jan. 20 1664 ».

trouve ce principe dans la catégorie des Axiomes, qui, au même titre que les principes ne sont pas sujet aux démonstrations :

- « 1. Dès lors qu'une quantité se meut, elle ne cessera jamais sauf empêchement par une cause externe.
2. Une quantité se mouvra toujours suivant la même ligne droite (sans changer la détermination ou la vitesse de son mouvement) sauf si une cause externe l'en détourne. »<sup>190</sup>

Le principe d'inertie ici se partage entre deux axiomes. Le premier énonce le mouvement continu d'une quantité, d'un corps, et les changements produits dans ce mouvement par des causes externes à celui-ci. Le second indique que la trajectoire rectiligne et uniforme est modifiée par une cause externe. Il est communément accepté<sup>191</sup> que le principe d'inertie utilisé par Newton trouve ses origines dans l'œuvre de Descartes. La force qui résulte de ce principe, désignée par Descartes comme « la force de chaque corps pour agir ou pour résister »<sup>192</sup>, se trouve dans les *Principia* de Newton dès leur première édition sous la forme de la définition III :

*« 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.*

Cette force est toujours proportionnelle à la quantité de matière des corps, & elle ne diffère de ce qu'on appelle *l'inertie de la matière*, que par la manière de la concevoir :

---

<sup>190</sup> MS. Add. 4004, folio 10r. Transcription en anglais in Herivel J. (1965), *The Background to Newton's Principia*, Oxford : At the Clarendon Press, 141 :

«Axiomes. and Propositions

1. If a quantity once move it will never rest unlesse hindered by some external caus.
2. A quantity will always move on in the same streigth line (not changing the determination nor celerity of its motion) unlesse some external cause divert it. »

<sup>191</sup> Voir Koyré (1968), *Études newtoniennes*, Paris: Gallimard, Herivel, J. (1965). 42-53 & Newton, I., & Cambridge University Library. (1989). *Newton manuscripts series. 2. The preliminary manuscripts for Isaac Newton's 1687" Principia" 1684-1685: facsimiles of the original autographs, now in Cambridge University Library*. Cambridge : Cambridge University Press.

<sup>192</sup> Blay M. (1995), *Les « Principia » de Newton*, Paris : PUF, 42.

car l'inertie est ce qui fait qu'on ne peut changer sans effort l'état actuel d'un corps, soit qu'il se meuve, soit qu'il soit en repos ; ainsi on peut donner à la force qui réside dans les corps le nom très-expressif de *force d'inertie*.

Le corps exerce cette force toutes les fois qu'il s'agit de changer son état actuel, & on peut la considérer alors sous deux différents aspects, ou comme *résistante*, ou comme *impulsive* : comme résistante, en tant que le corps s'oppose à la force qui tend à lui faire changer d'état ; comme impulsive, en tant que le même corps fait effort pour changer l'état de l'obstacle qui lui résiste.

On attribue communément la résistance aux corps en repos, & la force impulsive à ceux qui se meuvent ; mais le mouvement & le repos, tels qu'on les conçoit communément, ne sont que respectifs : car les corps qu'on croit en repos ne sont pas toujours dans un repos absolu. »<sup>193</sup>

La force d'inertie, qui résulte du principe d'inertie, fait partie des notions que Newton considère comme « les termes qui ne sont pas communément usités. »<sup>194</sup>. Cette caractérisation nous permet des interrogations à son sujet. L'auteur nous dit qu'elle n'est pas habituellement utilisée ou bien qu'elle est une notion qui porte une certaine nouveauté conceptuelle, ou bien les deux. Dans tous les cas, elle peut être conçue comme une force qui réside dans les corps et *s'active* à chaque fois que le corps fait face à un changement de son état, à une action qui a pour effet de tendre à modifier son mouvement. Elle peut être perçue soit comme une résistance, soit comme une force impulsive selon l'état du corps en question. La grande difficulté, soulignée à juste titre par l'auteur, est la caractérisation de l'état d'un corps en repos ou en mouvement rectiligne uniforme. La détermination de deux états est relative, et l'état du repos n'est qu'apparent pour un corps.

Pour revenir à l'idée de la gravitation universelle, Newton suppose que la Lune serait soit au repos, soit en mouvement rectiligne uniforme sans l'action de la gravité sur elle. Le principe d'inertie trouve ici une application large. Elle ne se réduit pas à une application aux corps d'ici-bas, réservée à l'explication du mouvement local (comme la

---

<sup>193</sup> Newton I. ([1726] 1759), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, par feu Madame la Marquise Du Chastellet, Paris : Chez Desaint & Saillant..., Lambert, Livre I, 2-3.

<sup>194</sup> Ibid., 7.

chute des corps pesants ou la trajectoire parabolique d'un projectile dans le cas des études galiléennes<sup>195</sup>), mais elle trouve une place dans la description du mouvement des corps célestes également. Pour souligner cette nouveauté intellectuelle remarquable, rappelons au lecteur l'idée d'inertie dans l'œuvre galiléenne.

Galilée dans son *Dialogue sur les deux systèmes du monde*, lors de la première journée, dont le sujet est l'ordre du Cosmos, soutient la thèse selon laquelle un Cosmos ordonné serait impossible si l'on considérait le mouvement rectiligne comme un mouvement naturel des corps.

« ...leurs mouvements (des corps) doivent être circulaires et non rectilignes, pour une raison bien simple et évidente : ce qui se meut en ligne droite change de lieu; en continuant son mouvement, il s'éloigne de plus en plus du point de départ et de tous les lieux par lesquels il passe successivement; si ce mouvement lui convient par nature, c'est donc qu'il n'était pas au commencement en son lieu naturel et que les parties du monde n'étaient pas disposées dans un ordre parfait; or nous avons supposé qu'elles étaient parfaitement en ordre; il est donc impossible qu'en tant que telles, elles aient par nature à changer de lieu; par conséquent elles ne peuvent se mouvoir d'un mouvement rectiligne.

D'autre part, le mouvement rectiligne étant par nature infini, puisque la ligne droite est infinie et indéterminée, il est impossible qu'un mobile ait par nature un principe de mouvement en ligne droite, autrement dit vers là où il est impossible d'arriver puisqu'il n'y a pas là alors de terme défini; or la nature, comme Aristote lui-même le dit très bien, n'entreprend pas ce qui est impossible, elle n'entreprend pas non plus de mouvoir vers là où il est impossible de parvenir. »<sup>196</sup>

Cette argumentation est utilisée avec et contre la philosophie aristotélicienne. Galilée d'un côté embrasse l'idée aristotélicienne du lieu et du mouvement naturel des corps, selon laquelle le mouvement naturel d'un corps est le résultat de sa tendance vers un

---

<sup>195</sup> Tout en prenant en compte que « Galilée n'a pas formulé de principe d'inertie » in Koyré A. (1966), *Études galiléennes*, Paris : Editions Hermann, 276. Voir aussi Herivel J. (1965), *The Background to Newton's Principia*, Oxford: Clarendon Press, 35-42.

<sup>196</sup> Galileo G. (1992), *Dialogue sur les deux systèmes du monde*, traduction Fréreau R., Paris : Seuil, 55.



lieu qui lui est propre, mais il réfute l'idée que le mouvement circulaire, comme mouvement naturel, doit être réservé aux corps célestes. Il généralise ainsi l'argumentation aristotélicienne de l'imperfection du mouvement en ligne droite, comme mouvement naturel pour tout corps, céleste et terrestre. Pour ce faire Galilée considère tout corps, sur le même pied faisant abstraction de leur nature.

Pour Galilée la nature ne se sert pas du mouvement rectiligne, à moins qu'on imagine une sorte de genèse du Cosmos, une sorte de « *Chaos primitif* », à partir d'une chute de toutes les planètes depuis un point d'où l'Auteur (Dieu) les aurait lancées. Les planètes, partant à l'origine du repos en un même lieu, auraient acquis leurs vitesses respectives de rotation uniforme grâce à une chute rectiligne accélérée plus ou moins longue. De cette sorte, les corps auraient au début un mouvement rectiligne, car Dieu les aurait lancés ainsi, et puis un mouvement circulaire comme celui que l'on observe. Mais ceci est impossible, selon Galilée, car si l'on considère le mouvement rectiligne comme le mouvement naturel des corps, celui que Dieu a communiqué aux corps, les corps auraient tendance à changer de lieu ; ils devraient par conséquent abandonner le mouvement circulaire observé, pour le mouvement rectiligne naturel et la création d'un nouveau désordre du Cosmos. Un nouveau *Chaos*, prendrait alors place.

«...pour maintenir l'ordre parfait entre les parties du monde, il faut dire que les mobiles ne peuvent avoir qu'un mouvement circulaire; s'il y en a qui ne se meuvent pas circulairement, c'est nécessairement qu'ils sont immobiles, puisque, en dehors du repos et du mouvement circulaire, il n'y a pas d'autre mouvement qui puisse conserver l'ordre. »<sup>197</sup>

Dans le cadre de la réflexion newtonienne, l'idée du mouvement circulaire comme mouvement naturel des corps ne trouve pas sa place, mais il persiste par une autre impossibilité<sup>198</sup>. Pour Newton un mouvement rectiligne uniforme serait possible si un

---

<sup>197</sup> Cet extrait dédié au mouvement circulaire, fait appel à ce que William R. Shea traite comme le platonisme galiléen in Shea W. R. (1997), *Galileo's intellectual revolution, Middle period, 1610-1632*, New York: Science History publications, A division of Neale Watson Academic Publications, Inc. 150-155. Cette idée sera traitée plus loin dans cette thèse.

<sup>198</sup> Koyré A. (1986), *Etudes galiléennes*, Paris: Hermann, 275-276.

corps existait seul dans l'espace, sans être influencé par d'autres corps. C'est une possibilité mathématique mais une impossibilité physique. Par conséquent le mouvement circulaire des corps peut être traité comme le résultat de l'action de deux forces, celle de la force d'inertie et celle de la gravité. Pour expliquer le mouvement circulaire, il présuppose ainsi les corps au repos ou en mouvement rectiligne uniforme.

## 1. Les manuscrits dynamiques de WasteBook

### i. MS Add 4004, 11v

En reprenant la suite du témoignage cité plus haut, Newton nous dit que pour imaginer la gravité terrestre agir sur la Lune, il avait besoin dans un premier temps de pouvoir « estimer la force par laquelle un globe en révolution à l'intérieur d'une sphère presse la surface de cette sphère ». On trouve ces premières estimations dans le Waste Book aux propositions 20, 21 et 22<sup>199</sup> de 1664. Dans ces propositions Newton fait l'hypothèse d'un corps sphérique *co* [Fig. 3.1.] en mouvement circulaire à l'intérieur d'un cylindre creux, ou pour utiliser les termes de Newton, en rotation autour du centre *m* sur la surface

---

<sup>199</sup> MS. Add. 4004, folio 11v. Intitulé à la marge : *Of endeavour from the center* Transcription en anglais par Herivel J. (1965), 146-147. :

« 20. If a sphaere *oc* [Fig.] moves within the concave shaeicall of cylindricall surface of the body *edf* circularly about the center *m*, it shall presse upon the body *edf* for when it is in *c* (supposeing the circle *bhc* to be described by its center of motion and the line *cg* a tangent to that circle at *o*) [it] moves towards *g* or the determination of its motion is towards *c* therefore if at that moment the body *edf* should cease to check it it would continually move in the line *cg* (ax. 1,2) obliquely from the center *m*, but if the body *edf* oppose it selfe to this endeavour keeping it equidistant from *m*, that is done by a continued checking or reflection of it from the tangent line in every point of the circle *cbh*, but the body *edf* cannot check and curve the determination of the body *co* unless they continually presse upon one another. The same may be understood if the body *adb* [Fig.] bee restrained into circular motion by the thread (*om*).

21. Hence it appears that all bodys moved circularly have an endeavour from the center about which they move, otherwise the body *oc* would not continually presse upon *edf*.

22. The whole force by which a body *co* indeavour from the center *m* in halfe a revolution is more than double to the force which is able to generate or destroy its motion, that is to the force which it is moved: for supposeing it have moved from (*c*) by (*h*) to (*b*) [Fig. 8]. Then the resistance of the body *edf* (which is equall to its pressure upon *edf*) is able to destroy its force of moveing from *c* to *g* and to generate in it as much force of moveing from (*b*) to (*h*) the quite contrary way. »



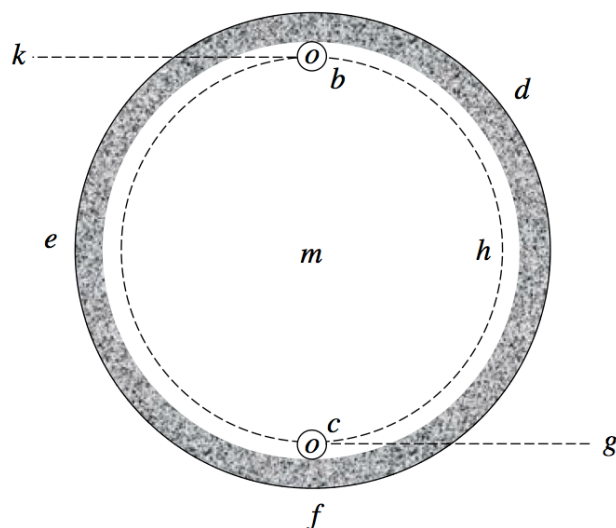


Fig. 3.1 Figure d'après celle présentée dans Herivel J. (1965).

concave d'un cylindre *edf*. Dans un premier temps Newton nous dit que le corps sphérique *co* et la surface *edf* exercent une certaine pression l'un sur l'autre. Si la surface *edf* cessait d'exercer cette pression sur le corps sphérique [bille], quand il serait en *c*, serait mu vers *g*, avec un mouvement rectiligne uniforme (sur une tangente du cercle décrit par son centre, le centre du corps)<sup>200</sup>. Par conséquent pour que le corps sphérique suive ce mouvement circulaire, il faut que la surface intérieure du cylindre s'oppose à cette tendance du corps à suivre son mouvement rectiligne uniforme, continuellement en chaque point de la surface concave. Une pression s'exerce ainsi mutuellement. (Newton nous dit que l'on peut arriver à la même conclusion considérant le mouvement circulaire d'un corps attaché par un fil autour d'un centre faisant implicitement référence à Descartes.) Il conclut que tout corps qui se meut circulairement a une tendance à s'éloigner du centre autour duquel il effectue son mouvement. (Sinon le corps sphérique n'aurait pas exercé de pression continue sur la surface intérieure du cylindre.) Il fait par la suite une première estimation de cette tendance, et nous dit que la force par laquelle le corps sphérique tend à s'éloigner du centre à une demie révolution (partant du *c* pour arriver à *b*), doit être plus du double de la force qui est capable de générer ou détruire son mouvement. Afin de mieux appréhender cette proposition nous

<sup>200</sup> On voit ici une analogie entre l'approche newtonienne et l'idée de la fronde de Descartes. Pour une présentation de ce sujet voir Blay M. (1995), 30-31.

allons reprendre l'analyse de Zen Bechler.<sup>201</sup> On voit ici trois forces différentes, la force résultante (la force par laquelle le corps se meut), sa composante interne (la force qui fait s'éloigner le corps du centre) et sa composante externe (la force qui s'exerce continuellement par la surface *edf* à chaque point du cercle décrit par le centre du corps et le détourne de son mouvement tangentiel rectiligne uniforme). De ces trois forces, c'est la force externe qui fait que le corps se meut circulairement autour du centre *m*, sinon le corps suivrait sa trajectoire rectiligne uniforme. Cela est la preuve pour Newton de la pression exercée de la part du corps sur la surface *edf*.

ii. MS. Add. 4004, 1<sup>r</sup>

Pour passer d'une simple estimation à un résultat plus concret Newton imagine alors un corps qui se meut le long d'un carré inscrit dans un cercle par opposition au cercle lui-même<sup>202</sup>. À chaque coin le corps sera réfléchi d'un côté vers le suivant, et ainsi à l'infini. Dans ce cas particulier une relation exacte peut être déduite impliquant la quantité du choc rencontré par le corps à chaque coin du carré.<sup>203</sup>

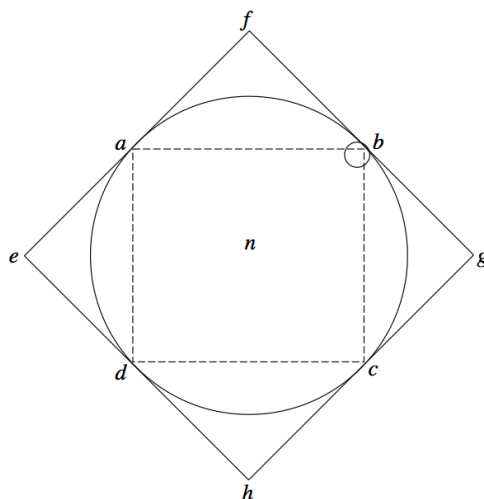


Fig. 3.2. Figure d'après celle présentée dans Herivel J. (1965).

<sup>201</sup> Bechler Z. (1992), « Newton's ontology of the force of inertia », in *The investigation of difficult things*, Cambridge: Cambridge University Press, 287-304.

<sup>202</sup> MS. Add. 4004, folio 1. Herivel (1965, 129) fait l'hypothèse que la datation de cette démonstration est plus tardive que la démonstration précédente (MS. Add. 4004, folio 11v) malgré le fait qu'elle apparaisse avant celle-ci dans le Waste Book.

<sup>203</sup> Pour plus d'informations sur le problème de la continuité de la force centripète impliquant la quantité du choc voir Blay M. (1995), 73-103.

L'idée peut être généralisée à un polygone régulier inscrit dans un cercle ; si l'on considère un polygone avec une infinité de côtés, on retombe sur le cercle et le mouvement circulaire.<sup>204</sup> Cette généralisation n'est pas en lien direct avec la détermination du temps et sa représentation géométrique. Si elle est présentée ici, c'est en tant que démonstration complémentaire de la détermination de la tendance des corps à s'éloigner du centre de leur révolution. Ce qui est important pour nous n'est pas tant le résultat de cette démonstration mais la suite de ces notes juste après les premières estimations de la force centripète/centrifuge. Jusqu'ici Newton a essayé d'estimer la force centrifuge indépendamment de toute idée liée relative à la mesure du temps et à sa précision. C'est dans ce cadre cependant que le temps et sa détermination entrent en jeu pour la première fois dans ces pensées préliminaires sur l'estimation de la force centrifuge qui amèneront Newton progressivement à l'établissement de la gravité universelle. Juste après avoir pensé à estimer la force centrifuge s'exerçant sur un corps qui se meut dans un polygone inscrit dans un cercle, afin d'avoir une meilleure détermination de cette force, Newton fait l'équivalence entre le temps périodique d'un pendule simple et celui d'un pendule conique<sup>205</sup>.

Le mouvement du pendule conique devient pour Newton une représentation du mouvement uniforme circulaire. Dans le cadre de la construction de l'universalisation de la théorie gravitationnelle, Newton utilise le mouvement circulaire du pendule pour représenter le mouvement orbital des planètes. La tendance d'éloignement des corps du centre de leur révolution deviendra dans la théorie gravitationnelle la force centripète qui retient les planètes sur leurs orbites respectives lors de leur mouvement autour du soleil. Une bonne estimation de cette force lui permettra d'étudier son universalisation. L'équivalence entre les deux pendules, conique et simple, s'inscrit dans l'effort de faire le lien entre le mouvement circulaire uniforme et le mouvement vertical uniformément accéléré. Ce lien est la clé de l'universalisation de la gravité. Si pour les deux mouvements la cause est la même (la force de la gravité), alors l'énigme du système du

---

<sup>204</sup> Cette idée est reprise et reformulée plus clairement dans la Scholie de la Proposition IV-Théorème IV du premier Livre.

<sup>205</sup> MS. Add. 4004, 1<sup>r</sup>, Herivel J. (1965), 131.



monde est résolue. Dans ce cadre, l'étude des manuscrits dynamiques de jeunesse de Newton (lorsqu'il étudie l'estimation de la tendance d'éloignement relative à l'équivalence entre un pendule conique et un pendule simple) se trouve au cœur de notre recherche. Nous allons voir comment à l'intérieur de cette réflexion initiale, l'universalité de la gravité prend forme et combien le temps joue un rôle déterminant.

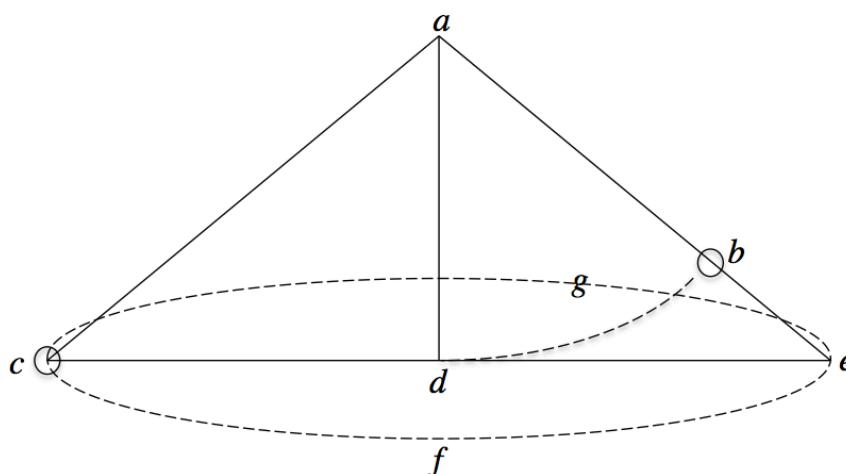


Fig. 3.3. Figure d'après celle présentée par Herivel J. (1965) [très proche à celle de Whiteside D.T. dans Newton I. (1967)].

Dans le manuscrit MS. Add. 4004, 1r, Newton considère un pendule conique, c'est à dire d'un corps  $c$  attaché à un fil,  $ac$ , dont la trajectoire est circulaire et qu'il désigne par le cercle  $cgf$ . Le diamètre du cercle  $cgf$  est  $ce$ , perpendiculaire à  $ad$ , dont  $ad=ab$ . Si l'on considère un pendule simple  $ab$ , ce pendule oscillera dans le même temps que  $ac$  circulera, ou autrement dit les deux pendules auront la même période<sup>206</sup>. À l'exemple de l'analyse de Herivel,<sup>207</sup> afin de mieux appréhender les rapports établis entre les deux pendules, nous allons présenter leur correspondance chez Galilée et Huygens. Il y a bien évidemment un écart chronologique entre la publication des rapports dans l' *Horloge à Pendule* de Huygens et les rapports de Newton étudiés ici. Newton n'était sûrement pas au courant du travail de Huygens (1673). Si l'on fait cette correspondance c'est pour

<sup>206</sup> En effet, l'étude de la dynamique newtonienne du pendule conique montre que si  $L$  désigne sa longueur et  $a$  le demi-angle au sommet du cône, le pendule simple de longueur  $l=L \cos a$  aura même période. Pour les très petites valeurs de  $a$ , les deux longueurs peuvent être considérées comme égales, conformément à ce que dit Huygens.

<sup>207</sup> Herivel, J. (1965), 131-132.



faciliter la compréhension du manuscrit newtonien. Herrivel à chaque affirmation newtonienne fait un renvoi soit à Galilée soit à Huygens.

<p>« If a body undulate in the circle <math>bd</math> all its undulations of any altitude are performed in the same time with the same radius. Galileus. »</p>	<p>Ici Newton se réfère au principe d'isochronisme du mouvement oscillatoire des pendules posé par Galilée. Galileo Galilei (1632), <i>Discours concernant deux sciences nouvelles</i>, première journée.</p>
<p>« As radius <math>ab</math> to radius <math>ac</math> : : so are the squares of the times in which they undulate. »</p>	<p>« Quant au temps d'oscillation de mobiles suspendus à des fils de différentes longueurs, ils ont entre eux même proportion que les racines carrées des longueurs de ces fils, ce qui revient à dire que les longueurs sont entre elles comme les carrés des temps. » Galileo Galilei (1632), <i>Discours concernant deux sciences nouvelles</i>, première journée.</p>
<p>« If <math>c</math> circulate in the circle <math>cgef</math>, to whose diameter <math>ce</math>, <math>ad = ab</math> being perpendicular then will the body <math>b</math> undulate in the same time that <math>c</math> circulates. »</p>	<p>« IX. Lorsqu'un pendule possédant un mouvement conique décrit des circonférences extrêmement petites, leur période aura au temps d'une chute verticale d'une hauteur égale au double de la longueur du pendule un rapport égal à celui de la circonférence d'un cercle à son diamètre; par conséquent cette période est égale au temps de deux oscillations latérales fort petites du même pendule. » Huygens Chr. (1673), « Théorèmes sur la force centrifuge résultant du mouvement circulaire. » in <i>L'horloge à pendule</i>.</p>
<p>« And those bodies circulate in the same time whose lines drawne from the center <math>a</math> to the center <math>d</math> are equall. »</p>	<p>« VII. Lorsque deux mobiles suspendus à des fils inégaux parcourent en tournant des circonférences horizontales, l'un des bouts du fil demeurant immobile, et que</p>

	<p>les hauteurs des cônes dont les fils décrivent la surface par ce mouvement sont égales, les temps de révolution seront dans un rapport égal à celui des racines carrées de ces hauteurs. »</p> <p>Huygens Chr. (1673), « Théorèmes sur la force centrifuge résultant du mouvement circulaire. » in <i>L'horloge à pendule</i></p>
<p>« And <math>ad : dc ::</math> force of gravity to the force of <math>c</math> from it's center <math>d</math>. »</p>	<p>« X. Lorsqu'un mobile parcourt une circonférence et que la période de ce mouvement est égal au temps dans lequel un pendule ayant pour longueur le rayon de cette circonférence peut décrire d'un mouvement conique une circonférence extrêmement petite ou exécuter une fort petite oscillation latérale double, il aura une force centrifuge égale à sa gravité. »</p> <p>Huygens Chr. (1673), « Théorèmes sur la force centrifuge résultant du mouvement circulaire. » in <i>L'horloge à pendule</i></p>

Un des renvois de Herivel mérite discussion. Concernant le renvoi à la Proposition IX de *l'Horloge à Pendule*, d'un côté nous avons Newton qui affirme que la période d'un pendule conique et d'un pendule simple de longueur égale à la profondeur du cône est la même, et d'un autre coté dans la Proposition de Huygens nous avons la mise en rapport entre la période d'un pendule conique et le temps de chute verticale d'une distance égale au double de la longueur du pendule, avec l'idée de l'égalité des longueurs des pendules. Herivel nous demande cependant de considérer l'affirmation newtonienne comme une formulation primitive de la Proposition IX de Huygens. Whiteside D.T.<sup>208</sup> dans son analyse de cette affirmation ne nous renvoie pas aux Propositions de *l'Horloge à Pendule*, il note simplement qu'il s'agit bien de l'égalité des périodes des pendules,

<sup>208</sup> Newton, I. (1967), *The Mathematical Papers*, Whiteside, D. T. (eds), Vol. I., 456-457.

conique et simple, comme désignés par Newton, et que cette égalité est vraie tant que l'angle d'oscillations est petit (*cf.* note 207).

En ce qui concerne le renvoi suivant à la Proposition VII. de *l'Horloge à Pendule*, Huygens établit le rapport des périodes entre deux pendules coniques de longueur différentes. Dans ce cas le rapport des périodes est comme la racine carrée des hauteurs des cônes engendrés par le mouvement circulaire des pendules. Si les hauteurs sont les mêmes, la période est donc la même. Newton affirme aussi que les périodes des pendules coniques de même hauteur sont égales. La correspondance entre les deux semble ici justifiable. Il en va de même pour le dernier renvoi : dans le deux cas, il s'agit de l'égalité entre la force centrifuge et la force de la gravité quand les périodes de deux pendules sont égales. En prenant en compte tout cela, il parvient ainsi à la conclusion suivante :

« Corroll. : par conséquent on peut trouver très exactement la force de la gravité du mouvement des choses qui tombent, quand ils ne sont pas retardés par la résistance de l'air, par le rapport  $cd : ad ::$  force de  $d$  : force de  $a$ . »<sup>209</sup>

Afin d'établir un rapport entre la force centrifuge et la force de la gravité, Newton met en rapport les mouvements qui représentent ces forces. Ces mouvements correspondent aux mouvements oscillatoires des pendules. En ce qui concerne la force centrifuge, le mouvement oscillatoire d'un pendule conique et en ce qui concerne la force de la gravitation, le mouvement oscillatoire d'un pendule simple. En faisant l'équivalence entre les deux pendules Newton met en place le rapport géométrique entre les deux forces. Dans ce cadre, et toujours dans une recherche de mise en rapport de ces deux forces, il rencontre la nécessité de déterminer le temps de chute d'un corps grave. Les pendules, chez Newton, n'étaient jusqu'ici pas utilisés comme des instruments précis de la mesure du temps, mais comme des représentations des mouvements correspondants aux deux forces. Dans le manuscrit que nous étudions ci-dessous, il est question de l'usage du pendule comme d'un instrument précis de la mesure du temps.

---

<sup>209</sup>MS. Add. 4004, 1r, Herivel J. (1965), 131. Trad. pers. : « Coroll : hence may the force of gravity of the motion of things falling were they not hindered by the aire may very exactly [be] found  $cd : ad ::$  force from  $d$  : force from  $a$ . » Pour un calcul analytique de cette conclusion voir Newton, I. (1967), Vol. I., Note 7, 457.

## 2. Le manuscrit *Vellum*, MS Add 3958, 45

Le manuscrit *Vellum* revêt une importance capitale pour notre thèse. Dans ce manuscrit, on voit l'intérêt que peut prendre la mesure du temps et sa précision dans des réflexions sur le mouvement de la Terre, qu'il soit diurne ou annuel. Ces réflexions à leur tour mènent progressivement vers une estimation entre la force centrifuge et la gravité, et son universalisation. Afin d'établir cette analogie entre les deux forces, Newton fait usage de la mesure du temps de chute libre d'un corps dans une distance donnée. En présentant ce manuscrit, on saisit l'opportunité d'étudier de plus près l'émergence et l'importance de la précision dans la mesure du temps à un stade de réflexion premier qui prendra plus tard sa forme finale avec le Test de la Lune.

L'inspiration de ce manuscrit trouve ses racines très probablement dans un problème déjà posé par Galilée dans ses *Dialogues*<sup>210</sup>. Il s'agit de l'argumentation contre le mouvement de la Terre. Cet argument, souvent utilisé par les anticoperniciens en faveur de l'immobilité de la Terre, était le suivant : si la Terre se meut, d'un mouvement quelconque, soit autour de son axe, soit autour du soleil, soit en suivant les deux mouvements combinés, comment se fait-il que les corps ne soient pas éjectés de la surface de la Terre ? Une manière plausible de traiter cette question est celle élaborée ici par Newton. L'objectif de Newton était d'estimer les rapports entre deux forces, la force centrifuge et la force de la gravité lors du mouvement diurne et du mouvement annuel de la Terre. Si la force de la gravité s'avère considérablement plus grande que la force centrifuge, alors le problème est résolu. La force de gravité était une force *connue*, le phénomène qui la caractérise le mieux, la chute libre des corps, était le phénomène étudié par excellence par les philosophes de la nature. Une nouvelle force devait être mise en examen : la force centrifuge. Cette force exprime une tendance des corps à s'éloigner du centre de leur révolution quand ils décrivent un mouvement circulaire uniforme. Si la Terre tourne autour d'elle-même d'un côté et autour du Soleil de l'autre, une telle tendance, dans les deux cas, doit s'exprimer. Si l'on accepte cette tendance,

---

<sup>210</sup> À ce sujet voir Westfall R.S. (1986), « Newton and the Acceleration of Gravity », in *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 35, No 3, 255 & Cohen, I. B., Whitman, A., & Budenz, J. (1999). *The Principia: The Authoritative Translation and Guide: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, Berkeley and Los Angeles : University of California Press, 66.



l'argument anticopernicien de l'éjection des corps terrestres semble valable. Mais si la force de la gravité, cette tendance qui attire les corps vers le centre de la révolution, s'avère considérablement plus importante que la tendance à l'éloignement du centre, l'idée d'une Terre mobile et celle de la non-éjection des corps terrestres semblent compatibles. Pour que Newton réussisse à établir une estimation fiable du rapport entre les deux forces, un élément lui était nécessaire : la mesure du temps lors d'une chute libre pour une distance donnée, ou autrement dit, la distance parcourue par un corps dans un temps donné. Le résultat de chute trouvé par Newton ici est de 195 *inches*, ou  $16\frac{1}{3}$  pieds anglais dans une seconde de temps<sup>211</sup>. Afin d'arriver à ce résultat un moyen de mesure du temps s'impose avec une précision suffisante. Telle est l'entreprise de Newton dans ce manuscrit que nous étudions plus en détails.

Le manuscrit date très probablement d'une période assez précoce de la réflexion newtonienne, aux alentours des années 1665 ou 1666<sup>212</sup>. C'est un papier d'une grande difficulté pour un lecteur contemporain. À première vue, nous distinguons une suite des calculs qui paraît être dans un grand désordre, suivie par un petit paragraphe de notes. Afin de pouvoir le déchiffrer, nous allons reprendre l'analyse de John Herivel dans son ouvrage intitulé *The Background to Newton's Principia* et celle de R.S. Westfall, plus tardive, dans son article *Newton and the Acceleration of Gravity*<sup>213</sup>. Herivel pour faciliter son déchiffrement a découpé artificiellement le manuscrit en 81 parties 9 colonnes horizontales et 9 colonnes verticales. Ce découpage lui a permis de catégoriser les calculs en calculs antérieurs et postérieurs par rapport à une compréhension claire de Newton de la force centrifuge. Ce qu'Herivel appelle une compréhension primitive de la force centrifuge, est l'estimation faite par Newton dans les manuscrits étudiés plus haut dans cette thèse, à savoir : la force par laquelle le corps sphérique tend à s'éloigner du

---

<sup>211</sup> Comme Westfall remarque, ce résultat diffère de la valeur de  $g$  que l'on accepte aujourd'hui d'approximativement 1 pour cent. (Westfall (1986), 271)

<sup>212</sup> Herivel J.(1965), 181 & Westfall (1986), 255.

<sup>213</sup> Dans le titre de cet article Westfall le sujet de cet article est annoncé. L'auteur nous parlera de l'accélération de la gravité et de sa recherche dans le manuscrit *Vellum* de Newton. Mais afin d'éviter tout malentendu à la fin de la page 255 et au début de la suivante il clarifie son propos : « The Vellum Manuscript contains a determination of the acceleration of gravity (or, to speak more precisely, the distance a body falls from rest during one second, which I shall call, somewhat inaccurately,  $g/2$ ) from the motion of a pendulum ; ».

centre en une demie révolution (Fig. 3.1. partant du *c* pour arriver à *b*) doit être plus que du double de la force qui est capable de générer ou détruire son mouvement.<sup>214</sup> Dans ce manuscrit, le Vellum, il ne considère pas cependant une demie révolution mais un quart de révolution.

« dans un quart de révolution un corps perd tout son mouvement (inertiel) vers une direction initiale, et c'est pour cela que la force centrifuge totale exercée durant un quart de révolution, égale à la force externe qui cause son mouvement circulaire et avec laquelle la force centrifuge se trouve en équilibre, doit être suffisante pour générer ou détruire la quantité de mouvement initial du corps durant une révolution. »<sup>215</sup>

Dans un premier temps lors de ses calculs, que Herivel J. appelle « primitifs »<sup>216</sup>, Newton fait usage du résultat trouvé dans les *Dialogues sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée afin d'établir le rapport entre les deux forces. Selon Galilée, un corps grave lors de sa chute libre, sans vitesse initiale, parcourt 100 *braccia* dans 5 secondes de temps. Newton avait très probablement à sa disposition ce résultat à travers la traduction anglaise du texte parue en 1661 par Thomas Salusbury<sup>217</sup>. Le rapport trouvé entre les deux forces en utilisant le résultat galiléen ne semble pas satisfaisant pour Newton. Il trouve que la force de la gravité est 159,5 fois plus grande que la force centrifuge et que le temps d'une chute libre de hauteur égale au  $\frac{1}{8}$ e de la circonférence de la Terre serait 23,935 minutes.

En bas à gauche du manuscrit, Newton exprime une série de résultats concernant les rapports entre force centrifuge et force de gravité dans les mouvements diurne et annuel de la Terre<sup>218</sup>. Ces résultats sont calculés par Newton en faisant usage de

---

<sup>214</sup> MS Add 4004, 11v

<sup>215</sup> Westfall R.S. (1986), 255.

<sup>216</sup> Herivel J. (1965), 181.

<sup>217</sup> Herivel, J. (1965), 183. La traduction anglaise que Newton avait à sa disposition est : Galilei, Galileo (1661), *Dialogues on two world systems*, traduction par Salusbury Th., London : printed by William Leybourne, 200. Le résultat donné par Galilée, son contexte et sa fiabilité sont étudiés en détail dans un chapitre suivant de cette thèse.

<sup>218</sup> Transcription Herivel J. (1965), 185-186.

1.« The Earth in about 83677 minutes moves the length of the solar distance » ( $525 \times 10^8$ )

plusieurs éléments complémentaires. Un premier élément est le rapport entre le temps et l'espace établi par Galilée lors de ses expériences avec les plans inclinés : les espaces parcourus sont comme les carrés des temps. Puis, dans un deuxième temps l'expression plus claire de la force centrifuge est nécessaire, sa simple estimation primitive n'étant pas suffisante. Cette expression peut se présenter ainsi :

« Un corps suit un mouvement rectiligne sous l'action constante d'une force égale à la force centrifuge pour un mouvement uniforme en un cercle donné, de rayon  $R$  ; pour le même temps nécessaire pour le mouvement en cercle de distance  $R$ , le corps parcourra une distance de  $\frac{1}{2} R$  en un mouvement rectiligne »<sup>219</sup>

Deux types de mouvement sont considérés ici, un mouvement circulaire uniforme et un mouvement rectiligne uniformément accéléré. L'objectif de cette expression est leur mise en rapport géométrique. Newton part du principe que les forces (centrifuge, gravité) qui sont à l'origine de ces deux mouvements sont égales entre elles (ou en équilibre). On suppose un corps qui suit un mouvement circulaire uniforme, sur un cercle de rayon  $R$ , avec une vitesse constante  $V$ . Le corps parcourt, lors de son mouvement circulaire uniforme, un arc de distance égale à  $R$  dans un temps  $T$ . Si l'on considère maintenant un corps en mouvement rectiligne uniformément accéléré avec

---

2.« vis gravitatis in 83677 minutes movebit corpus per distantiam 100826500737600 braces »

3. « vis tarrae a sole movebit corpus per distantiam  $2625 \times 10^7$  braces in 83677 minutes »

4.« vis gravitatis in 60 seconds movebit corpus per distantiam 14400 braces »

5.« vis terrae a sole in 60 seconds movebit corpus per distantiam  $2625 \times 10^7 / 7001840329 = 3749014354$  (braces)

6.« so that the force of a body from the sun is to the force of its gravity as one to 3749 or thereabouts »

7.« vis terrae a centro movebit corpus in 229.09 minutes per distantiam 5250000 braces »

8. « vis gravitatis in 229.09...minutes movet corpus per 755747081 braces »

9. So that the force of the Earth from its centre is to the force of gravity as one to 144 or thereabouts »

10. « Or rather as 1 : 300 : : vis a centro tarrae : vim gravitatis »

11. « ...1 : 7500 : : vis terrae a sole : vim gravitatis »

« vis terrae a sole movebit corpus per distantiam  $2625 \times 10^7$  braces in 83677 minutes. »

« vis gravitas in 60 seconds

<sup>219</sup> Herivel J. (1965), 185.



une accélération  $\frac{V^2}{R}$ , pour le même temps  $T$  le corps parcourra en ligne droite une distance égale à  $\frac{1}{2} \frac{V^2}{R} \left(\frac{R}{V}\right)^2 = \frac{R}{2}$ .<sup>220</sup>

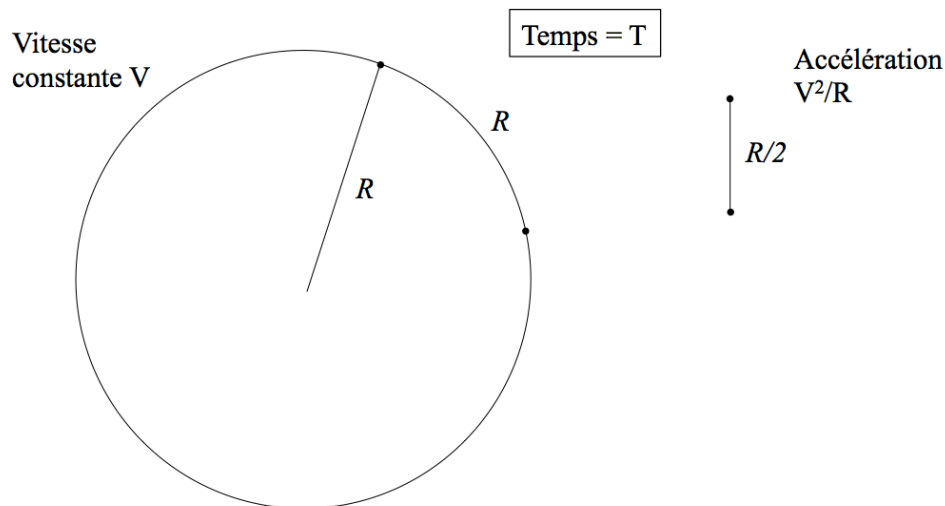


Fig. 3.4. Figure explicative créée par l'auteur de cette thèse.

Dans l'apparent désordre du manuscrit, on trouve du côté droit vers le milieu le dessin d'un pendule conique. Juste au-dessus de ce dessin deux résultats de chutes sont entourés par Newton. Le premier se réfère au résultat donné par Galilée, Newton note qu'un corps grave parcourt  $2\frac{1}{2} yards$  dans 1 seconde de temps ou 10 yards dans 2 secondes. Le second est le résultat, selon l'hypothèse de Herivel<sup>221</sup>, d'une expérience grossière de la part de son auteur. Newton note qu'un corps grave parcourt 3 yards dans une seconde de temps. Newton ne se satisfait pas de ces résultats. Pour trouver une réponse plus fiable à la question de la chute des corps, il fait usage de deux suppositions :

1. Le temps de révolution d'un pendule conique est égal à la période d'oscillation d'un pendule simple de longueur égale à la profondeur du « centre » du mouvement conique en dessous du point de support.<sup>222</sup>

<sup>220</sup> Herivel J. (1965), 190.

<sup>221</sup> Herivel J. (1965), 186.

<sup>222</sup> Traduction en anglais et transcription du texte latin par Herivel J. (1965), 186 : « Pendulum gyrans et undulans si sint aequae profunda in eodem tempore redeunt »

2. Dans un pendule conique le ratio de la gravité du corps à la force centrifuge due à son mouvement circulaire est égale à la tangente de l'angle d'inclinaison du fil à l'horizontal. Dans le cas considéré par Newton : dans un pendule conique de demi-angle  $45^\circ$  la force centrifuge est donc égale à la force de la gravité<sup>223</sup>. Si l'on voulait voir cette égalité de manière contemporaine on aurait dessiné la figure suivante.

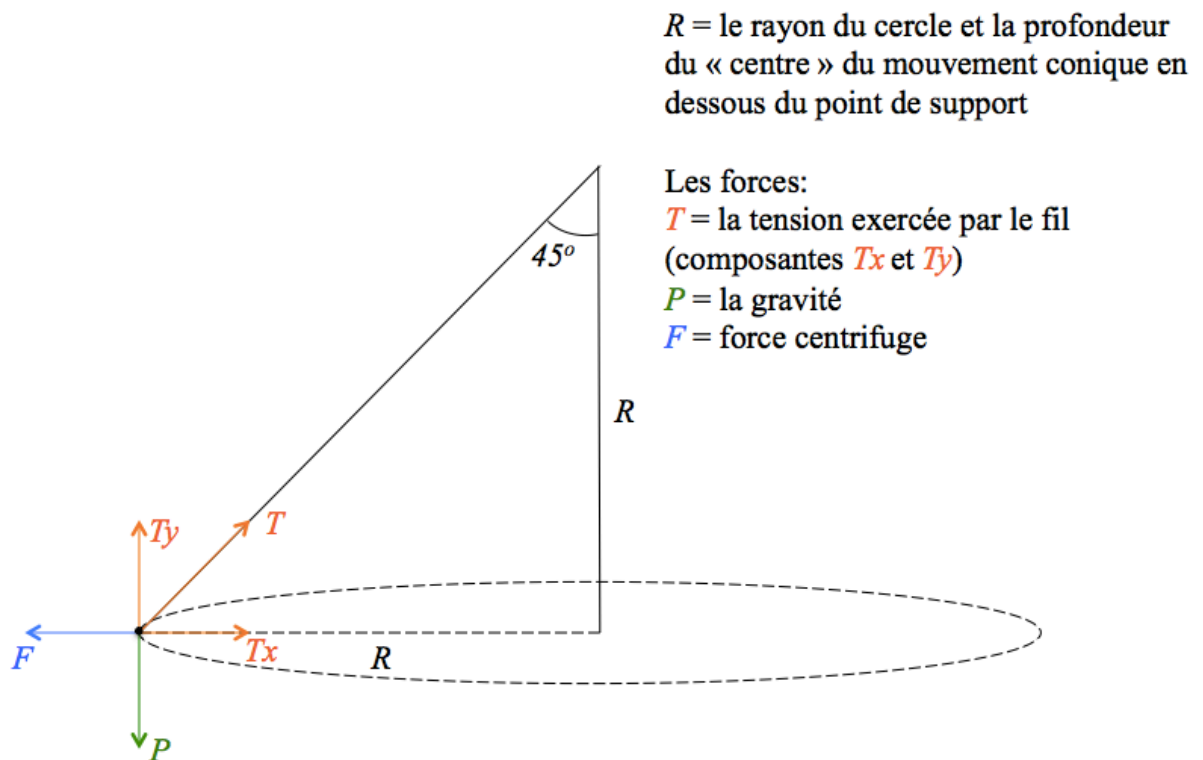


Fig. 3.5. Dans cette figure on se place dans le référentiel tournant du pendule et l'on considère les trois forces exercées sur le corps attaché au fil : la tension du fil, la force de la gravité et la force centrifuge.

On peut exprimer la période d'un pendule simple, de manière anachronique à celle de Newton, par la formule  $T_s = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$  où  $R$  est la longueur du fil du pendule simple, ou « la profondeur du « centre » du mouvement conique en dessous du point de support ». La période du pendule conique peut être exprimée par la formule  $T_c = 2\pi \sqrt{\frac{L \cos 45^\circ}{g}}$  où  $L$  est

la longueur du fil du pendule conique, nous avons  $T_c = 2\pi \sqrt{\frac{L \frac{R}{L}}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$ .

<sup>223</sup> Si l'on considère la Fig. 3.5. , nous avons  $T_y = T \sin 45^\circ$ ,  $T_x = T \cos 45^\circ$ .  $P = T_y$ ,  $F = T_x$ , le rapport entre la gravité et la force centrifuge est ainsi  $\frac{P}{F} = \tan 45^\circ \Rightarrow P = F$ .

Le dessin du pendule conique effectué par Newton sur ce manuscrit est accompagné par toute une série d'informations le concernant. La longueur du fil est notée être 81 *inches* avec une inclinaison de 45° d'avec la verticale, de cette manière la hauteur verticale et le rayon du cercle sont égales, à savoir 57.28 *inches*.<sup>224</sup> Prenant en compte tout ce que nous avons présenté précédemment, la loi galiléenne des carrés des temps, le rapport établi entre le mouvement circulaire uniforme et le mouvement rectiligne uniformément accéléré, et ses deux suppositions, il se met à la recherche de son propre résultat de chute.

Sur le manuscrit, au dessus du dessin du pendule conique, Newton nous dit que le pendule effectue 1512 « ticks » dans une heure<sup>225</sup>, juste en bas de ce chiffre il y a le chiffre 3024 qui apparaît, qui exprime très probablement le nombre des va-et-vient du pendule simple relatif au pendule conique. Au dessous du dessin en question, on trouve un ensemble de phrases qui expriment la mesure du temps<sup>226</sup>.

1. Un corps parcourt une distance de 28.64 *inches* dans  $\frac{0,00021013709}{2}$  heures. (le résultat en heures a été transformé en « *second seconds* » par la suite par Newton)
2. Un corps grave en chute parcourt 50 *inches* dans une seconde.
3. Ou (un corps grave en chute parcourt) plutôt 196 *inches*=5 *yards* (dans une seconde)
4. Un pendule de  $60\frac{1}{2}$  *inches* effectue 3024 vibrations dans une heure + 1/30
5. Un pendule de  $56\frac{1}{2}$  (*inches* ?) vibre ( ?) 1512 fois dans 1,005 ( ?) ...

Pour parvenir à ces résultats, Newton a visiblement utilisé tout ce dont on a parlé plus haut, le rapport entre les deux mouvements (circulaire et rectiligne), le rapport entre deux pendules (conique et simple). Mais malgré tout, pour arriver au résultat annoncé

---

<sup>224</sup> L'inclinaison du pendule n'est pas notée par Newton sur le manuscrit mais Herivel en fait la déduction.

<sup>225</sup> « 1512 ticks in hora », transcription du texte par Herivel J. (1965), 186.

<sup>226</sup> Transcription du texte latin par Herivel J. (1965), 186-187.

« gravitas movebit corpus per 28.64 inches in  $\frac{0,00021013709}{2}$  hours »

« A heavy thing in falling moves 50 inches in one second »

« or rather 196 inches=5 yards »

« A pendulum of  $60\frac{1}{2}$  inches vibrates 3024 in an hour + 1/30 »

« a pendulum of  $56\frac{1}{2}$  vibrating ( ?) 1512 times in 1,005 ( ?) ... »

plus haut, à savoir qu'un corps grave parcourt 196 *inches* dans une seconde, ou  $16\frac{1}{3}$  pieds anglais qui correspond à environ 4,97m dans une seconde, il doit d'une manière ou d'une autre mesurer le temps. Herivel fait l'hypothèse que Newton a réellement effectué l'expérience avec le pendule conique dessiné sur le manuscrit. Il souligne néanmoins la difficulté technique d'une telle entreprise. Il devait assurer la stabilité du mouvement du pendule conique avec une inclinaison de 45° de la verticale, utilisant très probablement un mécanisme inventé pour l'occasion. Dans les phrases présentées plus haut, on remarque qu'à part le pendule conique, une autre expérience était probablement mise en place, avec un pendule simple cette fois-ci. Pour Herivel, l'usage du pendule simple vient dans un second temps. Quoi qu'il en soit, Herivel dans son analyse ne se pose pas les questions suivantes : comment Newton a-t-il mesuré le temps des oscillations pendulaires ? Qu'a-t-il utilisé comme instrument de mesure du temps ?

R.S. Westfall<sup>227</sup> a poussé la réflexion d'Herivel un peu plus loin. Afin de répondre aux questions que nous avons posées plus haut, Westfall non seulement reprend l'analyse d'Herivel mais il se met à réaliser les expériences newtoniennes lui-même. Il est vrai que les informations données par Newton à ce sujet semblent curieusement précises, comme par exemple la longueur du pendule conique en question de 81 *inches*. Westfall a construit un pendule conique de la même taille que celui dessiné par Newton et d'une inclinaison de 45° de la verticale. Après un effort admirable de sa part, il est arrivé à la conclusion que le pendule conique était pour Newton non pas un instrument à construire pour réaliser des expériences mais plutôt un « concept idéal ». Il insiste particulièrement sur cette idée et nous invite à être prudents avec les grandeurs annoncées par Newton. « Peu importe l'explication de la longueur de 81 *inches*, nous ne pouvons pas nous permettre de nous laisser induire en erreur par quelque chose dont nous avons la connaissance de l'impossibilité physique. »<sup>228</sup>

Il fait l'hypothèse que l'idée de la longueur du pendule conique en question peut être liée à des expériences sur des pendules simples, de longueur de 57 *inches* environ dont le

---

<sup>227</sup> Westfall R. S.(1986), 255-272.

<sup>228</sup> Westfall R.S. (1986) 264.Trad. pers. : « Whatever the explanation of the 81 inch length, we must not allow ourselves to be misled by something we know to be physically impossible. »

carré est égal, à peu près, à la moitié du carré du nombre 81. Newton très probablement « séduit par quelque fantaisie Pythagoricienne qui honorait les nombres exacts comme supérieurs aux fractions,... »<sup>229</sup> aurait considéré la longueur de 81 *inches* afin de faciliter la mise en rapport des longueurs des deux pendules. Autrement dit, ce que Westfall suggère dans son article, c'est que le pendule conique idéal, de 45° d'inclinaison et de 81 *inches* de longueur, offrait un nombre de simplifications dans le calcul.<sup>230</sup> Grâce à ce dispositif précis :

1. la force de la gravité peut être considérée égale à la force centrifuge,
2. la hauteur verticale est égale au rayon du cercle,
3. pour le temps que le corps en mouvement circulaire parcourt un arc de longueur égale au rayon d'un cercle, un corps grave en chute libre parcourt une distance égale à la moitié du rayon, et tout cela combinés à la loi galiléenne du mouvement uniformément accéléré.

Ce que Westfall nous propose, c'est de voir les choses à l'envers. Jusqu'ici, connaissant le rapport entre le pendule conique et le pendule simple, on partait de l'expérience supposée du pendule conique pour déduire des résultats du pendule simple. Et si l'on faisait l'inverse ?

Westfall semble convaincu que Newton a effectué des expériences avec des pendules simples, mentionnés dans ce manuscrit, et il a déduit les résultats pour le pendule conique en question, car « Newton n'a pas sacrifié longtemps la précision aux fantaisies Pythagoriciennes »<sup>231</sup>, nous dit-il. Le résultat des expériences du pendule simple est représenté par la phrase que nous avons mentionnée plus haut dont le nombre de vibrations correspond aux va et vient du pendule simple:

- Un pendule de  $60\frac{1}{2}$  *inches* effectue 3024 vibrations dans une heure + 1/30

---

<sup>229</sup> Ibid., 264. Trad. pers. « lured by some Pythagorean fantasy which honoured exact numbers above fractions,... »

<sup>230</sup> Ibid., 263.

<sup>231</sup> Ibid., 264. Trad. pers. « NEWTON that he did not long sacrifice accuracy to Pythagorean fantasies. »

De ce résultat de mesure pour un pendule simple, Newton déduit par la suite, selon Westfall, le résultat pour un pendule conique par la mise en rapport des périodes de deux pendules. Pour un pendule conique nous avons ainsi :

- Un pendule de  $56\frac{1}{2}$  (*inches* ?) vibre ( ?) 1512 fois dans 1,005 ( ?) ...

Mais notre question persiste, comment a-t-il fait pour mesurer le temps ? Westfall fait une hypothèse très intéressante à ce sujet que nous allons suivre de près.

D'après la datation de ce manuscrit (1665), nous dit-il, Newton à cette période ne semble pas avoir eu à sa disposition un instrument élaboré pour la mesure du temps. Il souligne à ce point que pour Newton, comme pour Huygens, l'usage d'une horloge à pendule pour la mesure de la période d'un pendule simple était superflu. Il fait l'hypothèse par la suite, inspirée par les *Mémoires de Newton* de William Stukeley<sup>232</sup> soutenus par les témoignages de Jonh Conduitt<sup>233</sup>, que Newton, passionné par le mouvement du soleil, étudiait les passages de son ombre partout où il pouvait le faire. Il a pu ainsi utiliser un cadran solaire pour mesurer le temps.

Afin de construire son argumentation Westfall attire notre attention sur la partie qui se trouve en haut à droite du manuscrit, là où Newton note les proportions suivantes :

$$\begin{array}{r} 21 \text{-----} 6 \\ 7 \text{-----} 54 \\ \hline 56 \end{array}$$

Pour Westfall, ces proportions nous dévoilent deux choses, d'un côté le nombre d'oscillations d'un pendule simple, et, d'un autre côté, le temps pendant lequel ces oscillations sont effectuées. L'interprétation de Westfall sur ce point consiste à comprendre le système de division temporelle utilisé par Newton afin de pouvoir le lier

---

<sup>232</sup> Stakley W. (1752), *Memoirs of sir Isaac Newton's life*, MS/142, Royal Society Library, London, UK.

<sup>233</sup> Concernant ces témoignages Westfall nous donne la référence suivante : Keynes Manuscript, 130.2, (King's College, Cambridge), 24.

à l'usage d'un instrument de mesure de temps, et plus précisément à l'usage d'un cadran solaire. La réflexion de Westfall est comme suit :

« De ce qui suit il semble que Newton avait l'intention ici de combiner deux proportions 7:54::56:x, et (avec la valeur résultante de x) 21:6::y:x. Les calculs sur le côté nous donnent le résultat que y est égal à 1512. Ces deux mêmes proportions apparaissent séparément également:

$$7:54::56:(54 \times 56) / 7 = 8 \times 54 [=] 432$$

$$2:7::6:21::432:7 \times 216 = 1512$$

Par le calcul de 1512 à la proportion finale, il s'avère que le 2 :7 est simplement une simplification de 6 :21 afin de faciliter l'arithmétique et n'est pas un ratio indépendant. Le résultat final de toutes les proportions, 1512, est le nombre que Newton utilise pour les oscillations d'un pendule dans le temps d'une heure, et nous avons ainsi l'information répétée que 21 oscillations étaient effectuées dans 6 unités, dont 432 composent une heure (ou, dans ces calculs définitifs, une heure et une fraction mesurée d'une heure). C'est-à-dire, sept unités d'une sorte de division construite d'un huitième de l'heure, une division qu'un cadran solaire pourrait utiliser, et ses sept unités prises ensemble contiennent 54 plus petites unités, qui sont celles utilisées par Newton pour sa mesure réelle. Vingt et une oscillations étaient réalisées dans six de ces plus petites unités, une période temporelle qui serait égale à 50'' (ou 50'' plus la fraction mesurée mentionnée plus haut), par conséquent 1512 oscillations seraient complétées dans une heure (ou une heure plus la fraction)

Que pourraient être ces unités ?»<sup>234</sup>

---

<sup>234</sup>Westfall R.S. (1986) 264-265, traduction pers. libre :

« From what it follows, it appears that NEWTON intended here to combine two proportions: 7:54::56:x, and (with the resulting value of x) 21:6::y:x. Calculations to the side obtain the result that y equals 1512. The same two proportions also appear separately:

$$7:54::56:(54 \times 56) / 7 = 8 \times 54 [=] 432$$

$$2:7::6:21::432:7 \times 216 = 1512$$

From the computation of 1512 in the final proportion, it appears that 2:7 is merely a simplification of 6:21 to make the arithmetic easier and not an independent ratio. The final result of all the proportions, 1512, is the number NEWTON used for the swings of a pendulum in an hour, and thus we have the repeated information that 21 swings were

À cette question Westfall donne une réponse très originale. Premièrement il précise sa question : Quel objet pouvait avoir Newton à sa disposition qui lui permettait une telle division d'unités de l'ombre solaire ? Une première possibilité pourrait être les Pilastres à sept flutes utilisés souvent en architecture pour casser la monotonie des grandes surfaces verticales<sup>235</sup>. Cette hypothèse néanmoins est considérée comme peu probable par Westfall. D'autres objets qui offraient une division en intervalles égaux étaient les lignes des livres. Newton a pu très bien avoir utilisé un livre ouvert, posé verticalement aux rayons du Soleil. La question de l'instrument de mesure du temps reste ouverte. Nous pouvons établir des hypothèses mais nous n'avons pas de preuve du processus suivi par Newton pour la mesure du temps des oscillations pendulaires. Quoi qu'il en soit nous ne pouvons pas négliger le fait que Newton dans ce manuscrit ait calculé le temps de la chute d'un corps grave sans avoir connaissance des résultats de Huygens.

### 3. MS Add 3958, 87r-v

Newton fait usage du résultat obtenu dans le Vellum Manuscrit, de la chute libre dans un autre manuscrit, daté aux alentours de 1669, qui confirme le témoignage de David Gregory<sup>236</sup> :

---

completed in 6 units, of which 432 make up an hour (or, in his final calculations, an hour plus a measured fraction of an hour). That is, seven units of some sort make up an eighth of an hour, a division that a sundialer would be likely to use, and those seven units taken together contain 54 smaller units, which are the ones that NEWTON used in his actual measurement. Twenty-one swings were completed in six of these smaller units, a period of time which would have been equal to 50'' (or 50'' plus the measured fraction mentioned above), and therefore 1512 swings would have been completed in an hour (or an hour plus the fraction).

What would these units have been? »

<sup>235</sup>Westfall R.S. (1986), 265.

<sup>236</sup> Newton, I. (1961), *Correspondence*, Turnbull H.W. (eds), Cambridge : Cambridge University Press, Vol. 3, 332, Trad. Pers.:

« I saw a manuscript [written] before the year 1669 (the year when its author Mr Newton was made Lucasian Professor of Mathematics) where all the foundations of his philosophy are laid: namely the gravity of the Moon to the Earth, and of the planets to the Sun. And in fact all these even then are subjected to calculation. I also saw in that manuscript the principle of equal times of a pendulum suspended between cycloids, before the publication of Huygens's *l'Horologium Oscillatorium*. »



« J'ai vu un manuscrit (écrit) avant l'année 1669 (l'année où son auteur Mr Newton est devenu Professeur Lucasien des Mathématiques) dans lequel toutes les fondations de sa philosophie y étaient : notamment la gravité de la Lune vers la Terre, et des planètes vers le Soleil. Et en fait tout cela, même là encore était assujetti au calcul. J'ai également vu dans ce manuscrit le principe des temps égaux d'un pendule suspendu entre cycloïdes, avant la publication de l'*Horologium Oscillatorium* de Huygens. »

Ce manuscrit fait partie des œuvres de jeunesse de Newton de la *Portsmouth Collection*. Il a été publié pour la première fois en latin, avec sa transcription, une traduction libre et une série des commentaires par Hall A.R.<sup>237</sup>. On le trouve également dans le premier volume de la *Correspondance* de Newton. Ce manuscrit a été écrit certainement avant que Newton ne prenne connaissance de l'*Horloge à Pendule* de Huygens car, en ce qui concerne, la chute d'un corps dans le temps d'une seconde, Newton n'utilise pas ici le résultat donné par Huygens en 1673.

Il s'agit dans ce manuscrit, comme dans le précédent étudié ici, de la question du mouvement de la Terre. Newton fait une nouvelle tentative d'établir le rapport entre les deux forces, mais cette fois-ci sa réflexion va plus loin. Il ne se contente pas de considérer simplement les deux forces, ou les deux tendances, à la surface de la Terre. Il fait l'hypothèse de l'effet de ces deux tendances au-delà des limites terrestres. Il considère les deux tendances et leur rapport pour le système Terre-Lune, ensuite pour le système Terre-Lune-Soleil et à la fin les rapports des différents systèmes entre les planètes et le Soleil. Dans un sens, nous avons à faire ici à une tentative d'universalisation de deux forces. Nous sommes encore loin du Test de la Lune, mais l'idée de l'universalisation est bien présente ici.

Nous proposons dans cette troisième partie du chapitre une traduction française de ce manuscrit, basée sur la transcription de Herivel et sa traduction en anglais par Herivel et par Hall A.R.<sup>238</sup>.

---

<sup>237</sup> Hall, A. R. (1957), « Newton on the calculation of central forces. » in *Annals of Science*, 13(1), 62-71.

<sup>238</sup> Herivel J. (1965), 192-198. Trad. pers. prenant en compte la traduction libre de Hall, A. R. (1957) :

---

« The endeavour from the centre of a body *A* revolving in a circle *AD* towards *D* is of such a magnitude that in the time [corresponding to movement through] *AD* (which I set very small) it would carry it away from the circumference to a distance *DB*: since it would cover that distance in that time if only it were to move freely along the tangent without hindrance to its endeavour.

Now since this endeavour, provided it were to act in a straight line in the manner of gravity, would impel bodies through distances which are as the square of the times: to know through what space they would [be] impell[ed] in the time of a single revolution *ADEA*, I ask for a line which may be to *BD* as the square of the circumference *ADEA* to the square of *AD*. Now  $BE/BA=BA/BD$  (by [Book] 3 [of Euclid's] Elements). But since the difference between *BE* and *DE*, and also between *BA* and *DA* is supposed infinitesimally small, I substitute one for the other in each case and it follows  $DE/DA=DA/DB$ . And then by making  $DA^2$  (or  $DE \times DB$ ) to  $ADEA^2$  as  $DB$  to  $ADEA^2/DE$  I obtain the required line (namely the third proportional of the circumference to the diameter) through which its endeavour of receding from the centre would impel the body in the time of a complete revolution when applied constantly in a straight line.

For example, since that third proportional equals 19.7392 semi-diameters, if the endeavour of approaching to the centre [of the Earth] in virtue of gravity were exactly equal to the endeavour of receding from the centre at the equator due to the diurnal motion of the earth: then in a periodic day it would impel a heavy body through  $19\frac{3}{4}$  terrestrial semi-diameters, that is through 69087 miles: and in an hour through 120 miles. And in a first minute through  $\frac{1}{30}$  mile or through  $\frac{100}{3}$  paces, that is  $\frac{500}{3}$  feet; and in a second minute through  $\frac{5}{108}$  feet or  $\frac{5}{9}$  inches. But actually the force of gravity is of such a magnitude that it moves heavy bodies down about 16 feet in one second, that is 350 times further in the same time the endeavour from the centre [would move them], and thus the force of gravity is many times greater than what would prevent the rotation of the earth from the causing bodies to recede from it and rise into the air.

2. Corollary: Hence the endeavours from the centres of divers circles are as the diameters divided by the squares of the periodic times, or as the diameters multiplied by the [squares of the] numbers of revolution made in any given time. So that since the Moon revolves in 27 days 7 hours and 43 minutes or in 27.3216 days (whose square is  $746\frac{1}{2}$ ) and is distant 59 or 60 terrestrial semidiameters, from the Earth. I multiply the distance of the moon 60 by the square of the Lunar revolution, I, and the distance of the surface of the Earth from the centre, I, by the square of the revolutions  $746\frac{1}{2}$  and so I have the ratio 60 to  $746\frac{1}{2}$ , which is that between the endeavour of the Moon and the surface of the Earth of receding from the centre of the Earth. And so the endeavour of the Earth at the equator is about  $12\frac{1}{2}$  times greater than the endeavour of the Moon to reced from the centre of the Earth. And so the force of gravity [as at the surface of the Earth] is 4000 and more times greater than the endeavour of the Moon to recede from the centre of the Earth.

And if the Moon's endeavour from the Earth is the cause of her always presenting the same face to the Earth, the endeavour of the lunar and terrestrial system to recede from the Sun ought to be less than the endeavour of the Moon to recede from the Earth, otherwise the Moon would look to the Sun rather to the Earth.

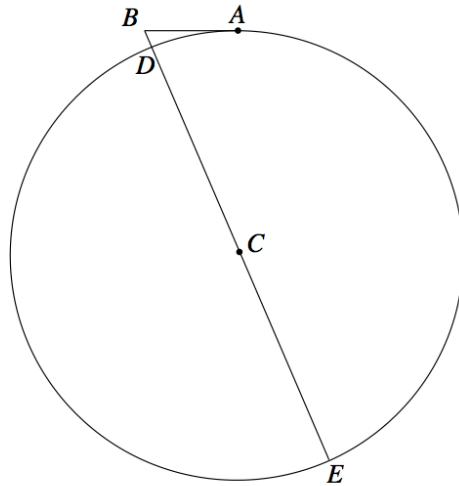


Fig. 3.6. Figure d'après le Manuscrit de Newton I. MS Add 3958, 87r.

But that I may make a more exact estimate in this matter, let 100,000 be the distance of the lunar system from the Sun, and  $y$  the distance of the Moon from the Earth. And since the Moon completes 13 revolutions 4 sig. 12 gr. 52' in a stellar year, or 13.369 revolutions (whose square is 178.73) I multiply the distance of the Sun, 100,000, by the square of its revolution, I, and the distance of the Moon [from the Earth],  $y$ , in the square of her revolutions 178.73 and make 100000 to 178.73 $y$  as the endeavour of the Earth [and the Moon] from the sun to the endeavour of the Moon from the Earth. From which it follows that the distance of the Moon from the Earth ought to be greater than  $100000/178.73$  or  $559\frac{1}{2}$  compared with the distance of the Sun, 100000. And hence the greater solar parallax in the lunar orbit will not be less than 19 minutes, and the Sun's horizontal parallax not less than 19 seconds, reckoned when the Sun and Moon are distant  $90^\circ$  from their apogees. Assume the parallax actually to be 24 seconds and the distance of the Moon from the Earth  $706\frac{3}{4}$ , and the endeavour of the Moon to recede from the Earth to the endeavour of the Earth to recede from the Sun will be about 5:4. And so the force of gravity will be 5000 times greater than the endeavour of the Earth to recede from the Sun. If the great orbit's semidiameter be 100000,  $x$  the Earth's semidiameter, then the endeavour of a man from the Earth to his endeavour from the Sun will be  $365\frac{1}{4} \times 365\frac{1}{2}x$  or 132408 to unity.

Finally since in the primary planets the cubes of their distances from the Sun are reciprocally as the squares of the numbers of revolutions in a given time: the endeavours of receding from the Sun will be reciprocally as the squares of the distances from the Sun. For example in Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn as  $\frac{4}{27}$ ,  $\frac{10}{19}$ , 1,  $2\frac{5}{16}$ ,  $27\frac{1}{8}$ ,  $90\frac{5}{6}$ , or as 1,  $3\frac{5}{9}$ ,  $6\frac{3}{4}$ ,  $15\frac{2}{3}$ ,  $183\frac{1}{2}$ ,  $614\frac{1}{2}$  reciprocally. Or directly as 614; 173; 91; 39;  $3\frac{1}{3}$ ; 1.

3. If a rotating pendulum and a pendulum swinging to- and-fro are of the same depth they return in the same time.

4. If a rotating pendulum and a pendulum swinging to-and-fro are of the same depth, the arc of swing described from the perpendicular is proportional to the chord of [twice] the arc which the rotating pendulum describes in the same time.»

« I. La tendance du centre d'un corps  $A$  se mouvant en cercle  $AD$  vers  $D$ , est de telle grandeur que dans un temps (qui correspond au mouvement *via*)  $AD$  (que je définis très petit) elle le porterait loin de la circonférence à une distance  $DB$  : puisqu'il parcourrait cette distance dans ce temps si seulement il pouvait se mouvoir librement sur la tangente sans empêchement par cette tendance.

Maintenant puisque cette tendance, pourvue qu'elle agisse en ligne droite comme la gravité, obligerait des corps à parcourir des espaces qui sont comme les carrés des temps : afin de connaître l'espace que ces corps seraient forcés de parcourir dans le temps d'une seule révolution  $ADEA$ , Je cherche une ligne qui serait à  $BD$ , comme le carré de la circonférence  $ADEA$  est au carré de  $AD$ . Maintenant  $BE/BA=BA/BD$  (par [le Livre] 3 des Eléments [d'Euclide]). Mais puisque la différence entre  $BE$  et  $DE$ , et entre  $BA$  et  $DA$  également, sont par supposition infiniment petites, Je remplace l'un par l'autre dans chaque cas et il s'ensuit  $DE/DA=DA/DB$ . Puis en faisant  $DA^2$  (ou  $DE \times DB$ ) à  $ADEA^2$  comme  $DB$  est à  $ADEA^2/DE$ , j'obtiens la ligne en question (nommée la troisième proportionnelle de la circonférence au diamètre) par laquelle sa tendance à s'éloigner du centre, quand elle agit constamment en ligne droite, fera avancer le corps dans le temps d'une révolution complète.

Par exemple, puisque la troisième proportionnelle est égale à 19.7392 demi-diamètres, si la tendance à s'approcher vers le centre [de la Terre] en vertu de la gravité était exactement égale à la tendance à s'éloigner du centre à l'Equateur dû au mouvement diurne de la Terre : ainsi dans un jour périodique cette tendance forcerait un corps grave à parcourir une distance de  $19\frac{3}{4}$  demi-diamètres terrestres, ou 69087 *millaria* [i.e. 65423 miles anglais] : et dans une heure une distance de 120 *millaria*. Et dans la première minute  $\frac{1}{30}$  *millaria* ou  $\frac{100}{3}$  paces, ce qui fait  $\frac{500}{3}$  pieds ; et dans une seconde  $\frac{5}{108}$  pieds, ou  $\frac{5}{9}$  *inches*. Mais en réalité la force de la gravité et de telle grandeur que les corps graves descendent en chute libre 16 pieds dans une seconde, parcourue soit 350 fois plus que [celle que les corps auraient parcouru dû à] la tendance à s'éloigner du centre dans le même temps, et ainsi la force de la gravité est beaucoup plus grande que celle qui empêcherait les corps de quitter la surface terrestre et de s'élever dans l'air à cause de la rotation de la Terre.

2. Corolaire : La tendance à s'éloigner des centres de divers cercles est ainsi comme les diamètres divisés par les carrés des temps périodiques, ou comme les diamètres multipliés par le [carrés des] nombres de révolution effectués dans un temps donné. Ainsi, puisque la Lune orbite dans 27 jours 7 heures et 43 minutes ou dans 27,3216 jours (dont le carré est  $746\frac{1}{2}$ ) et que sa distance à la Terre est de 59 ou 60 demi-diamètres terrestres. Je multiplie la distance de la lune 60 par le carré de la révolution lunaire, I, et la distance de la surface de la Terre du centre, I, par le carré des révolutions  $746\frac{1}{2}$  et j'ai ainsi le ratio 60 à  $746\frac{1}{2}$ , qui est celui entre la tendance de la Lune et la surface de la Terre à s'éloigner du centre de la Terre. Et ainsi la tendance de la Terre à l'équateur est approximativement  $12\frac{1}{2}$  fois plus grande que la tendance de la Lune à s'éloigner du centre de la Terre. Et ainsi la force de la gravité est [à la surface de la Terre] plus de 4000 fois plus grande que la tendance de la Lune de s'éloigner du centre de la Terre.

Et si la cause du fait que la Terre voit toujours la même face de la Lune est la tendance de la Lune de s'éloigner de la Terre, la tendance du système Terre-Lune à s'éloigner du Soleil doit être moindre que la tendance de la Lune de s'éloigner de la Terre, sinon la Lune regarderait vers le Soleil plutôt que la Terre.

Mais je peux faire une estimation plus exacte à ce sujet ; soit 100.000 la distance du système lunaire au Soleil, et  $y$  la distance entre la Lune et la Terre. Puisque la Lune complète 13 révolutions 4 sig. 12 gr. 52' dans une année sidérale, ou 13.369 révolutions (dont le carré est 178.73) je multiplie la distance du Soleil, 100.000 par le carré de ses révolutions, I, et la distance de la Lune [de la Terre],  $y$ , au carré de ses révolutions 178.73 et je fais 100000 à  $178.73y$  comme la tendance de la Terre [et de la Lune] du soleil à la tendance de la Lune de la Terre. Il s'ensuit que la distance Lune-Terre doit être plus grande que  $100000/178.73$  ou  $559\frac{1}{2}$  comparée à la distance du Soleil, 100000. Et donc la plus grande parallaxe solaire de l'orbite lunaire ne sera pas inférieure à 19 minutes, et la parallaxe horizontale du Soleil ne sera pas inférieure à 19 secondes, calculée quand le Soleil et la Lune sont à  $90^\circ$  de leurs apogées. Supposons maintenant que la parallaxe est réellement 24 secondes et la distance Lune-Terre  $706\frac{3}{4}$ , et que la tendance de la Lune de s'éloigner de la Terre est à la tendance de la Terre de s'éloigner du Soleil soit à-peu-près 5:4. Et ainsi la force de la gravité sera ainsi 5000 fois plus grande que la tendance de la Terre à s'éloigner du Soleil. Si le demi-diamètre du grand orbite est 100000, et  $x$  est la demi-diamètre de la Terre, la tendance d'un homme à

s'éloigner de la Terre sera à sa tendance à s'éloigner du Soleil sera comme  $365\frac{1}{4} \times 365\frac{1}{2}x$  ou 132408 à l'unité.

Finalement puisque les cubes des distances des planètes primaires au Soleil sont comme les inverses carrés du nombre de révolutions dans un temps donné: les tendances à s'éloigner du Soleil seront comme les inverses carrés des distances au Soleil. Par exemple elles seront pour Mercure, Venus, la Terre, Mars et Jupiter comme  $\frac{4}{27}, \frac{10}{19}, 1, 2\frac{5}{16}, 27\frac{1}{8}, 90\frac{5}{6}$ , ou comme  $1, 3\frac{5}{9}, 6\frac{3}{4}, 15\frac{2}{3}, 183\frac{1}{2}, 614\frac{1}{2}$  réciproquement. Ou directement comme 614; 173; 91; 39;  $3\frac{1}{3}$ ; 1.

3. Si un pendule tournant et un pendule oscillant sur un aller-retour, ont la même profondeur, ils reviennent en même temps.

4. Si un pendule rotatif et un pendule oscillant sur un aller-retour sont de la même profondeur, l'arc d'oscillation décrit depuis la perpendiculaire est proportionnel à la corde [deux fois] l'arc que le pendule rotatif décrit dans le même temps. »

L'auteur établit premièrement le rapport entre la tendance d'éloignement du centre et la gravité à proximité de la surface terrestre. Et il trouve que la gravité est considérablement plus grande que cette tendance. Ce qui explique pourquoi les corps situés sur la surface terrestre ne s'envolent pas. Dans un deuxième temps, il généralise son résultat à tout cercle ce qui lui permet de l'appliquer au système Terre-Lune. Le résultat de ce rapport explique selon l'auteur le fait que la Lune montre toujours la même face à la Terre. Il suppose par la suite que la tendance d'éloignement du système Terre-Lune-Soleil doit être plus petite que celle du système Terre-Lune. Il applique également le rapport des forces, des tendances, à ce système et ensuite à tout système Planète-Soleil. Nous avons mentionné que dans le Vellum Manuscript, Newton cherchait un résultat de chute satisfaisant. Ce que ce résultat doit satisfaire, c'est l'explication des mouvements planétaires par le biais du rapport entre deux *forces*. Comme Hall le remarque très bien<sup>239</sup>, Newton n'utilise le terme force que quand il s'agit de la gravité. Il s'agit alors ici du rapport entre une force et une tendance. On verra par la suite l'événement qui a permis à Newton de constater que le mouvement planétaire ne s'explique pas par le rapport d'une force et d'une tendance, mais d'une seule force centripète : la gravité.

---

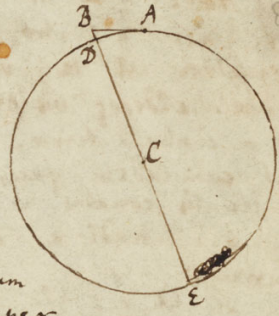
<sup>239</sup> Hall, A. R. (1957), 68.

Une remarque intéressante est faite par Whiteside<sup>240</sup> au sujet du calcul présenté dans ce manuscrit. Whiteside attire notre attention sur le fait que Newton arrondit ces résultats à chaque niveau du calcul d'un côté et que les *données* utilisées dans ce but sont d'exactitude variable. Deux données sont considérées par Whiteside comme exactes : la période de la Lune de son mouvement autour de la Terre et l'estimation de la distance parcourue lors de la chute d'un corps dans une seconde de temps (celle effectuée dans le Vellum Manuscrit). En ce qui concerne la distance Terre-Lune, Newton considère la valeur communément acceptée au XVIIe siècle de 60 demi-diamètres, déduite par une valeur du rayon terrestre considéré de 3500 miles seulement (Dictionnaire de Navigation). Il calcule ainsi aisément que la force de la gravité de la Terre est plus de 4000 fois plus grande que la tendance de la Lune de s'éloigner du centre de la Terre. Newton, nous dit Whiteside, ne semble pas se soucier de la fiabilité (*trustworthiness*) de son calcul. Et à ce point il fait une autre remarque. Whiteside nous rappelle à juste titre le cadre théorique dans lequel ce calcul a été effectué. Pour Newton tout mouvement naturel est implicitement expliqué par la supposition qu'à chaque instant la tendance d'éloignement du centre et la tendance inverse vers le centre sont très précisément en équilibre. Quand celles-là ne sont plus en équilibre, le corps balance entre les deux tendances avec une alternance de descentes et d'élévations. Cette réflexion va suivre l'esprit newtonien jusqu'aux années 1680 et sa correspondance avec Robert Hooke.

---

<sup>240</sup>Whiteside D. T. (1989), xi, xii.

1 Corporis A in circulo AD versus D gyrantis, conatus a centro tantus est quantus in tempore AO (quod pono minutissimum esse) deferret a circumferentia ad distantiam DB: siquidem eam distantiam in eo tempore acquireret si modo conatu non impedito <sup>liber</sup> moveretur in tangente AB.



Jam cum hic conatus corpora, sic modo in directum ad modum gravitatis continuo urgeret, impelleret per spatia que forat ut quadrata temporum: ut noscatur per quantum spatium in tempore unius revolutionis <sup>ADEA</sup> impellerent, quero lineam que sit ad BD ut est quadratum periferia ADEA ad ~~AD~~ AD<sup>2</sup>. Sicut est BE.BA::BA.BD (per 3 lem). Vel cum intr BE ac DE ut et intr BA ac DA differentia <sup>supponitur</sup> infinite parva, substituo pro se invicem et emergit DE.DA::DA.DB. ~~Itaque DB erit DA~~ ~~Itaque denique DA.ADEA::BA~~ ~~(DA)~~ ~~DE~~ ~~faciendo denique DA<sup>2</sup> (sive DE x DB). ADEA<sup>2</sup> :: DB . ADEA<sup>2</sup> / DE~~, obtineo lineam <sup>quadr. Periferia</sup> <sup>circuli</sup> hanc proportionalem in ratione periferia ad diam <sup>in directum constantur applicatus</sup> etrum) per quam conatus recedendi a centro, propelleret corpus in tempore unius revolutionis.

Verbi gratia cum ista hanc proportionalis aequat 19,7392 semidiametros si conatus recedendi ad centrum <sup>in virtute</sup> gravitatis tantus esset quantus est conatus in aequatore recedendi a centro <sup>propter motum terre diurnum</sup>: in die peridico propelleret gravitas per 19 <sup>3</sup>/<sub>4</sub> semidiametros terrestres sive per 69,087, milliana, et in hora per 120 mill. Et in minuto primo per <sup>1</sup>/<sub>30</sub> mill sive per <sup>100</sup>/<sub>3</sub> passus, id est <sup>500</sup>/<sub>3</sub> pedes. Et in minuto secundo per <sup>5</sup>/<sub>108</sub> ped, sive per <sup>5</sup>/<sub>9</sub> digit. Et <sup>numa</sup> tanta est vis gravitatis ut gravia decorsuta pullat 16 <sup>1</sup>/<sub>2</sub> pedes circiter in 1" hoc est 1350 vicibus longius in eodem tempore quam conatus a centro circiter, adeoque vis gravitatis est toties major, ut ne terra cœverhendo faciat corpora recedere et in aera prosilire.

2 Coroll. Hinc in diversis circulis conatus a centro <sup>est</sup> ut diametri <sup>appla</sup> <sup>modo</sup> <sup>ad</sup> quadrata temporum revolutionis, sive ut diametri ducta in numerum <sup>revolutionum</sup> factarum in eodem quovis tempore. Sic cum Luna revolvit in 27 diebus 7 horis et 43' sive in 27,3216 diebus (cujus quadratum est 746 <sup>1</sup>/<sub>2</sub>) ac distat 59 vel 60 semidiametris terrestribus a terra. Dico distantiam D <sup>60</sup> vel <sup>quadratum</sup> <sup>revolutionis</sup> <sup>lunaris</sup> 1; ac distantiam superficiæ terrestris a centro <sup>quadratum</sup> <sup>revolutionum</sup> 746 <sup>1</sup>/<sub>2</sub>, et sic habeo proportionem 60 ad



ad 746 $\frac{1}{2}$ , quæ est inter conatum Luna et ~~gravitatis~~ superficiem terrestri  
 recedendi a centro terræ. Luna ita itaq; conatus superficiem terrestri sub  
 æquatore est 12 $\frac{1}{2}$  vicibus circiter <sup>major</sup> quam conatus Luna recedendi a centro  
 terræ. Ideoq; vis gravitatis est 4000 vicibus major conatu Luna receden-  
 di a centro terræ, et amplius. Et cum si conatus ejus a terra efficit  
 ut cum eadem facie terram semper respiciat; Hujus hanc et hanc  
 systematis conatus recedendi a sole debet esse minor quam conatus  
 Luna recedendi a terra, aliter luna respiciat solem, & potius quam  
 terram.

Sed ut de hac no justiorum æstimationum faciã sit 100000 distantia  
 systematis Lunaris a sole, & y distantia luna a terra. Et cum luna  
 conficit 13 revol: 4 sig: 12<sup>gr</sup> 42' in anno stellari, sive 13,369 revolutionis  
 (cujus quadratum est 178,73) : duco distantiam solis <sup>100000</sup> in quadratum  
 ejus revolutionis 1, et distantiam Luna y in quadratum ejus  
 revolutionum 178,73 et fit 100000 ad 178,73 y, ita conatus terræ  
 a sole ad conatum Luna a terra. Unde constat quod distantia luna  
 a terra ~~non debet~~ esse major <sup>quam</sup>  $\frac{100000}{178,73}$  sive 559 $\frac{1}{2}$  respectu distantia  
 solis 100000. Et inde solis maxima parallaxis in orbita lunari non erit  
~~minor~~ minor 19' et solis horizontalis parallaxis in terra non mino-  
 -rim: esse 24" et erit distantia luna a terra 706 $\frac{3}{4}$ , et conatus ejus  
 recedendi a terra ad conatum terræ recedendi a sole ut 5 ad 4 circiter  
 et sic vis gravitatis erit 5000 vicibus major conatu terræ recedendi  
 a sole. Sit magni orbis  $\pm$  diam 10000, terræ  $\pm$  diam x. Erig; 365 $\frac{1}{4}$  x 365 $\frac{1}{4}$  x (sin -  
 132408, ita conatus hujus a terra ad conatum ejus a sole.  
 Demq; in Planetis primarijs cum cubi distantiarum a sole reciprocè  
 sunt ut <sup>quadrati</sup> numeris periodum in dato tempore: conatus a sole recedendi  
 reciprocè erunt ut quadrata distantiarum a sole. Verbi gratia, in  
 ♃, ♄, ♀, ♂, ♁, ♃ et  $\frac{4}{27}$ ,  $\frac{10}{19}$ , 1,  $2\frac{5}{10}$ ,  $27\frac{1}{8}$ ,  $90\frac{5}{6}$  sive ut 1,  $3\frac{5}{9}$ ,  $6\frac{3}{4}$ ,  $18\frac{1}{2}$ ,  $614\frac{1}{2}$   
 reciprocè. Vel directè ut 614; 173; 91; 39;  $3\frac{1}{3}$ , 1. 15 $\frac{2}{3}$

3 Pendulum ~~gravans~~ <sup>gravans</sup> et undulans si sint æque profunda in eodem  
 tempore redeunt.

4 Si pendulum ~~vibrans~~ <sup>vibrans</sup> et undulans sint æque profunda, arcu  
 vibrantis a perpendiculari <sup>descriptus</sup> sicut ut distantia gyrantis a loco initia-  
 tione ut chorda arcus quem <sup>gravans</sup> descripsit in eodem tempore.

#### 4. La correspondance avec Robert Hooke.

Le deuxième évènement phare pour la construction de la théorie de la gravitation universelle mentionné dans le témoignage de Newton se situe dans sa correspondance avec Robert Hooke l'hiver 1679-80 et non pas l'hiver 1676-77<sup>241</sup>. Cette partie n'est pas directement liée à notre sujet, mais elle est nécessaire. Si l'on veut déterminer l'émergence et le rôle de la précision dans la mesure du temps dans la construction de la théorie gravitationnelle, il faut prendre en compte la totalité des éléments constitutifs de la construction de la théorie. Cette correspondance entre les deux savants a déjà été étudiée à plusieurs reprises par l'historiographie. Son étude a offert un éclairage nouveau sur la construction de la théorie newtonienne. Il a déjà été souligné combien Newton durant cette période était sous l'influence des théories cartésiennes ; l'échange des lettres avec Hooke, lui a permis de voir le système du monde sous un angle différent. Cette correspondance a souvent été étudiée également pour la nouvelle vision qu'elle apporte sur le mouvement diurne de la Terre. Pour nous, cette partie et la suivante nous permettent de faire le pont entre les manuscrits de jeunesse de Newton et la publication de ses *Principia*. Nous poursuivons donc avec l'échange très fructueux des lettres entre les deux savants, qui ont permis à Newton de démontrer les trajectoires elliptiques des planètes.

Robert Hooke était un savant caractérisé par ses *mains d'or*. Pour souligner son talent dans le domaine de la mécanique, ses biographes rappellent un évènement particulier de son enfance. Quand Hooke était un jeune garçon, il aurait vu une horloge démontée et, rapidement, en aurait construit une maquette en bois. Cet amour pour la mécanique

---

<sup>241</sup> Newton se réfère très probablement aux années 1676-77 pour soutenir le fait qu'il est l'inventeur du calcul infinitésimal, et non pas Leibniz. Ce dernier expose sa méthode du calcul différentiel en 1677 dans une lettre adressée à John Collins, membre de la Royal Society de Londres, Dans la Préface du catalogue de la *Portsmouth Collection* (Adams, J. C., Living, G., Luard, H. R., & Stokes, G. G. (1888)) les éditeurs corrigent ses dates dans les notes de bas de page. Il est vrai que la correspondance de Newton de cette période ne nous dévoile rien de relatif à ce sujet, dans le Register Book Original de la Royal Society, Vol. 5 (1675-1680), le seul document de Newton qui correspond à Janvier 1676, avec No. de réf. RBO/5/4, est intitulé « Mr Isaac Newton's Observations Mentioned in his foregoing Hypothesis, and conducing to further Discoveries for completing his Theory of Light and Colors [colours]', il s'agit d'une analyse au sujet de la lumière et des couleurs accompagnée de 24 expériences et observations, lus à la Royal Society le 20 Janvier 1676.

sera déterminant dans le cours de sa carrière. Un élément connu de son caractère, en dehors son cynisme, était son incapacité à suivre ses intuitions scientifiques jusqu'au bout. Elle a fonctionné comme une arme à double tranchant tout au long de sa vie. Elle était bien appréciée par une partie de ses collègues, car Hooke n'avait de cesse de développer d'innombrables idées ; mais souvent elle le mettait en porte-à-faux avec une autre partie de ses collègues pour des questions de priorité. En 1672, sept ans après la publication de son ouvrage majeur *Micrographia*<sup>242</sup>, travail qui amène Hooke à s'interroger sur la nature de la lumière, il établit la base de sa relation avec Newton. Newton, jeune savant à l'époque, envoie son article<sup>243</sup> sur les couleurs à la Royal Society, une théorie conçue en réaction à celle de Hooke<sup>244</sup>. Hooke avait été sollicité en tant que spécialiste pour commenter cet article. La théorie des couleurs de Newton ne coïncidant pas avec la sienne, il l'avait rejetée sans se donner la peine de la comprendre. Sa critique à la Royal Society est soumise le 15 Février et Newton la reçoit quatre jours plus tard.<sup>245</sup> Alors que la critique de Hooke avait été faite en privée celle de Newton<sup>246</sup> apparaît quelques mois plus tard dans les *Philosophical Transactions*<sup>247</sup>.

On voit donc qu'il s'agit d'un début de relation assez tourmenté, qui va donner suite quelques années plus tard à un échange philosophique considérablement plus fructueux. Hooke dans son journal, à la date du Mardi 20 Janvier 1676<sup>248</sup>, semble soupçonner une

---

<sup>242</sup> Un ouvrage entièrement consacré à des observations microscopiques accompagnées par des illustrations de grande qualité, qui propose le microscope comme instrument d'observation pour les biologistes.

<sup>243</sup> Birch T. (1757), *The History of the Royal Society*, London: Millard A., Vol. III, 10-15.

<sup>244</sup> Westfall R. (1986), *Never at Rest*, Cambridge, London, New York [etc.] : Cambridge university press, 243. Concernant la théorie de la lumière de Hooke, il s'agit d'une reprise d'une ancienne théorie qui considérait que les couleurs surgissent après une modification de la lumière, qui elle paraît blanche à sa forme primitive. Hooke n'a pas réussi à voir que Newton dans son article remplaçait l'idée de la modification de la lumière par une nouvelle.

<sup>245</sup> Lettre de Hooke to Oldenburg 15 February 1672, Lettre de Newton to Oldenburg 20 February 1672 in Newton, I. (1959), *The Correspondence*, Turnbull H.W. (eds), Cambridge : Cambridge University Press, Vol. 1.

<sup>246</sup> Lettre No 67 Newton to Oldenburg 11 June 1672, « Mr. Isaac Newtons Answer to Some Considerations upon His Doctrine of Light and Colors; Which Doctrine Was Printed in Numb. 80. of These Tracts Isaac Newton, *Phil. Trans.* 1672 7, 5084-5103, published 1 January 1672 »

<sup>247</sup> *Phil. Trans.* January 1, 1672 7 81-91 5084-5103; (doi:10.1098/rstl.1672.0051)

<sup>248</sup> Hooke R. (1935), *The diary of Robert Hooke, 1672-1680*, Henry W. Robinson H.W. & Adams W. (eds), London : Taylor & Francis, 213. « A letter also of Mr. Newtons seeming

influence d'Oldenburg dans l'existence de malentendus entre Newton et lui durant des longues années (concernant sa critique du 15 Février 1672) et il décide alors de prendre les choses en main. Il lui écrit directement le jour même<sup>249</sup>. C'est la première fois que Hooke communique directement avec Newton sans passer par Oldenburg. Dans cette lettre, Hooke jette les nouvelles bases de sa relation avec Newton. Il exprime ses soupçons et invite Newton à une correspondance privée sur des sujets philosophiques :

« Je suppose que vos aspirations et les miennes sont les mêmes, à savoir la découverte de la vérité, et je suppose que tous deux nous pouvons supporter d'entendre des objections, pourvu qu'elles ne revêtent pas la forme d'une polémique ouverte que nos esprits sont également disposés à se rendre à l'évidence de raisons manifestes tirées de l'expérience. Ainsi donc si vous voulez bien échanger avec moi des lettres sur de tels sujets, je serais très heureux d'entreprendre (une telle correspondance) ; et lorsque j'aurai eu le plaisir de lire d'un bout à l'autre votre excellent traité (dont je n'ai encore rien compris d'autre que ce que m'en a appris l'audition d'une lecture cursive), je prendrai la liberté de vous faire connaître si cela ne vous est pas désagréable, soit mes objections si j'en ai à formuler, soit mon adhésion, si je me sens convaincu – ce qui est plus vraisemblable. »<sup>250</sup>

Newton répond<sup>251</sup> positivement quelques jours plus tard à cette invitation d'échange intellectuel dans l'objectif de la découverte de la vérité sur la base d'une critique productive.

« Cher Monsieur,

À la lecture de votre lettre j'étais extrêmement content et très satisfait de votre généreuse franchise ; j'estime que vous avez agi comme il sied à un véritable esprit philosophique. (...) J'accepte très volontiers votre proposition d'échange de lettres privées. (...) Je serais heureux d'entendre formuler brièvement l'ensemble des

---

to quarrel from Oldenburg fals suggestions. »

<sup>249</sup> Ibid. « Wrote letter to Mr. Newton about Oldenburg kindle Cole. », la lettre en question est la No 152 Hooke to Newton 20 January 1676.

<sup>250</sup> Newton I. (1959), Lettre No 152 Hooke to Newton 20 January 1676, 412-413. Traduction par Koyré A. (1968), *Études Newtoniennes*, Paris : Gallimard, 271.

<sup>251</sup> Newton, I. (1959), Lettre No 154 Newton to Hooke, 5 February 1676, 416-417.

objections les plus fortes qui puissent m'être opposées et je ne connais personne de plus indiqué que vous pour me les adresser. »<sup>252</sup>

Un grand enthousiasme émane de la réponse de Newton. Il reconnaît dans la proposition de Hooke ce qu'il appelle le véritable esprit philosophique, celui de l'ouverture à la critique, et exprime son impatience, vraie ou prétendue, à la réception des objections que Hooke peut avoir. Ce dernier n'a probablement jamais reçu cette lettre (il n'y a pas trace dans son journal), mais son importance reste majeure. Dans cette lettre Newton accepte volontiers un échange philosophique avec Hooke et reconnaît sa contribution à la philosophie en lui attribuant un plus grand nombre de résultats scientifiques que ceux qu'il a publiés.

Dans ce nouveau cadre *d'amitié* philosophique, la question qui a motivé Newton à écrire ses *Principes* émerge. Nous nous référons plus précisément à une période d'échange très intense entre les deux savants entre le 24 Novembre 1679 et le 17 Janvier 1680<sup>253</sup>. La première approche est faite par Hooke à l'occasion d'une nouvelle tâche qui lui avait été attribuée dans le cadre de son poste de secrétaire de R. Society. Hooke devient responsable de la correspondance des savants avec la R. Society et souhaitant insuffler une nouvelle dynamique dans la vie de la R.S., il fait tout son possible pour préserver Newton parmi les savants correspondants. Il essaye ainsi susciter l'intérêt de Newton en lui proposant une série de thèses qui pouvaient stimuler son esprit, de sorte qu'il continue à soumettre ses idées. Cette lettre présente une variété de thèmes. Dans un premier temps Hooke invite Newton à exprimer son avis sur un sujet qui était au centre des intérêts non seulement de Hooke lui-même mais aussi de plusieurs Membres (*Fellows*) de la R.S. également (Wren, Halley). Il s'agit de l'idée que le mouvement céleste des planètes est une composition de deux autres, un mouvement tangential direct et un

---

<sup>252</sup> Traduction par Koyré A. (1968), *Études Newtoniennes*, Paris : Gallimard, 272.

<sup>253</sup> Newton, I. (1960), *The Correspondence*, Turnbull H.W. (eds), Cambridge : Cambridge University Press, Vol. II. Lettres No 235- No 240. Entretemps il y a un court échange entre les deux savants, durant lequel Newton trouve l'occasion de féliciter Hooke pour son nouveau poste de secrétaire de la Royal Society. (Lettre no 214 Newton to Hooke 19 December 1677)

mouvement attractif vers le centre d'un corps<sup>254</sup>. Si l'on considère qu'une planète se meut autour du Soleil, pour expliquer ce mouvement orbital on le pense comme un mouvement composé, résultat des deux autres. Le mouvement que Hooke appelle tangentiel est celui que la planète suit selon le principe d'inertie, un mouvement rectiligne uniforme. Le second mouvement en question, attractif est celui qui attire la planète vers le centre du Soleil, une force centripète, la gravité. Cette idée se trouvait au cœur des préoccupations de Hooke depuis longtemps déjà. Comme dit Whiteside, avec un air de plaisanterie, « Si Hooke rajoutait (dans cette lettre) que la loi des aires de Kepler devait être comprise comme exacte, il aurait donné à Newton, sur un plateau, l'essence d'une solution complète au problème du mouvement planétaire, car tout ce qu'il serait resté à faire aurait été pour lui d'employer ses compétences de mathématicien habile à bon escient, comme il en était capable.»<sup>255</sup>

Un deuxième sujet de réflexion, pour lequel Hooke demande la réaction critique de son correspondant, est sa théorie des ressorts<sup>256</sup>. En 1658 son intérêt est orienté vers le problème des longitudes<sup>257</sup>. Il est persuadé que le problème de la détermination des longitudes sur mer pouvait trouver sa solution dans l'idée d'un chronomètre de précision embarqué à bord d'un navire. Hooke voulait remplacer les pendules comme instrument de précision dans la mesure du temps, dont le mouvement oscillatoire dépendait de la gravité, par une roue vibrante qui oscillerait autour de son propre centre de gravité. L'idée de Hooke a été inspirée par le mécanisme des montres. En 1660 un des prototypes de chronomètres de Hooke a été montré à R. Moray (membre fondateur de la Royal Society). Moray lui a proposé de breveter son invention et il lui a demandé d'améliorer son idée, sous contrat. Néanmoins Hooke refusa, car il pensait que

---

<sup>254</sup> « ... let me know your thoughts of that of compounding the celestial motion of the planetts of a direct motion by the tangent & attractive motion towards the centrall body, »

<sup>255</sup> Whiteside W.T. (1989), *The Preliminary Manuscripts for Isaac Newton's 1687 Principia, 1684-1685*, Cambridge & New York: Cambridge University Press, xiii. Trad. Pers. : « Had Hooke added in final rider that Kepler's area law was to be understood to be exact, he would have be handing Newton on a platter the essence of a complete solution to the problem of planetary motion, since all then remaining to do would have been for him adroitly to employ his mathematician's skill to good effect, as he was able to. »

<sup>256</sup> « Or what objections you have against my hypothesis of the lawes or causes of Springinesse ? »

<sup>257</sup> Complete Dictionary of Scientific Biography (2008), « Hooke, Robert », Vol. 6, New York: Charles Scribner's Sons, 481-488.

son invention ne serait pas protégée pendant le temps qu'il consacrerait à son amélioration, et que, si quelqu'un y parvenait avant lui, lui-même n'en retirerait pas les bénéfices<sup>258</sup>. L'idée du chronomètre a été reprise et perfectionnée de manière ingénieuse par John Harrison au XVIIIe siècle. Pour sa réalisation, Hooke pensait attacher un ressort à l'axe de la roue d'un balancier.

Hooke demande ainsi l'avis de Newton sur la le mouvement céleste vers un corps central, sur sa théorie des ressorts et sur une hypothèse concernant le nouveau système du monde de Malleme De Messange (Il s'agit d'une explication du monde et de sa construction à l'aide de la théorie cartésienne mais non pas en parfait accord avec elle). Il lui communique dans la suite de la lettre un nombre d'informations qui semblent être au centre des préoccupations de la Royal Society : le sujet de la détermination des longitudes, et l'amélioration des cartes, terrestres et marines, en fait partie. À ce sujet Hooke écrit :

« J'ai été également informé de Paris que l'on s'y occupait d'un autre [sujet], à savoir celui de la détermination de la longitude et de la latitude des villes les plus importantes, la première (longitude) par les éclipses des satellites de Jupiter, MM Picard & De la Hire voyagent et MM. Cassini & Römer font des observations à Paris. Dès à présent, ils ont trouvé que Brest en Bretagne était de 18 lieues plus près de Paris que ne l'indiquent toutes les cartes...»<sup>259</sup>

Les résultats français semblent impressionnants. En plus des avancées pratiques les savants français proposent également des solutions aux problèmes géométriques : « Mr Collins m'a fait voir un livre qu'il avait reçu de Paris de la part de La Hire, et qui contient dans un premièrement une nouvelle méthode des sections coniques et deuxièmement un traité *De locis solidis*. Je n'ai pas encore lu tout le livre, mais M Collins le recommande.»<sup>260</sup> Pour finir sur une note astronomique Hooke informe Newton de

---

<sup>258</sup> Centore, F. (1970). *Robert Hooke's contributions to mechanics: a study in seventeenth century natural philosophy*, Hague : Martinus Nijhoff, 4.

<sup>259</sup> Traduction par Koyré A. (1968), *Études Newtoniennes*, Paris : Gallimard, 275.

<sup>260</sup> Ibid.

dernières observations de Flamsteed qui confirment la parallaxe de l'orbite de la Terre<sup>261</sup>.

Dans sa réponse,<sup>262</sup> Newton montre son intérêt pour la lettre de Hooke mais l'informe que, malheureusement, il n'est pas à la hauteur des exigences de cette lettre. À cause du décès de sa mère, Newton a passé plusieurs mois affligé par des soucis n'ayant rien à voir avec ses réflexions philosophiques. Et même avant ce triste évènement familial, il a consacré une période de sa recherche à des études fort éloignées des sujets proposés par Hooke.<sup>263</sup> De plus, il avoue son ignorance à propos des avancées scientifiques proposées par les savants de Londres aussi bien que par ceux de l'étranger, concernant la dernière année écoulée : la preuve, il n'avait jamais entendu ou lu auparavant quelque chose se rapprochant des hypothèses de Hooke sur le mouvement des planètes et sa théorie des ressorts.

Après cette brève introduction sur son inaptitude à répondre aux exigences de Hooke, il donne son avis sur l'hypothèse de Mallement De Messange qu'il déclare utile de part sa simplicité, sans pouvoir encore appréhender comment les orbites des planètes présentées comme des cercles concentriques peuvent avoir un mouvement qui décrit des espaces égaux dans des temps égaux. Il affirme ne connaître personne qui soit « addicted » aux observations astronomiques à l'Université (pour réaliser un projet de cartographie *à la française* sur le territoire anglais), et exprime sa joie de la confirmation de la parallaxe annuelle de la terre par les observations de Flamsteed.

Il propose par la suite une démonstration personnelle du mouvement diurne de la Terre. Dans sa démonstration il fait l'hypothèse d'un corps grave qui tombe d'une certaine distance de la surface de la Terre au centre de la Terre. Il soutient que le corps tombera du côté Est de la perpendiculaire et que sa trajectoire jusqu'au centre de la Terre sera une ligne spiroïdale. À la fin de sa démonstration géométrique, il propose une expérience à faire afin de le confirmer.

---

<sup>261</sup> « Mr Flamstead by some later perpendicular Observations hath confirmed the paralax of the orb of the earth. »

<sup>262</sup> Newton, I. (1960), Lettre no 236, Newton to Hooke 28 November 1679.

<sup>263</sup> Ibid., Note 3: « There is a spécifique record of chemical experiments undertaken between 10 December 1678 and 15 January. »



« (...) je vous fait part ci-après d'une idée à moi concernant la découverte du mouvement diurne de la Terre. À cet effet, je ne considérerai ici que le mouvement diurne seul, laissant de côté (la révolution) annuelle, qui n'influe pas sur l'expérience que je me propose d'exposer. Supposons que  $BDG$  représente le globe terrestre, qui tourne une fois par jour autour du centre  $C$ , en se mouvant d'Ouest en Est, dans l'ordre des lettres  $BDG$  : que  $A$  soit un corps lourd suspendu dans l'air et qui tourne avec la Terre, de telle façon qu'il se trouve perpétuellement au-dessus du point  $B$  de celle-ci. Imaginons ensuite qu'on laisse tomber le corps  $A$  et que sa gravité lui communique un autre vers le centre de la Terre, sans que le précédent d'Ouest en Est s'en trouve diminué. Étant donné qu'avant sa chute le corps était plus éloigné du centre de la Terre que les parties de la Terre auxquelles il parviendra dans sa chute, il en résulte que le mouvement du corps d'Ouest en Est sera plus important que le mouvement d'Ouest en Est de ces parties de la Terre ; par conséquent, il ne descendra pas selon la perpendiculaire  $AC$ , mais en dépassant les parties de la Terre il tombera à l'Est de la perpendiculaire en décrivant dans sa chute une spirale  $ADEC$ , contrairement à l'opinion commune selon laquelle, si la Terre se mouvait, les corps lourds en chute libre seraient dépassés par les parties de la Terre et tomberaient à l'Ouest de la perpendiculaire. Pour une descente de vingt à trente yards, l'écart du corps vers l'Est par rapport à la perpendiculaire sera très petit ; néanmoins, je l'estime suffisant pour permettre de juger du fait. »<sup>264</sup>

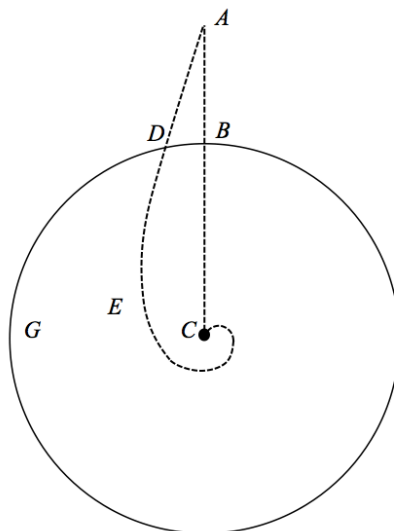


Fig. 3.7. D'après la figure qui illustre dans la *Correspondance*, Newton, I. (1960).

<sup>264</sup> Traduction par Koyré A. (1968), *Études Newtoniennes*, Paris : Gallimard, 281-282.

Le sujet proposé par Newton ici n'est pas celui de la mesure du temps lors d'une chute libre, mais celui de la trajectoire suivie par un corps grave dans sa chute, de 20 à 30 yards de la surface, vers le centre de la Terre. « Le principe explicatif du phénomène est très simple. La rotation de la Terre confère au sommet de la tour une vitesse supérieure à celle de son pied, nous dit Newton, celui-là est plus éloigné que celui-ci du centre de la Terre. Au cours de la chute, le corps conserve par inertie la vitesse horizontale acquise lorsqu'il était solidaire du sommet de la tour. Il progresse donc vers l'est plus vite que le pied de la tour et touchera donc le sol à l'est de celui-ci »<sup>265</sup>. Selon Gappaillard J.<sup>266</sup> il y a une grande probabilité que Newton soit influencé à ce sujet par Galilée. Galilée dans son *Dialogue*, dont Newton avait la traduction anglaise à sa disposition depuis 1661 attire l'attention de ses lecteurs sur le fait que la tête d'un homme parcourt une plus grande distance que ses pieds dans un même temps.

« SAGREDO : (...) N'est-ce pas encore une belle idée qui m'a frappé lors de la même traversée ? Je me suis aperçu que le mât du navire sans rompre ni plier, avait fait un trajet plus long à la hune, autrement dit à son sommet, qu'en son pied. La tête du mât est en effet plus éloignée du centre de la Terre que son pied, elle avait donc décrit un arc de cercle plus grand que le cercle parcouru par le pied.

SIMPLICIO : N'en va-t-il pas de même pour un homme qui voyage ? Sa tête fait un voyage plus long que ses pieds. »<sup>267</sup>

Hooke présente cette lettre de Newton à la R.S. soulignant deux aspects : l'avis de Newton concernant l'hypothèse de Mallement et l'expérience à faire pour démontrer le mouvement diurne de la Terre. L'hypothèse de Newton a été adoptée par la R.S. et la décision de la tester a été prise.<sup>268</sup> Il écrit<sup>269</sup> ensuite à Newton pour l'informer des décisions de la R.S., en le rassurant sur le fait qu'il n'a exposé qu'une partie de la lettre et non pas son intégralité, et pour lui communiquer son avis à propos de la trajectoire que le corps grave suivra lors de sa chute vers le centre de la Terre. Il est vrai que Hooke a

---

<sup>265</sup> Gappaillard J. (1993), *Et pourtant elle tourne*, Paris : Seuil, 219.

<sup>266</sup> Ibid.

<sup>267</sup> Galileo G. ([1632] 1992), *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, traduit par René Fréreau, Paris : Seuil 193.

<sup>268</sup> Birch T. (1757), *The History of the Royal Society*, London: Millard A., Vol. III, 512.

<sup>269</sup> Newton, I. (1959), Lettre No 237, Hooke to Newton, 9 December 1679.

ajouté un élément lors de son interprétation de la démonstration de Newton : « après quelques révolutions »<sup>270</sup> Dans la lettre de Newton, il n'est pas question d'un nombre de révolutions autour de la Terre lors de sa chute. Le passage que Hooke a peut être mal interprété est la phrase suivante :

« que *A* soit un corps lourd suspendu dans l'air et qui tourne avec la Terre, de telle façon qu'il se trouve perpétuellement au-dessus du point *B* de celle-ci»

Le corps avant sa chute est en révolution autour de la Terre, lié à la Terre, suspendu en l'air, il partage ainsi son mouvement.

« Mais quant à la ligne courbe par laquelle vous semblez supposer que le corps descende (idée qui n'a pas été discutée alors), c'est à dire que ce soit une espèce de spirale qui, après quelques révolutions, le laisserait au centre de la Terre, ma théorie du mouvement circulaire me fait penser que cette ligne serait très différente, qu'elle ne ressemblerait point du tout à une spirale mais présenterait plutôt une sorte d'Elliptoïde»<sup>271</sup>

Hooke établit le cadre de sa démonstration géométrique. Il prend le cas de la chute d'un objet sur le plan équatorial terrestre, dans le vide, avec une force gravitationnelle constante, considérant le mouvement diurne de la Terre et un corps qui a le même mouvement que les corps sur la surface de la Terre d'où il commence sa chute. Si l'on se place ainsi depuis la Terre observant le corps en altitude, il nous paraît immobile. De plus à la fin de sa lettre Hooke souligne qu'à la latitude de Londres (51°, 32') le corps ne tombera pas du côté Est de la perpendiculaire mais plutôt du côté Sud-Est, plus vers le Sud que vers l'Est. Newton ne tarde pas à répondre et à donner raison à Hooke dans un premier temps :

« Monsieur,

Je suis d'accord avec vous que dans notre latitude, le corps tombera davantage au Sud qu'à l'Est, si toutefois la hauteur de laquelle il tombe est considérable. Je crois également que si son poids est supposé uniforme il ne descendra pas en spirale vers le centre, mais

---

<sup>270</sup> Trad. pers. : « Vizt a kind of spirall which after sume few revolutions... »

<sup>271</sup> Traduction par Koyré A. (1968), 288.

circulera avec alternance de montées et de descentes provoquées par la force centrifuge et la gravitation qui l'emporte, tour à tour, l'une sur l'autre. J'imagine donc que le corps décrira non pas une forme ellipsoïdale, mais suivra la ligne représentée ici...»<sup>272</sup>

La figure de Newton présente une courbe sous forme de trèfle. Hooke trouve la réponse de Newton adéquate pour une force uniforme qui agit de la même manière indépendamment de la *distance* du centre de la Terre. Mais pour Hooke l'*Attraction* est inversement proportionnelle au carré de la distance suivant les lois de Kepler<sup>273</sup>. C'est donc dans cette lettre que Hooke livre à Newton la clé du problème du mouvement des planètes. Newton n'a pas répondu à la lettre de Hooke. Ce dernier néanmoins a réécrit à Newton une dizaine de jours plus tard. Dans sa lettre, Hooke invite ouvertement Newton à considérer sérieusement son hypothèse sur la gravitation et à établir mathématiquement la courbe décrite par les corps sous l'action de cette force. Il souligne par ailleurs que ce sujet est au centre des intérêts de la R.S. et plus particulièrement des siens<sup>274</sup>.

En 1679, Newton était encore attaché à l'idée des tendances (endeavor) centrifuges plutôt que centripètes. Ce que cet échange avec Hooke a vraiment offert à Newton fut un changement d'orientation, de perspective. À la place d'imaginer une force centrifuge, avec une propension, une tendance à fuir le centre, il a pu imaginer une force centripète, avec une tendance à aller vers le centre.<sup>275</sup>

---

<sup>272</sup> Lettre No 238, Newton à Hooke, le 13 Décembre 1679. Turnbull, Volume II, 307.

<sup>273</sup> Lettre No 239, Hooke à Newton, le 6 Janvier 1680, Turnbull, Volume II, 309. Traduction par Koyré A. (1968), 290.

<sup>274</sup> Lettre No 240, Hooke à Newton, le 17 Janvier 1680, Turnbull, Volume II, 313 « It now remains to know the propriety of a curve Line (not circular nor concentricall) made by a centrall attractive power which makes the velocity of Descent from the tangent Line or equall straight motion at all Distances in Duplicate proportion to the Distances Reciprocally taken. I doubt not but that by your excellent method you will easily find out what that Curve must be, and its propriety, and suggest a physycall Reason of this proportion. If you have had any time to consider of this matter, a word or two of your Thoughts of it will be very gratefull to the Society (where it has been debated) And more particularly to Sr your very humble Servant R. Hooke. »

<sup>275</sup> Newton I. (1999), *The Principia*, a new translation by Cohen B.I. & Whitman A., Berkley, Los Angeles, London : University of California Press, 76-77.

Il ne faut pas oublier qu'ici nous lisons la correspondance entre deux personnages aux attitudes scientifiques différentes. La manière de voir de Hooke, sa manière de comprendre le monde, est mécanique. Pour comprendre le mouvement des corps, Hooke va envisager et réaliser des expériences, il fera des analogies mécaniques.<sup>276</sup> Newton voit le monde à travers les mathématiques. Ici on peut dire que Hooke expose à Newton sa théorie des mouvements des planètes déduite de ses expériences mécaniques et demande à Newton, d'une certaine manière, de réaliser le support mathématique de cette théorie. Ce désir, non pas adressé directement à Newton comme ci-dessus, est exprimé clairement dans son ouvrage *An attempt to prove the motion of the Earth from observations*<sup>277</sup> lu dans un premier temps à la R.S. en 1670 ou 1671<sup>278</sup> et publié un peu plus tard, en 1674 :

« À ce moment, j'expliquerai aussi un Système du Monde différent en plusieurs points de celui connu jusqu'ici et qui suit à tous égards les Règles communes des Mouvements Mécaniques: Le système repose sur trois suppositions.

Premièrement, on admet que tous les Corps Célestes, quels qu'ils soient, sont pourvus d'une attraction ou d'une puissance gravitationnelle vers leurs propres Centres, par laquelle ils attirent non seulement les différentes parties de leur corps, et les empêchent de s'envoler loin d'eux, comme on l'observe pour la Terre, mais ils attirent également tous les autres Corps Célestes qui se trouvent dans leur sphère d'activité ; que, par conséquent, non seulement la Lune et le Soleil ont une influence sur le corps et le mouvement de la Terre, et la Terre sur ceux-ci, mais que ♃, ♀, ♂, ♄, et ♀, par leurs puissances attractives, ont une influence considérable sur son mouvement et que de la même façon la puissance attractive correspondante de la Terre a aussi une influence considérable sur chacun de leurs mouvement.

La deuxième supposition est celle-là, Que tous les corps, quels qu'ils soient, une fois entraînés dans un mouvement direct et simple, continueront à se mouvoir en ligne droite, jusqu'à ce qu'ils soient par d'autres puissances efficaces détournés et courbés en un

---

<sup>276</sup> À voir Nauenberg M. (2005), « Robert Hooke's Seminal Contribution to Orbital Dynamics », in *Physics in Perspective*, Vol 7, Issue 1, 4-34.

<sup>277</sup> Hooke R. (1674), *An attempt to prove the motion of the Earth from observations*, London : Printed by T.R. for John Martyn Printer to the Royal Society, 27-28.

<sup>278</sup> Lohne J. (1960), « Hooke versus Newton : An analysis of the Documents in the Case of free fall and Planetary Motion », *Centaurus*, 7, 13.

Mouvement, décrivant un Cercle, une Ellipse ou quelque autre Ligne Courbe plus complexe.

La troisième supposition est, Que ces puissances attractives sont d'autant plus fortes dans leur action, que le corps sur lequel elles s'agissent est plus proche de leurs propres Centres. À présent je n'ai pas encore vérifié expérimentalement quels sont les divers degrés ; mais c'est une notion, qui une fois pleinement poursuivie comme il doit se faire, aidera considérablement l'Astronome à ramener tous les Mouvements Célestes à une loi certaine, laquelle, et sans cela je doute fort que l'on puisse jamais y arriver véritablement. Celui qui comprend la nature du Pendule Circulaire et du Mouvement Circulaire, comprendra aisément le fondement de ce Principe, et il saura où trouver la voie dans la Nature pour en obtenir une véritable compréhension. Je le sous-entend seulement à présent pour ceux qui ont l'aptitude et l'opportunité de poursuivre cette Enquête, qui ont des compétences satisfaisantes à l'Activité de l'observation et du calcul, leur souhaitant chaleureusement de réussir, ayant moi-même beaucoup d'autre choses en main que je dois achever auparavant, c'est pourquoi je ne peux pas y parvenir aussi bien (La phrase ci-dessus est absente de la traduction de Koyré sans explication). Mais j'ose promettre à celui qui s'attellera à cette tâche qu'il découvrira que tous les grands Mouvements de l'Univers sont influencés par ce Principe, et que sa véritable compréhension par conséquent sera la véritable perfection de l'Astronomie. »<sup>279</sup>

---

<sup>279</sup> Cette traduction est basée sur la traduction proposée par Koyré A. (1968), 277. On a apporté néanmoins des modifications à cette traduction quand nous l'avons jugé nécessaire afin de rester les plus fidèles possible au texte de Hooke.

« At which time also I shall explain a System of the World differing in many particulars from any yet known, answering in all things to the common Rules of Mechanical Motions: This depends upon three Suppositions. First, That all Cœlestial Bodies whatsoever, have an attraction or gravitating power towards their own Centers, whereby they attract not only their own parts, and keep them from flying from them, as we may observe the Earth to do, but that they do also attract all the other Cœlestial Bodies that are within the sphere of their activity; and consequently that not only the Sun and Moon have an influence upon the body and motion of the Earth, and the Earth upon them, but that ☿ also ♀, ♂, ♃, ♄ and by their attractive powers, have a considerable influence upon its motion as in the same manner the corresponding attractive power of the Earth hath a considerable influence upon every one of their motions also. The second supposition is this, That all bodies whatsoever that are put into a direct and simple motion, will so continue to move forward in a streight line, till they are by some other effectual powers deflected and bent into a Motion, describing a Circle, Ellipsis, or some other more compounded Curve Line. The third supposition is, That these attractive powers are so much the more powerful in operating, by how much the nearer the body wrought upon is to their own Centers. Now what these several degrees are I

Ce passage se trouve à la fin de son traité. Il propose une solution sur la question de la cause et de la forme de la trajectoire des planètes autour du Soleil. Juste après la présentation des trois suppositions à suivre afin de résoudre les problèmes des orbites, il invite les savants dotés des bonnes capacités d'observation et aptes en mathématiques à entreprendre un travail sur cette hypothèse et à la démontrer. Il sait que Newton est parmi les candidats les plus aptes pour cette entreprise.

## 5. La visite de Edmond Halley.

Le troisième et dernier évènement mentionné par l'auteur a eu lieu durant l'hiver des années 1684-85 et non pas des années 1683-84<sup>280</sup> comme nous dit Newton. Nous avons plusieurs témoignages<sup>281</sup> qui confirment la date que l'on propose plutôt que celle affirmée par Newton. Nous allons présenter ici deux exemples dans le volume VI du Register Book Original de la Royal Society qui contient, parmi les copies des papiers scientifiques soumis à la R.S. pour la période 1685-87, un registre daté du 10 Décembre 1684. C'est un manuscrit de Newton donc le titre donné par la R.S. est « Définitions par Isaac Newton »<sup>282</sup>. Il s'agit d'un manuscrit qui présente des hypothèses, des problèmes et des questions sur le mouvement des corps, sur la force centrifuge et l'orbite des planètes. Dans une lettre envoyée le 23 Février 1684-5 à Francis Aston, qui était devenu

---

have not yet experimentally verified; but it is a notion, which if fully prosecuted as it ought to be, will mightily assist the Astronomer to reduce all the Cœlestial Motions to a certain rule, which I doubt will never be done true without it. He that understands the nature of the Circular Pendulum and Circular Motion, will easily understand the whole ground of this Principle, and will know where to find direction in Nature for the true stating thereof. This I only hint at present to such as have ability and opportunity of prosecuting this Inquiry, and are not wanting of Industry for observing and calculating, wishing heartily such may be found, having my self many other things in hand which I would first compleat, and therefore cannot so well attend it. But this I durst promise the Undertaker, that he will find all the great Motions of the World to be influenced by this Principle, and that the true understanding thereof will be the true perfection of Astronomy. »

<sup>280</sup> Il s'agit ici encore une fois de la revendication par Newton de l'invention du calcul face à Leibniz qui a lui publié son calcul en 1684 dans la revue *Acta Eruditorum*.

<sup>281</sup> Pour plus de détails sur le sujet voir Herivel J. (1965, 102-108) & Whiteside W.T. (1989).

<sup>282</sup> Royal Society, Records and Papers, Register Book Original Vol. 6 (1685-1687), Ref No RBO/6 /62, « Title : Definitions by Isaac Newton »

Secrétaire de la Royal Society peu de temps avant, Newton mentionne ce registre de la R.S :

« Je vous remercie d'avoir fait entrer dans vos registres mes notions concernant le mouvement. Je les ai conçus pour vous antérieurement mais l'examen de plusieurs choses a occupé une plus grande partie de mon temps que ce que j'avais estimée, et cela en grande partie en pure perte : et à présent je vais aller dans le Lincolnshire pour un mois ou six semaines. Ensuite, j'ai l'intention de le finir dès que j'en aurai l'opportunité etc. »<sup>283</sup> Cette lettre a été lue lors de la Réunion de la Royal Society du 25 Février 1685<sup>284</sup>. Le deuxième témoignage est le compte rendu par Abraham de Moivre :

« (...) en 1684 le Dr Halley lui rendit visite à Cambridge, après qu'ils furent restés quelque temps ensemble, le docteur lui demanda quelle serait à son avis la courbe qui serait décrite par les planètes en supposant que la force d'attraction vers le soleil est inversement comme le carré de leur distance à celui-ci. Sir Isaac répondit immédiatement que ce serait une ellipse ; le docteur, frappé de joie et d'étonnement, lui demanda comment il le savait. Eh bien, dit-il, je l'ai calculé, sur quoi le docteur lui demanda son calcul sans plus de délai. Sir Isaac regarda parmi ses papiers mais ne put le trouver ; il lui promit de le recommencer et de lui envoyer ;<sup>285</sup> Sir Isaac afin de répondre à sa promesse reprit le travail à nouveau, mais ne parvenait pas arriver à la même conclusion qu'il croyait avoir examinée dans le passé avec soin. Il tenta néanmoins une nouvelle façon, qui, bien que plus longue que la première, le ramena à sa conclusion antérieure. Il examina alors attentivement quelle pourrait être la raison pour laquelle le calcul qu'il avait entrepris avant ne s'était pas avéré juste, et il s'aperçut qu'ayant tracé une Ellipse à la main, il en avait dessiné les deux Axes de la Courbe, au lieu de dessiner deux Diamètres quelque peu inclinés entre eux; il eut pu ainsi fixer son imagination sur

---

<sup>283</sup> Newton I. (1960), *The correspondance of Isaac Newton*, Turnbull H.W., F.R.S. (eds.), Cambridge : Cambridge University Press, Vol. II, 1676-1687, Letter No. 278. « I thank you for entering in your Register my Notions about Motion. I designed them for you before now but the examining severall thinges has takes a greater part of my time then I expected, and a great deale of it to no purpose. And now I am to goe into Lincolnshire for a Month or six weeks. Afterwards I intend to finish it as soon as I can conveniently &c. »

<sup>284</sup> Birch Th. (1757), *The history of the Royal Society of London*, London : Printed for A. Millar in the Strand. Vol. IV, 370.

<sup>285</sup> La traduction présentée jusqu'ici est celle de Blay M. (1995), *Les « Principia » de Newton*, Paris : PUF, 39. La suite est une traduction personnelle.



n'importe quel couple de diamètres conjugués, ce qu'il était nécessaire de faire. Ce fait ayant été perçu, il fit en sorte que les deux calculs s'accordent.

Après cela, le Dr Halley fut (je pense) envoyé à Cambridge par la Royal Society pour prévaloir avec Sir Isaac d'imprimer de ses découvertes qui ont donné naissance aux *Principia*»<sup>286</sup>

Ce témoignage nous présente la question posée par Halley à Newton, à savoir quelles seraient les courbes décrites par les planètes si la force d'attraction du Soleil était en proportion inverse du carré de leurs distances. Cette question présentée ici a été fortement discutée par les historiens. Il y a même l'idée que peut-être la question posée par Halley avait été formulée plutôt autrement<sup>287</sup> : quelle est la force qui agit sur les planètes afin qu'elles décrivent les orbites elliptiques autour du Soleil ? Car une orbite elliptique implique une force qui décroît en proportion inverse du carré de la distance, mais une force inversement proportionnelle au carré de la distance n'implique pas forcément une orbite elliptique, mais plutôt une section conique comme une ellipse ou une parabole ou une branche d'hyperbole. Mais si l'on fait l'hypothèse que ces orbites sont des courbes fermées, il est vrai que la question présentée ici semble plus probable, reformulée par Whiteside : comment déterminer de manière dynamique des orbites

---

<sup>286</sup> « (...) In 1684 Dr Halley came to visit him at Cambridge, after they had been some time together, the Doctor asked him what he thought the curve would be that would be described by the Planets supposing the force of attraction towards the Sun to be reciprocal to the square of their distance from it. Sir Isaac replied immediately that it would be an Ellipsis, the Doctor struck with joy & amazement asked him how he knew it, why saith he I have calculted it, whereupon Dr Halley asked him for his calculation without any farther delay, Sir Isaac looked among his papers but could not find it, but he promised him to renew it; & then to send it him, Sir Isaac in order to make good his promise fell to work again, but he could not come to that conclusion which he thought he had before examined with care, however he attempted a new way which tho<sup>u</sup> longer than the first, brought him again to his former conclusion, then he examined carefully what might be the reason why the calculation he had undertaken before did not prove right, & he found that having drawn an Ellipsis coursesly with his own hand, he had drawn the two Axes of the Curve, instead of drawing two Diameters somewhat inclined to one another; whereby he might have fixed his imagination to any two conjugate diameters, which was requisite he should do, that being perceived, he made both his calculations agree together.

After this Dr Halley was (I think) sent down to Cambridge by the Royal Society to prevail with Sir Isaac to print his discoveries which gave rise to the Principia »

<sup>287</sup> Newton I. (1999), *The Principia, Mathematical Principles of Natural Philosophy*, a new translation by Cohen B.I. & Whitman A., Berkley, Los Angeles, London : University of California Press, Note 3, 12.

fermés des planètes autour du soleil ?<sup>288</sup> En 1684 Halley reçut la réponse à sa question sous la forme d'un manuscrit de 9 pages intitulé *De motu corporum in girum* (Add 3965.7 55) Le mouvement d'un corps en orbite. C'est ainsi que la rédaction des *Principia* a été mise sur les rails.

---

<sup>288</sup> Newton I. (1974), *The Mathematical Papers of Isaac Newton*, Whiteside D.T. (eds), Cambridge : Cambridge University Press, Preface vii. « how dynamically to determine the closed orbits of the planets round the sun. »

#### IV. LES PRINCIPES MATHÉMATIQUES DE LA PHILOSOPHIE NATURELLE.

Les *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle* parurent pour la première fois en 1687. La rédaction de ce maître-ouvrage fut extrêmement rapide. Durant la visite de Halley à Cambridge, au mois d'août 1684, Newton a dit que la trajectoire elliptique des Planètes sous l'action d'une force inversement proportionnelle au carré de la distance du centre du Soleil faisait partie des problèmes qu'il avait déjà traités et démontrés, comme on l'a vu. Il promit ainsi à Halley de lui envoyer la démonstration en question et tint sa promesse envoyant au mois de novembre de la même année sa fameuse démonstration. Au mois de février 1685, la Royal Society reçut la copie à consigner dans ses registres.

Entre ce premier manuscrit qui annonçait déjà l'arrivée d'une œuvre majeure et la rédaction du premier Livre des *Principia*, il s'est passé à peine un an et demi. Dans la correspondance entre Halley et Newton (Halley finançait par ses propres moyens ce projet), on trouve la lettre du 7 Juin 1686.<sup>289</sup> Dans cette lettre il est fait référence à un second livre qui aurait comme objet l'application des mathématiques du premier Livre au système du Monde et qui fera partie des *Principia*. Ce qui est devenu ainsi le troisième Livre était dans un premier temps destiné à en être le deuxième. Quelques jours plus tard, le 20 juin<sup>290</sup>, Newton annonce dans sa réponse sa décision de présenter son œuvre en trois livres. Alors qu'il parle du travail déjà effectué vers la fondation du traité en trois livres, des changements effectués dans le premier Livre en vue d'assurer la cohérence avec le IIIe l'amènent à exprimer un doute...peut-être faudrait-il supprimer complètement le troisième Livre. C'est le moins mathématique des trois et le plus philosophique. Et après tout, la Philosophie, nous dit Newton, est une Dame litigieuse, qui peut créer des désaccords. Or Newton pense toujours à se protéger des conflits. Halley réagit rapidement à cette décision et dans sa lettre du 29 juin<sup>291</sup>, il supplie Newton de changer d'avis. Il insiste sur le fait que ce troisième Livre est la clé de voûte de son succès. L'application des démonstrations mathématiques au système du Monde peut seule convaincre les Philosophes, surtout la plus grande majorité d'entre eux, qui ne sont pas des experts en mathématiques. Le 5 juillet 1687 l'ouvrage de Newton est

---

<sup>289</sup> Newton I. (1960), Vol. II, 434.

<sup>290</sup> Ibid., 437.

<sup>291</sup> Ibid., 441-443.

achevé. Suite à la première édition, une deuxième édition augmentée et corrigée paraît en 1713, suivie par une troisième et dernière édition en 1726, un an avant la fin de la vie de son auteur.

Nous allons présenter ici brièvement l'organisation de la troisième édition<sup>292</sup>, que l'on considère comme la plus complète, tout en soulignant les points liés de manière étroite avec notre propos. Cette présentation ne vise pas à rendre compte de manière détaillée de l'ouvrage majeur de Newton<sup>293</sup> mais servira plutôt comme un appui pour une meilleure compréhension de ce qui suit. Nous avons insisté dans l'introduction de cette thèse sur deux parties très précises des *Principia* qui nous occuperont ici. La première est la création de la théorie gravitationnelle, que nous avons identifiée comme la Proposition IV- Théorème IV du troisième Livre des *Principia*, et qui représente la démonstration de ce qu'on appelle le test de la Lune (suivie de la Proposition III pour une compréhension plus approfondie). Et la seconde est l'application de cette théorie à un phénomène particulier, la forme de la Terre, problème traité par l'auteur dans la Proposition XX du troisième Livre également. Newton, surtout pour la Proposition IV - Théorème IV, renvoie le lecteur à des Propositions, des démonstrations géométriques et des corollaires qu'il a déjà présentés au Livre I. Ces éléments sont considérés par l'auteur comme absolument nécessaires pour la compréhension du test de la Lune. Néanmoins il n'y en a aucun pour la Proposition XX concernant la forme de la Terre<sup>294</sup>.

Pour avoir une meilleure visibilité de la complexité des renvois du Livre I, nous avons réalisé ci-dessous un schéma à titre d'exemple des renvois dans la démonstration de la Proposition IV - Théorème IV du Livre III.

---

<sup>292</sup> Deux traductions sont utilisées dans ce chapitre, celle en français par feu de Madame la Marquise du Chastellet (Newton I. ([1726] 1756) et celle en anglais par Cohen I.B. ET Whitman A (Newton I. (1999)).

<sup>293</sup> Ceci a déjà été merveilleusement effectué avec plus ou moins de détails selon le cas par des spécialistes de Newton, en français par Blay M. (1995), en anglais par Guicciardini N. (1999), Newton, I., Cohen, I. B., & Whitman, A. (1999), etc.

<sup>294</sup> Les Propositions liées à la Forme de la Terre sont au nombre de trois, les XVIII, XIX et XX. Celle qui nous intéresse ici et la XXe, car c'est la seule qui inclut à son sein un rapport avec la mesure du temps et sa précision, puisqu'elle utilise les pendules comme instruments à l'aide desquelles on peut déterminer la forme de la Terre avec précision.

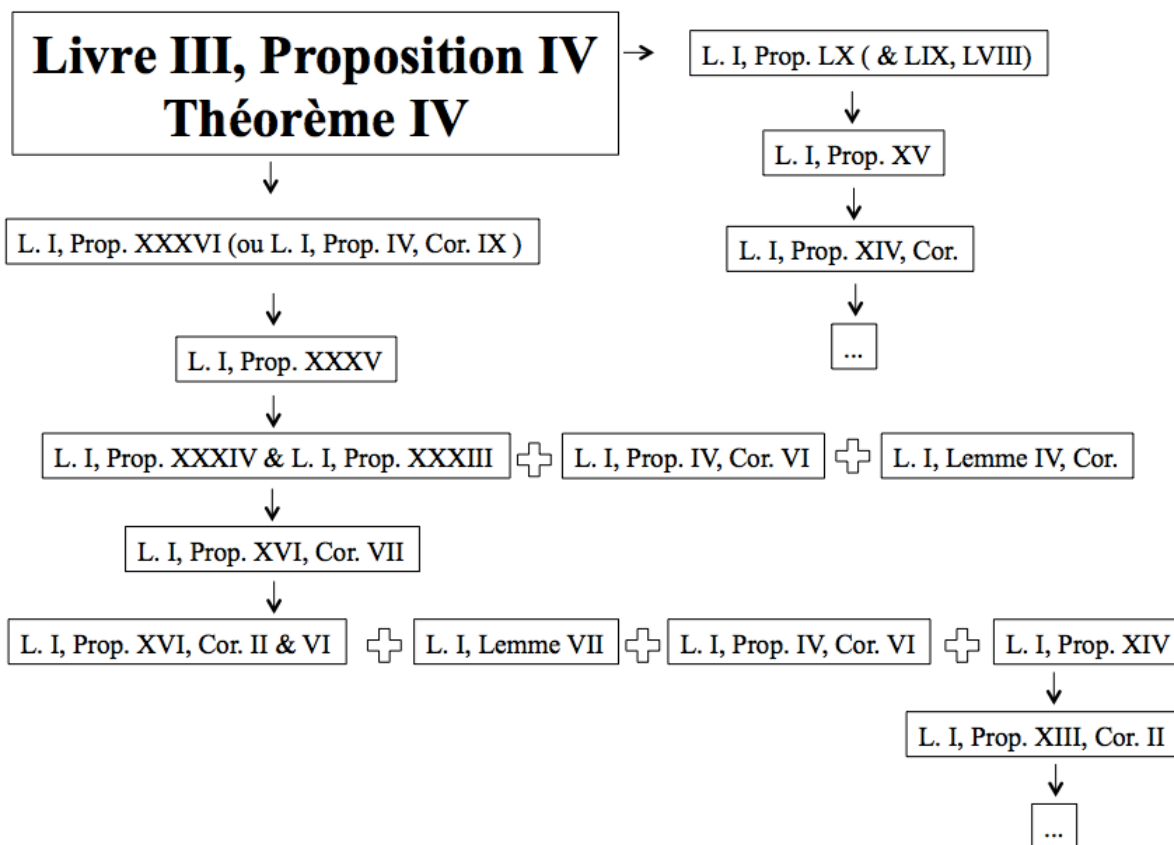


Fig. 4.1. Schéma des renvois.

Ce schéma nous permet de voir clairement la complexité des renvois newtoniens, chaque renvoi menant à d'autres renvois et ainsi de suite. Afin de comprendre la Proposition en question, l'auteur nous demande une bonne connaissance d'une partie du Livre I, assez volumineux par ailleurs. Afin d'éviter d'entrer dans une analyse un peu trop mathématique, nous allons mettre un accent particulier dans cette présentation sur la Proposition IV-Théorème IV que l'on considère indispensable sans nous appesantir sur les détails des renvois, mais en expliquant brièvement leur importance pour la Proposition en question, quand on le jugera absolument nécessaire.

On voit ainsi l'importance de la présentation du Livre I, comme une étape préparatoire qui nous amènera aux Propositions, que l'on considère ici centrales pour notre sujet et qui se développent pleinement au Livre III. S'il y a un intérêt particulier pour le Livre II, il est plutôt restreint. Ce que nous allons souligner lors de la présentation de ce Livre, ce sont les expériences effectuées par Newton avec les pendules dans les milieux résistants. Il n'est pas question ici de mesure du temps, ou d'utilisation du pendule comme un

instrument du temps, mais des observations d'une certaine précision afin d'estimer la résistance des milieux. L'estimation de la résistance du milieu nous intéressant tout particulièrement est celle de l'air. Après l'avoir estimée, l'auteur l'utilise pour la chute des corps et les mouvements des pendules à secondes ( $T= 1$  sec). Dans cette partie, l'accent sera mis sur la Scholie Générale de la Sixième Section intitulée *Du Mouvement et de la Résistance des Corps Oscillants*. Inutile d'insister sur l'importance de la présentation du Livre III, puisqu'il se trouve au cœur même de notre recherche.

L'ensemble des trois Livres des *Principia* forme un ouvrage caractérisé par ses démonstrations géométriques dans sa quasi-totalité. Il s'ouvre pourtant de manière plutôt littéraire et artistique. Les rideaux derrière lesquels se cachent les merveilles de la Philosophie Naturelle s'ouvrent avec un poème, une ode écrite par Edmond Halley pour célébrer l'auteur de cet ouvrage, comme on célèbre un héros, et pour rendre compte d'un grand évènement, la publication de l'ouvrage lui-même. Cette ode écrite en 1786, emprunt du ton majestueux et du romantisme de celui qui s'émerveille devant le spectacle de l'univers, montre la grande admiration que Halley portait à Newton. Cet ode apparaît pour la première fois dans la première édition, et elle réapparaît dans les éditions suivantes, cette fois-ci corrigée par Richard Bentley<sup>295</sup>. Elle est néanmoins absente dans la traduction du livre en anglais par Andrew Motte paru en 1729. Et, dans la traduction française de la Marquise du Chatelet, elle est remplacée par l'ode de Voltaire faite à cette grande savante du XVIIIe siècle. À la suite de cette entrée lyrique corrigée lors de la troisième édition et dédiée au génie mathématique de Newton, on découvre une série de préfaces : la préface de l'auteur pour la première (8 Mai 1686) et la deuxième édition (28 Mars 1713), la préface de l'éditeur Roger Cotes pour la troisième édition (12 Mai 1713) et la préface de l'auteur pour la troisième édition (12 Janvier 1725-26).

Le titre de l'ouvrage nous dévoile l'intention principale de son auteur. Newton veut introduire de la certitude dans l'étude de la Philosophie Naturelle en utilisant comme outil principal le raisonnement mathématique. Pour mieux appréhender cette idée nous

---

<sup>295</sup> Gjertsen D. (1986), *The Newton Handbook*, London & New York : Routledge & Kegan Paul, 460.

allons nous référer à Niccolo Guicciardini<sup>296</sup>. Guicciardini dans son ouvrage *Reading the Principia*, dans la partie intitulée *Prisca Geometria*, tout en soulignant l'importance de la redécouverte newtonienne de la synthèse de la présentation des théorèmes géométriques des Anciens, nous renvoie à une autre préface destinée aux *Principia*, et composée par Newton vers la fin des années 1710<sup>297</sup>.

L'objet de cette préface est la présentation de l'analyse et de la synthèse comme méthodes mathématiques utilisées par l'auteur dans les *Principia*. Suivant Newton, l'analyse est d'origine arithmétique et la synthèse le processus nécessaire de la composition des théorèmes géométriques. La relation entre les deux, analyse et synthèse, est présentée par l'auteur comme suit (dans une traduction libre en français de notre part à partir de l'excellente traduction du latin en anglais de D.T. Whiteside) :

« Les anciens ont traité les problèmes géométriques à l'aide d'une double méthode, à savoir l'analyse et la synthèse, ou, la résolution et la composition, comme cela apparaît clairement chez Pappus. Par la méthode analytique, ils faisaient émerger leurs propositions, et, une fois qu'elles étaient établies, ils en faisaient la démonstration par la synthèse, de sorte qu'elles puissent être admises dans la géométrie. Car la gloire de la géométrie consiste dans la certitude absolue qui en découle, et par conséquent rien ne devrait être admis en elle sans qu'il soit rendu entièrement certain. Cette certitude émane des démonstrations, et les démonstrations des anciens étaient toutes synthétiques. L'Algèbre n'est rien d'autre que l'arithmétique appliquée aux affaires géométriques, et ses opérations sont compliquées et excessivement sensibles aux erreurs, et elle peut être comprise uniquement par les savants spécialisés en algèbre. Cependant les propositions géométriques, doivent être développées de telle manière qu'elles puissent être appréciées par la grande majorité et qu'elles laissent ainsi une empreinte importante dans les esprits grâce à leur clarté, et elles ont besoin par conséquent d'être synthétiquement démontrées. L'analyse est utile pour rechercher les vérités, mais pour atteindre la complète certitude, nous avons besoin de la composition,

---

<sup>296</sup> Guicciardini N. (1999), *Reading the Principia*, Cambridge : Cambridge University Press, 102-103.

<sup>297</sup> Newton I. (1981), *The Mathematical Papers*, Whiteside, D. T. (eds), London : Cambridge University Press, Volume VIII, 442-459.

de la démonstration ; alors les vérités deviennent transparentes, claires et manifestes à tous ; quand une proposition n'est pas démontrée synthétiquement, en accord avec la compréhension des anciens, quand elle est non prouvée, elle ne devrait pas être admise en géométrie. (...)

Et à ce compte, dans les livres qui suivent, j'ai composé les propositions, que j'ai trouvées par l'analyse, afin de les rendre absolument certaines et dignes d'être admises en géométrie grâce à leur certitude. (...)

Car la force de la géométrie et tout son mérite réside dans la certitude absolue de ses affaires, et cette certitude réside dans ses démonstrations magnifiquement composées. L'appréciation de cette science ne doit pas se réserver à la clarté de son écriture mais à la certitude des choses également. Et à ce compte, dans le traité qui suit, j'ai démontré synthétiquement les propositions trouvées par l'analyse. »<sup>298</sup>

L'exposé de la relation entre l'analyse et la synthèse ici, comme outils au service de la certitude des vérités, est d'une clarté stupéfiante. L'analyse nous dévoile des vérités et la composition géométrique signe leur certitude. Il ne faut pas oublier pour autant que cette préface est écrite lors de la dispute avec Leibniz sur la priorité du calcul différentiel et intégral. L'objectif premier de l'auteur est de nous convaincre que toutes les vérités exprimées dans son ouvrage étaient dans un premier temps trouvées avec les outils algébriques pour qu'elles soient par la suite composées et présentées géométriquement au nom de la certitude. La réalité des mathématiques newtoniennes utilisées dans les *Principia* est bien plus complexe que celle présentée par son auteur<sup>299</sup>. Deux notions sont liées ainsi à la géométrie, la dernière précision, comme nous avons vu dans le chapitre I de cette thèse, et la certitude des vérités. La certitude est une notion à définir, au même niveau que la vérité. La définition de la certitude dans le dictionnaire de Trévoux est exposée ici, et celle de Chambers dans la *Cyclopaedia* est en parfait accord<sup>300</sup> avec elle.

---

<sup>298</sup> Newton I. (1981), 449-453.

<sup>299</sup> Pour une étude détaillée de cette complexité voir Guicciardini N. (1999), 90-95.

<sup>300</sup> Chambers E. (1680-1740), *Cyclopaedia*, Volume I, 184. (The ARTFL Project.)



« CÉRTITUDE, f.f. Vérité assurée. La *cértitude* est proprement une qualité des jugemens de notre esprit ; c'est l'adhésion de notre esprit à la proposition que nous affirmons ; c'est la force avec laquelle nous y adhérons. »<sup>301</sup>

La certitude repose ainsi sur l'adhésion de notre esprit et sur la force avec laquelle cette adhésion se produit. Afin d'adhérer à une proposition, il est nécessaire que la proposition en question soit capable d'inclure en son sein une certaine universalité. C'est pour cette raison que Newton dans cette préface, quand il s'agit de la certitude des démonstrations géométriques, fait appel à la clarté que ces démonstrations offrent à l'esprit. Une proposition claire est plus susceptible d'emporter avec force l'adhésion. Par conséquent, présenter une vérité avec clarté c'est ajouter la force nécessaire afin que l'esprit puisse y adhérer. De cette manière la vérité acceptée par la majorité, comme nous dit Newton, est assurée et devient ainsi universelle. « La *cértitude* ne convient qu'au jugemens, (... et elle) est de la même nature que l'évidence qui la produit. »<sup>302</sup> La certitude géométrique est d'une grande évidence. Nul ne peut nier avoir adhéré avec force à la proposition que (dans un cadre de géométrie euclidienne) « les trois angles d'un triangle sont égaux à deux angles droits »<sup>303</sup>. La notion de certitude néanmoins n'est pas réservée à la géométrie selon Trévoux. Elle appartient au même titre à la Métaphysique, à la Physique (au sens des sensations corporelles et non pas de celui de la Philosophie Naturelle mathématisée, ex. il y a du feu sur ma main, ma main est brûlée, ceci est une proposition certaine) et à la Morale. L'adhésion à une proposition, la force avec laquelle on y adhéra, et la priorité que l'on donnera à chaque *branche* capable de certitude relèvent ainsi d'une décision intellectuelle. Trévoux insiste dans sa définition sur la priorité que l'on doit donner à la certitude des écritures saintes. Avant tout, notre esprit doit adhérer avec toute sa force aux vérités de Dieu. La foi devient quelque part, au XVIIe siècle, le critère de l'adhésion de l'esprit aux autres types de certitudes, qu'elles soient métaphysiques, physiques ou morales.

La certitude mathématique est admise. L'idée d'utiliser les mathématiques au service de la Philosophie Naturelle, pour la certitude offerte par cette pratique, était en plein

---

<sup>301</sup> Dictionnaire, D. T. (1738-1742).

<sup>302</sup> Ibid.

<sup>303</sup> Ibid.

enracinement. Mais le fait que les mathématiques ne constituent pas une science, car elles ne révèlent pas des relations causales, était aussi bien présent dans les esprits. Malgré tout, Newton présente comme une affaire close la soumission des phénomènes naturels aux lois mathématiques, comme pratique *officielle* de ces contemporains avec le rejet des « formes substantielles & les qualités occultes » qui l'accompagnent.

La préface de l'auteur de 1686 est une sorte de traité argumentatif en faveur de la mathématisation de la Philosophie Naturelle. Newton pour documenter son propos fait appel aux anciens et plus précisément à Pappus. Selon Pappus, il y a deux « classes » de la Mécanique, une théorique et une pratique. Ce deux « classes » correspondent pour Newton à la géométrie et à l'art de la mécanique, deux aspects de la Mécanique vue dans son intégralité, intrinsèquement liés entre eux de manière *naturelle*. C'est ce lien qui explique le choix de l'usage des mathématiques, non seulement comme langage nécessaire à l'appréhension des phénomènes naturels mais comme un élément qui appartient avec l'art de la mécanique, au même ensemble, celui de la Mécanique vue dans sa totalité. L'art de la mécanique et les phénomènes naturels semblent entrelacés dans ce propos. La géométrie, nous dit l'auteur, se situe dans une relation d'appartenance avec l'art de la mécanique, car grâce à cet art nous obtenons la description des lignes droites et des cercles sur lesquels elle est fondée. La preuve de cette relation intrinsèque réside dans le fait que celui qui veut s'instruire sur la science de la géométrie doit avant tout pouvoir décrire les lignes droites, les cercles etc. « La Géométrie est donc fondée sur une pratique mécanique, & elle n'est autre chose qu'une branche de la Mécanique universelle qui traite & qui démontre l'art de mesurer. ». Par conséquent les fondements mêmes de la géométrie, se trouvent dans l'art de la mécanique. La cause de leur séparation se trouve dans la pratique de cet art. Cet art qui souffre d'inexactitude, selon l'auteur, non pas parce qu'elle est par nature inexacte mais parce que les artisans « ont coutume d'opérer peu exactement ». Cette coutume est à l'origine de la distinction entre la géométrie et l'art de la mécanique.

L'outil, la géométrie, utilisé dans cet ouvrage étant précisé, il reste à présenter son sujet central. Le défi principal de la Philosophie Naturelle est dans un premier temps la détermination des forces employées par la nature dans les mouvements. Pour Newton, cette détermination est primordiale et l'absence de cette connaissance, d'après lui, est la

cause des difficultés rencontrées jusqu'ici par les philosophes pour expliquer et appréhender avec justesse la nature. Cette première étape permettra de démontrer d'autres phénomènes. Cet objectif dicte l'organisation de l'ouvrage en trois Livres. Les trois Livres néanmoins n'ont pas la même origine. Alors que les deux premiers Livres sont le développement soigné d'un manuscrit qui est connu sous le titre *De motu corporum*<sup>304</sup>, le troisième Livre trouve ses origines dans un traité de vulgarisation du Système du monde. Ces origines nous aident à comprendre pourquoi les deux premiers Livres ont un très fort caractère mathématique et pourquoi le troisième est si particulier.

Avant de débiter son premier Livre, l'auteur présente une série de définitions (*Definitiones*) concernant des notions nouvelles ou rarement utilisées, comme il nous le dit dans la scholie qui suit. Ces notions sont la quantité de matière et sa mesure, la quantité du mouvement et les différents types de forces : la « *vis insita* » (la force qui réside dans la matière), la *vis* « *impressa* » (la force imprimée), la force centripète et ses quantités absolues, accélératrice et motrice. Nous n'allons pas présenter ici les différentes définitions en question mais nous allons en faire usage à chaque fois que nous le trouverons nécessaire dans le cadre de notre propos.

Dans la Scholie qui suit Newton tend à éclaircir des notions communément usitées. Ces termes sont fondamentaux pour la construction du cadre au sein duquel se produit tout mouvement. Il s'agit du temps, de l'espace, du lieu et du mouvement lui-même. Newton introduit ici une nouvelle manière de voir ces notions loin de nos capacités perceptives qui ne les traitent qu'en relation aux objets sensibles, et qui peuvent nous induire en erreur. Le lieu est défini comme l'espace occupé par un corps. Les trois autres termes, subissent une distinction nette. Le temps, l'espace et le mouvement se distinguent en termes absolus et relatifs. Le terme essentiel pour notre travail ici est la *définition* du temps, que nous avons traitée en détail dans la partie intitulée « *Isaac Newton, le temps absolu, une éternité dynamique* » du Chapitre II de cette thèse.

Après ces définitions des termes nouveaux et des termes à éclaircir, le lecteur se trouve face à une partie dédiée aux trois lois du mouvement (*Axiomata, sive leges motus*),

---

<sup>304</sup> MS Add.3965, University of Cambridge, Digital Library.

suivies des six Corollaires qui sont soit des démonstrations des propositions liées à ces lois, soit des conclusions tirées de ces lois, soit les deux à la fois pour finir avec une Scholie. La première loi est la présentation du principe d'inertie, de l'idée que « *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve* » sauf dans le cas où une force intervient et change son état. La deuxième loi concerne la manière dont ce changement se réalise « *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.* » Et la troisième et dernière loi concerne l'égalité et l'opposition entre action et réaction entre deux corps « *L'action est toujours égale et opposée à la réaction; c'est-à-dire, que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, et dans des directions contraires.* ». Un autre élément essentiel également présenté dans cette section est l'idée de la décomposition des forces, l'idée qu'une force peut être le résultat de la composition de plusieurs forces.

#### 1. De motu corporum: liber primus

La mise en place des définitions et des lois étant faite par l'auteur, il lui reste à introduire la méthode mathématique utilisée dans son ouvrage. Ceci se passe au début du premier Livre qui est composé au total de 14 sections. Dans ce Livre, l'auteur traite la question du mouvement dans les milieux qui ne présentent pas de résistance pour les corps mouvants, considérant ces corps, dans la plus grande partie (Sections II-X), comme des points mathématiques. Pour ce faire, l'auteur établit la méthode mathématique qu'il utilisera par la suite dans toutes ses démonstrations : « la méthode des premières et dernières raisons employée dans tout cet ouvrage » présentée en 11 Lemmes et deux Scholies à la première section du premier livre.

Les premières et dernières raisons correspondent à la naissance et à l'évanouissement des quantités. La notion essentielle de cette méthode est celle de limite. Pour mieux appréhender cette idée, nous allons utiliser l'exemple donné par l'auteur dans la Scholie de la fin de la première section concernant les dernières raisons, ou autrement dit le moment où les quantités s'évanouissent. Imaginons un corps en chute libre, lors de sa chute uniformément accélérée le corps atteint une certaine vitesse. La vitesse à la limite de cette chute n'est pas considérée comme celle juste avant que le corps touche le sol, ni

comme celle juste après que le corps ait touché le sol, mais celle au moment même où il touche le sol. C'est à cet instant que Newton se réfère quand il utilise la notion de limite dans ses démonstrations géométriques : « (...) j'ai mieux aimé employer celle (méthode) des premiers & derniers raisons des quantités qui naissent & s'évanouissent ; & j'ai commencé par faire voir, le plus brièvement que j'ai pu, ce que deviennent les quantités, lorsqu'elles atteignent leurs limites. »<sup>305</sup> La vitesse de la chute dans cet exemple s'entend au nom de la dernière vitesse. La grandeur de cette dernière vitesse est une quantité divisible *évanouissante*. À la limite les quantités sont divisibles mais *évanouissantes*. Cette méthode des premières et des dernières raisons a été considérée par la Marquise du Châtelet comme le fondement de la géométrie de l'infini. Ou autrement dit, comme l'explique Michel Blay<sup>306</sup>, c'est une méthode qui permet à Newton « d'éviter les pièges des indivisibles », liés au fameux paradoxe de Zénon, et d'établir une sorte d'économie dans les démonstrations des « anciens géomètres ». Newton utilise fréquemment l'idée qui résulte de la démonstration du Lemme VII, qu'à la limite, là où les quantités diminuent à l'infini, les tangentes, les arcs et les cordes deviennent égaux.

Les 13 sections qui suivent constituent une suite de démonstrations des propositions générales sur le mouvement. Dans la Section II (Propositions I-X), on trouve l'étude du mouvement d'un corps, considéré comme un point mathématique, sous l'action d'une force centripète, la force qui fait tendre les corps vers un centre.

Newton traite mathématiquement le problème du mouvement d'un point sous l'action d'une force centrale dans tous ces aspects. Dans la première Proposition de cette section, Newton démontre que les corps qui se meuvent, en mouvement curviligne, sous l'influence d'une force centripète, obéiront à la loi des aires de Kepler et décriront des aires égales dans des temps égaux. Ce qui lui permet d'inverser et de démontrer à la Proposition II qui suit que tout corps qui se meut, en mouvement curviligne obéissant à la loi des aires, est obligatoirement sous l'action d'une force centripète. Cette étude permet à Newton la mise en avant de la relation entre la loi des aires de Kepler et le principe d'inertie, « ...la description d'aires égales en temps égaux marque que le corps

---

<sup>305</sup> Newton I. ([1756] 1759), Livre I, 47.

<sup>306</sup> Blay M. (1995), *Les « Principia » de Newton*, Paris : PUF, collection Philosophies, 55-56.

qui décrit ces aires éprouve l'action d'une force qui agit sur lui, qui le retire du mouvement rectiligne, et qui le retient dans son orbite ; »<sup>307</sup>. Il arrive ainsi par la suite à formuler au Corolaire VI de la Proposition IV que les forces centripètes sont inversement proportionnelles au carré de la distance du centre du cercle décrit par le mouvement du corps en question. Kepler a découvert que les six planètes qu'il connaissait suivaient un mouvement orbital tel que leur temps périodiques était en raison de  $\frac{3}{2}$  de leurs rayons, leurs distances au centre des *forces*. Newton ici n'affirme pas la troisième loi de Kepler, mais il explore plutôt les conséquences d'une telle découverte appliquée dans le cas particulier des mouvements circulaires uniformes autour d'un centre des forces. À ce stade l'étude de Newton reste dans le cadre de l'hypothèse, il fait plusieurs suppositions et il prend note de ses résultats. Il n'est pas encore à l'application de ses résultats dans le monde physique. C'est à la Proposition IV - Théorème IV, que Newton nous renvoie dans la Proposition IV-Théorème IV du troisième Livre, dont l'énoncé est le suivant :

*« Les corps qui parcourent uniformément différents des cercles sont animés par des forces centripètes qui tendent au centre de ces cercles, et qui sont entre elles comme les carrés des arcs décrits en temps égal, divisés par les rayons de ces cercles. »*

Newton considère le cas d'un mouvement d'un corps, circulaire et uniforme autour d'un centre, dans lequel la gravité est la force centripète. Il fait ainsi le lien mathématique entre deux mouvements où la seule force exercée est celle de la gravité, le mouvement circulaire uniforme et le mouvement uniformément accéléré de la chute libre. Afin de mieux appréhender cette Proposition de grande importance pour notre propos, nous reprenons l'analyse de Dana Densmore dans son ouvrage *Newton's Principia, The central Argument*<sup>308</sup>.

Le point de départ de Newton dans cette Proposition est l'orbite dessinée par un corps. À partir de l'orbite donnée, il cherche à déterminer la force qui agit sur le corps et qui l'*oblige* à suivre une trajectoire particulière. Les corps en question se meuvent en

---

<sup>307</sup> Newton I. ([1726]1759), Livre I, Proposition III, IIe Section.

<sup>308</sup> Newton, I., & Densmore, D. (2003). *Newton's Principia: the central argument*. Santa Fen New Mexico: Green Lion Press, 154-178.

mouvement circulaire uniforme. Densmore remarque sur ce point, à juste titre, que Newton ne se réfère pas à des orbites circulaires concentriques<sup>309</sup>. Les cercles dessinés par les corps peuvent avoir des centres différents. Newton néanmoins, dans sa première édition traite le problème de deux cercles concentriques, mais en prenant en compte l'évolution de cette Proposition au fil des trois éditions, nous pouvons considérer avec Densmore que dans la troisième édition Newton laisse le choix de l'hypothèse de cette démonstration ouverte. Il peut très bien s'agir de deux cercles concentriques ou de deux cercles qui n'ont pas de centre commun.

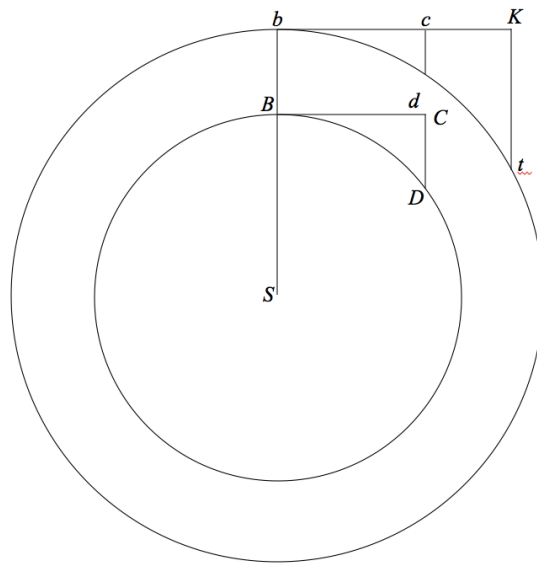


Fig. 4.2. D'après la figure présentée dans la première édition des *Principia*.

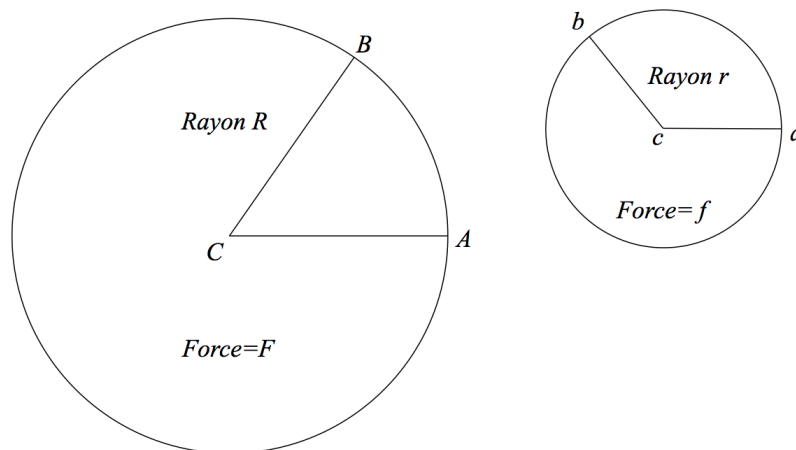


Fig. 4.3. D'après la figure proposée dans Densmore D. (2003).

<sup>309</sup> Cohen I.B. (in Newton I. (1999), 449-450)), considère seulement le cas des cercles concentriques, dont la démonstration géométrique diffère de celle de Densmore. Mais puisque Newton ne précise pas dans la troisième édition de ses *Principia* la concentricité des cercles, on a préféré suivre ici l'exemple de Densmore.

Les données de cette Proposition sont au nombre de deux : a) les corps se meuvent décrivant des circonférences circulaires et b) les corps se meuvent uniformément. L'objectif est de déterminer la relation des forces qui causent ces mouvements, de démontrer que les forces centripètes qui agissent sur deux corps qui décrivent des cercles quelconques a) tendent vers le centre des cercles, b) sont entre elles comme les carrés des arcs décrits dans un même temps sur ces deux cercles divisés par leur rayons respectifs.

$F : f :: (\text{arc}AB^2 : \text{arc}ab^2)$  divisé par  $(R : r)$  ou autrement dit  $F$  varie comme  $\frac{\text{arc}AB^2}{R}$ <sup>310</sup>

Newton ne donne pas la démonstration de cette Proposition. Il nous présente une explication assez laconique, et nous renvoie à la démonstration de la Proposition I, aux Corollaires II et IV de la Proposition II et au Lemme VII, qui précèdent celle-ci. Aucune démonstration n'est présentée non plus par Newton pour les Corollaires qui suivent la Proposition IV. Cette Proposition, avec ces Corollaires respectifs, n'est pas restée intacte au fil du temps comme nous l'avons mentionné plus haut. Dans la première édition, Newton donne une démonstration géométrique en considérant les deux cercles concentriques<sup>311</sup>. Et celle-ci n'est pas la seule différence entre les différentes versions. Les formulations et le nombre de Corollaires évoluent également au fil du temps. Le Corollaire 9, relatif au Test de la Lune, qui est d'importance primordiale pour nous ici, est absent à la première édition<sup>312</sup>.

Dans le Corollaire 9 de cette Proposition, élément essentiel pour l'universalisation de la gravité exprimée par le test de la Lune, Newton nous dit que « l'arc qu'un corps décrit pendant un temps quelconque en tournant uniformément dans un cercle en vertu d'une force centripète, est la moyenne proportionnelle (moyenne géométrique) entre le diamètre de ce cercle et de la ligne que le corps parcourrait en tombant avec la même force donnée et pendant le même temps ».

---

<sup>310</sup> Newton, I., & Densmore, D. ([2003] 2010), 156.

<sup>311</sup> Cette démonstration se trouve traduite en anglais par Cohen I.B. et Whitman A. en note de bas de page aa., in Newton I.(1999), 449-450.

<sup>312</sup> Ibid. note de bas de page hh., 451.



Nous allons considérer ici le cas où  $t$  est infiniment petit, ou naissant selon la méthode des premières et dernières raisons. Autrement dit, c'est ce que Densmore appelle le « cas ultime » (The Ultimate Case), le début du mouvement dont Newton fait usage à la Proposition IV du Livre III en considérant le temps d'une minute comme infiniment petit, afin de pouvoir utiliser le Lemme VII qui exprime l'égalité entre l'arc, la corde et la tangente.

Considérons avec Densmore<sup>313</sup>, un cercle  $ABD$  qui a comme diamètre  $AD$  et  $C$  comme centre du cercle et des forces exercées. La force centripète exercée sur le corps au point  $A$  est traitée par Densmore de la même manière que Newton l'a traitée à la Proposition I, c'est-à-dire comme une force d'action instantanée. Un corps suit un mouvement circulaire uniforme autour du centre  $C$ , et d'après l'énoncé du Corollaire, il décrit un arc  $AE$  dans un temps  $t$ . Le même corps, durant le même temps  $t$  sous l'action de la même force centripète, la gravité, tombe vers le centre  $C$  en décrivant la distance  $AB$ . Le segment  $AB$  est perpendiculaire au segment  $AF$ . Le Corollaire I des Lois<sup>314</sup> de la composition des mouvements, permet à Newton de tracer la diagonale  $AE$  du parallélogramme  $ABEF$  qui indique la direction de la force résultante. Puisque nous sommes dans l'infiniment petit, nous pouvons appliquer le Lemme VII, selon lequel la corde  $AE$  coïncide avec l'arc  $AE$ . Le parallélogramme produit ici est un parallélogramme rectangle<sup>315</sup> et par conséquent  $EB \perp AD$ . Et puisque le  $\Delta AED$  est inscrit dans un demi cercle, il est un triangle rectangle<sup>316</sup>.

---

<sup>313</sup> Les lettres du cercle diffèrent de celles utilisées dans l'exemple de Densmore. On trouve une démonstration de ce corollaire proche à celle de Densmore dans MacDougal, D. W. (2012), *Newton's Gravity: An Introductory Guide to the Mechanics of the Universe*. New York : Springer Science & Business Media, 92-95.

<sup>314</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre I, 19. « *Un corps poussé par deux forces parcourt, par leurs actions réunies, la diagonale d'un parallélogramme dans le même temps, dans lequel il aurait parcouru ses côtés séparément.* »

<sup>315</sup> Euclide, *Eléments*, I.28.

<sup>316</sup> *Ibid.* III. 31.

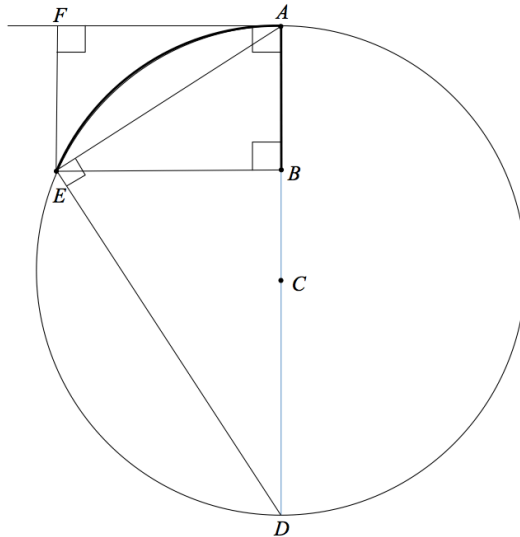


Fig. 4.4. D'après la figure proposée dans Densmore D. (2003).

Nous avons ainsi deux triangles semblables,  $\triangle AED \sim \triangle ABE$  car ils ont les mêmes angles<sup>317</sup>. Leurs côtés sont ainsi proportionnels,  $AD : AE :: AE : AB$ <sup>318</sup>. Mais puisque par le Lemme VII la corde  $AE$  coïncide avec l'arc  $AE$  nous obtenons le résultat voulu, l'arc  $AE$  est la moyenne proportionnelle du diamètre du cercle  $AD$  et de la distance parcourue lors de la chute libre  $AB$ <sup>319</sup>.

Dans la Scholie qui suit cette Proposition Newton expose avec clarté les éléments démontrés ici, et qui seront utilisés pour la détermination de la gravitation universelle à la Proposition IV du Livre III. L'auteur se réfère également à Huygens<sup>320</sup>, et plus particulièrement aux propositions de son ouvrage *Horologium Oscillatorium* dédiées à la recherche des proportions entre la force centrifuge et la gravité, que nous allons étudier en détail plus loin dans cette thèse<sup>321</sup>.

« (...) par la Proposition précédente et par ses Corollaires, on peut trouver la proportion qui est entre la force centripète et une force quelconque connue, telle que la gravité ; car si le corps tourne dans un cercle concentrique à la terre par la force de la gravité, la gravité sera sa force centripète : or connaissant d'un côté la descente des graves, et de

<sup>317</sup> Ibid. VI. 8.

<sup>318</sup> Ibid. 4.

<sup>319</sup> Ibid. 17.

<sup>320</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre I, Scolie,

<sup>321</sup> Dans le Chapitre VI de cette thèse.

l'autre le temps de la révolution, et l'arc décrit dans un temps quelconque, on aura par le Corollaire 9. de cette Proposition, la proportion cherchée entre la gravité et la force centripète. C'est par des propositions semblables que M. *Huygens*, dans son excellent *Traité de Horologie oscillatorio*, a comparé la force de la gravité avec les forces centrifuges des corps qui circulent. »<sup>322</sup>

Newton à la fin de cette Scholie présente une démonstration alternative de cette Proposition, inspirée de ses travaux de jeunesse<sup>323</sup>, par la méthode du polygone inscrit dans un cercle :

« Soit supposé un Poligone d'un nombre de côtés quelconques inscrit dans un cercle. Si le corps, en parcourant les côtés de ce Poligone avec une vitesse donnée, est réfléchi par le cercle à chacun des angles de ce Poligone, la force avec laquelle ce corps frappe le cercle à chaque réflexion sera comme sa vitesse : donc la somme des forces en un temps donné sera comme cette vitesse multipliée par le nombre des réflexions, c'est-à-dire, (si le Polygone est donné d'espèce) comme la ligne parcourue dans ce temps, laquelle doit être augmentée ou diminuée dans la raison qu'elle a elle-même au rayon de ce cercle ; c'est-à-dire, comme le quarré de cette ligne divisé par le rayon : ainsi si les côtés du Polygone diminuant à l'infini, le Poligone vient à coïncider enfin avec le cercle, la somme des forces sera alors comme le quarré de l'arc parcouru dans un temps donné divisé par le rayon. C'est là la mesure de la force centrifuge avec laquelle le corps presse le cercle ; & cette force est égale & contraire à la force par laquelle ce cercle repousse continuellement le corps vers le centre. »<sup>324</sup>

L'objet de la Section III (Propositions XI-XVII), est l'étude du mouvement d'un corps dans les sections coniques excentriques. Ce que Newton démontre ici c'est que la force centripète est inversement proportionnelle au carré de la distance d'un des foyers quelque soit la section conique considérée (parabole, hyperbole, ellipse) et à l'inverse : les corps qui se meuvent décrivant par leur mouvement des sections coniques sont gouvernés par des forces centripètes inversement proportionnelles au carré de la

---

<sup>322</sup> Cette partie de la Scholie est présentée ici comme parue à la 3<sup>e</sup> édition des *Principia* diffère de celle présentée à la 1<sup>ère</sup> édition.

<sup>323</sup> Étudiées dans le Chapitre III de cette thèse.

<sup>324</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre I, 57.

distance à l'un des foyers. Dans la Section IV (Propositions XVIII-XXI), Newton traite la détermination des orbés lorsqu'un des foyers est donné, dans la Section V (Propositions XXII- XXIX) la détermination des orbés lorsqu'aucun foyer n'est donné et à la Section VI (Propositions XXX-XXXI) la détermination des mouvements dans des orbés donnés.

Newton consacre la Section VII (Propositions XXXII-XXXIX) à l'étude de la chute libre et au mouvement des corps jetés d'un lieu donné, en ligne droite, soumis à l'action d'une force centrale. Toutes les Propositions de la Section VII sont en rapport avec la chute libre en lien avec le mouvement circulaire uniforme. L'objectif de l'auteur dans cette Section est de démontrer, faisant toujours l'hypothèse d'une force centripète, que nous pouvons déterminer tous les éléments constituant la chute libre : la distance parcourue par un corps dans un temps donné, le temps de la chute lorsque la distance est connue et la vitesse instantanée en chaque point de la chute en rapport avec le mouvement curviligne. À la Proposition XXXII, Newton nous montre que l'étude de la construction géométrique des sections coniques qui a précédé, combinée à la méthode des limites, peut servir comme solution de la chute libre<sup>325</sup>. Le temps de la chute libre étant au cœur de notre travail et comme elle est une partie centrale dans la construction de théorie newtonienne de la gravité universelle, nous présentons la Proposition XXXVI-Problème XXV comme exemple du calcul du temps de chute par la mise en relation du mouvement circulaire uniforme avec le mouvement rectiligne de chute libre :

*« Déterminer le temps de la chute d'un corps qui tombe d'un lieu donné A.*

Sur le diamètre  $AS$ , distance du corps au centre dans le commencement de la chute, décrivez le demi-cercle  $ADS$ , ainsi que le demi-cercle  $OKH$ , qui lui est égal, et qui est décrit autour du centre  $S$ . D'un lieu quelconque  $C$  du corps, élevez l'ordonnée  $CD$ , tirez  $SD$ , et faites le secteur  $OSK$  égal à l'aire  $ASD$ . Il est clair, par la Prop. 35. que le corps en tombant par  $AC$ , emploiera le même temps qu'il faudrait à un autre corps pour décrire l'arc  $OK$ , en tournant uniformément autour du centre  $S$  (C.Q.F.D.) »<sup>326</sup>

---

<sup>325</sup> Newton I.(1999), 140. Pour une présentation détaillée de la Proposition XXXII voir pages 333-334.

<sup>326</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre I, 127-128.

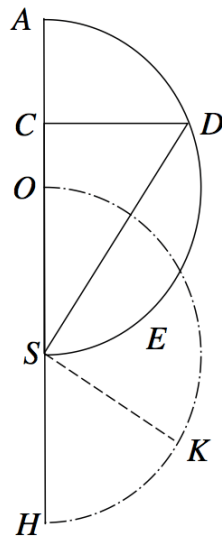


Fig. 4.5. D'après une figure de la traduction française, dans Newton I. ([1756] 1759).

Sans entrer dans une explication détaillée de cette démonstration qui demanderait une étude des Propositions antérieures assez laborieuse, on voit clairement le lien mathématique entre la chute libre en ligne droite et le mouvement circulaire d'un corps autour un centre *S*. On voit comment par le mouvement circulaire nous pouvons calculer le temps de la chute libre d'un corps qui parcourt une distance quelconque.

À la Section VIII (Propositions XL-XLII) Newton détermine la trajectoire curviligne produite par des forces centripètes qui ont une proportion quelconque à la distance du centre de *genre* différent de la gravité (comme par exemple d'une force centripète inversement proportionnelle au cube de la distance<sup>327</sup>)

Newton traite ensuite dans la Section IX (Propositions XLIII-XLV) du « mouvement des corps dans des orbites mobiles, et du mouvement des apsides ». Pour passer de la Section IX à la Section X (Propositions XLVI-LVI) il consacre un petit paragraphe qui fait allusion à la chute des corps :

« Nous avons traité jusqu'à présent des mouvements des corps dans des orbites dont les plans passent par le centre des forces : nous allons à présent examiner leurs mouvements dans des plans excentriques. Nous nous conformerons en cela, aux Auteurs

---

<sup>327</sup> Des hypothèses très intéressantes sur les raisons pour lesquelles Newton a choisi cet exemple sont présentées dans Newton I. (1999), 141-147.

qui ont traité du mouvement des graves ; ces auteurs ayant coutume de considérer l'ascension et la descente des poids, par des plans quelconques donnés, tant obliques que perpendiculaires. Nous supposerons que les plans sur lesquels sont les corps poussés par des forces quelconques soient parfaitement polis ; et même au lieu des plans sur lesquels les corps s'appuient, et qu'ils pressent, nous supposerons ici d'autres plans qui leur soient parallèles, et dans lesquels les centres des corps se meuvent et décrivent les orbites par leur mouvement. Nous irons plus loin, nous déterminerons par la même loi les mouvements des corps dans les superficies courbes. »

Pour l'étude de ce qui suit à la Section X, du « mouvement des corps dans des superficies données », Newton se place dans le même cadre que celui choisi par les savants qui étudient les mouvements des corps, lors d'une chute ou d'une ascension, soit verticale soit sur des plans d'inclinaison quelconque. Il suppose ainsi des plans privés de tout frottement. Restant toujours dans le même cadre, dans des milieux qui ne présentent pas de résistance, il traitera par la suite les « oscillations des corps suspendus par des fils ».

Arrivés à ce point, nous allons reprendre la présentation et le commentaire brefs de Cohen B.I. et de Whitman A. sur ce sujet<sup>328</sup>. Newton, nous disent les auteurs, explore ici, à partir de la Proposition L, les mathématiques du mouvement oscillatoire des pendules sous l'action de la force de la gravité. Ce mouvement se passe dans une cycloïde ou une hypocycloïde donnée. Newton effectue ses explorations mathématiques connaissant très bien le travail de Huygens à ce sujet. Comme pour Huygens, pour Newton, il est question de démonstrations géométriques de l'isochronisme, tant désiré, des pendules simples. Newton, comme Huygens, ayant conscience du non isochronisme du pendule simple dont le mouvement est circulaire étudie d'autres genres de courbes. Le mouvement oscillatoire dans une cycloïde offre, au moins mathématiquement, l'isochronisme cherché. De cette courbe Huygens a déduit la forme cycloïdale des *joues* qu'il a mises en place dans la partie mécanique de ses horloges. Pour donner une image du genre de courbe qu'est la cycloïde, on peut imaginer la roue d'un vélo en mouvement. La cycloïde sera la courbe dessinée par un point fixé sur la roue lors de son mouvement. La découverte de cette courbe permet ainsi aux pendules d'avoir la même période

---

<sup>328</sup> Newton I., (1999), 148.

d'oscillation indépendamment de l'amplitude d'oscillation. L'intérêt pour la mesure du temps est la certitude de l'isochronisme, c'est-à-dire que chaque oscillation pendulaire a exactement la même durée temporelle que la précédente et la suivante. Quand l'isochronisme est assuré, on peut aisément régler notre pendule de sorte à ce qu'elle batte la durée temporelle désirée. La solution mathématique de la cycloïde a permis à Huygens une application pratique aux horloges à pendule.

Néanmoins, le pendule étudié ici par Newton, n'est pas un pendule réel, mais c'est un pendule idéal. Il ne s'agit pas ici d'un corps, de masse quelconque, suspendu par un fil matériel, mais d'un point mathématique soumis au poids retenu par un fil sans poids, caractérisé par sa flexibilité et son inextensibilité. Au Corollaire I de la Proposition LII<sup>329</sup>, pour reprendre le commentaire de Cohen-Whitman, Newton montre que l'on peut « (...) comparer le temps qu'un corps met à osciller avec celui qu'il mettrait à faire une révolution autour du même centre de forces, ou à descendre en ligne droite vers ce centre. »<sup>330</sup>. De cette manière Newton fait le lien mathématique entre le mouvement oscillatoire du pendule, la chute libre et le mouvement curviligne. Dans le Corollaire II Newton va encore plus loin. Faisant référence aux travaux de Wren et de Huygens sur le pendule cycloïdal, tout en sachant que la théorie de la gravité de Huygens diffère de la sienne (Huygens pense que la gravité est constante et non pas inversement proportionnelle au carré de la distance), il montre que l'isochronisme de Huygens satisfait à une gravité proportionnelle à la distance  $r$  sous la surface terrestre, mais plus au-dessus de la surface terrestre. Il propose même de mettre en place une expérience dans des cavernes pour vérifier cette prédiction mathématique.

« (...) les pendules qui seraient suspendus au-dedans de la terre dans des cavernes entre deux arcs d'épicycloïdes intérieures seraient des oscillations isochrones. Car, comme on le verra, au troisième livre, la gravité qui agit au-dessus de la terre en raison renversée du carré des distances agit au dedans en raison de la simple distance au centre. »<sup>331</sup>

---

<sup>329</sup> L'énoncé de la Proposition LII est la suivant : « *Trouver les vitesses des pendules dans chaque point des arcs qu'ils décrivent, et les temps qu'ils emploient tant à parcourir ces arcs entiers que leurs parties quelconques.* », Newton I. ([1726] 1759), 159.

<sup>330</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre I, Section X, Proposition LII, Cor. I.

<sup>331</sup> Ibid., Cor. II.

Le contenu de la Section XI (Propositions LVII-LXIX) nul ne peut le résumer mieux que Newton lui-même :

« J'ai traité jusqu'ici des mouvements des corps attirés vers un centre immobile, tel qu'il n'en existe peut-être aucun dans la nature ; car les attractions ont coutume de se faire vers des corps, et les actions des corps qui attirent et qui sont attirés sont toujours mutuelles et égales par la troisième loi. Si on ne considère, par exemple, que deux corps, ni le corps attiré, ni le corps attirant ne seront en repos, mais ils feront l'un et l'autre, par leur attraction mutuelle, (selon le Cor. 4. des Lois) leur révolution autour de leur centre commun de gravité ; s'il y a plusieurs corps qui soient tous attirés vers un seul qu'ils attirent aussi, ou bien qui s'attirent tous mutuellement, ils doivent se mouvoir entre eux de sorte que leur centre commun de gravité soit en repos, ou qu'il se meuve uniformément en ligne droite. »<sup>332</sup>

L'accent est mis par l'auteur sur le fait que la partie de l'étude faite jusqu'ici concernant l'attraction des corps par un centre immobile, est fort probablement un cas imaginaire. C'est un cas qui existe bel et bien dans le monde de l'abstraction mathématique mais qui ne trouve pas sa place dans la nature. Il décide alors ici d'étudier deux corps en mouvement et en attraction mutuelle. Il traite ainsi ce qu'on appelle le problème des deux corps et plus loin dans la même Section, énonce le problème des trois corps qu'il tente de le résoudre au cours des vingt-deux Corollaires qui suivent. Dans la conclusion de cette Section, Newton sent le besoin de redéfinir ses termes. Il définit le terme *attraction* comme un « effort que font les corps pour s'approcher les uns des autres ». Il insiste bien sur le fait que l'attraction en question est un effet dont la cause, le genre, la qualité physique et la nature restent inconnus. Il souligne que l'objet de ce traité n'est pas la recherche de la nature de cet effet. L'attraction est traitée en tant que quantité dont il essaie de déterminer la proportion dans des cadres géométriques bien établis. L'importance de ce résultat, nous dit Newton, réside dans la possibilité de sa comparaison aux phénomènes naturels. L'établissement des lois qui régissent l'attraction est le pas nécessaire à franchir afin de pouvoir dans un deuxième temps rechercher la cause et la nature de cet effet. Cette redéfinition donne l'élan nécessaire pour le passage à ce qui suit.

---

<sup>332</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre I, Section XI, introduction.



Puisque l'objectif des *Principia* reste la comparaison avec les phénomènes, la représentation des corps étudiés doit être adéquate. Dans la Section XII (Propositions LXX-LXXXIV), l'auteur fait le passage du point géométrique à des corps étendus, sphériques, en attraction mutuelle, qui se comportent comme si leurs masses étaient concentrées en leur centre. À la Section XIII (Propositions LXXXV-XCIII) il traite « Des forces attractives des corps qui ne sont pas sphériques » et pour finir, dans la dernière mais cependant pas la moindre Section XIV (Propositions XCIV-XCVIII), il entre dans l'étude de l'attraction corpusculaire. Cette étude lui permet de réfléchir au mouvement des « rayons » lumineux. L'attraction corpusculaire par les corps plus massifs peut être appliquée à « la réflexion de la lumière et à la réfraction qui se fait »<sup>333</sup>. Il considère pour cela que le corpuscule lumineux (le « rayon ») est accéléré uniformément et localement dans son approche au voisinage de la surface d'un dioptré, sous l'effet d'une force attractive uniforme. La conséquence est que la vitesse de la lumière est plus grande dans les milieux les plus réfringents, rejoignant en cela l'opinion de Descartes (et à l'encontre de Fermat et de Huygens dont les raisonnements sous-tendent la théorie ondulatoire de la lumière). Michel Blay remarque que Newton développe aussi le « phénomène de diffraction, qu'il nomme ici à astucieusement « inflexion » et qui venait d'être découvert par Francesco-Maria Grimaldi <sup>334</sup> (...) et étudié par Robert Hooke (...) ». <sup>335</sup>Le premier Livre finit ainsi avec un aperçu de la théorie newtonienne corpusculaire de la lumière, un aperçu d'optique.

Dans le premier Livre, si l'on veut résumer le travail effectué dans ses Sections en quelques lignes, Newton a étudié dans un premier temps le mouvement de corps ponctuels dans des milieux non résistants autour d'un centre de force. Il a désigné les orbites de ses corps, et il les a considérés mobiles d'un mouvement qui a lieu sur des surfaces, ou sur des plans, dépourvus de tout frottement. Il passe ensuite à l'étude du système à deux corps, qu'il a formulé puis a tenté de résoudre le problème des trois

---

<sup>333</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre I, Section XIV, Proposition XCVI, Scholie.

<sup>334</sup> Grimaldi, F. M. (1665), *Physico-Mathesis de Lumine, coloribus et iride, ...*, Bonomiae : Victorii Benatii. Newton ne prendra pas en compte la généralité du phénomène de diffraction et se refusera en particulier à voir les franges lumineuses qui apparaissent dans l'ombre géométrique d'un obstacle, ce qu'il sait être en faveur de la théorie ondulatoire de la lumière.

<sup>335</sup> Blay M. (1995), 60.

corps. Il a étendu ses raisonnements à des corps sphériques indéformables et à des corps solides de forme et de composition quelconques, pour finir avec l'étude de forces attractives dans le monde corpusculaire et s'intéresser par analogie à la trajectoire des rayons lumineux.

À la suite de ces recherches viendra le Livre II, qui traitera des questions semblables mais cette fois-ci dans des milieux résistants.

## 2. De motu corporum: liber secundus.

Le deuxième Livre (De motu corporum : liber secundus) composé de 9 sections, traite donc de la question du mouvement dans les milieux résistants. Ce deuxième Livre, bien que présentant plusieurs similitudes avec le Livre I, a bien un caractère qui lui est propre. Il n'est pas exclusivement mathématique. À partir du moment où la détermination de la densité des milieux entre en jeu, les éléments d'analyse ne peuvent plus être exclusivement mathématiques. Alors que dans le premier Livre il n'était pas question des cas dont la vérité mathématique était mise en question, dans celui-ci Newton écrit des phrases telles que « l'hypothèse qui fait la résistance des corps en raison de la vitesse, est plus mathématique que conforme à la nature. »<sup>336</sup>. Dans certains cas, comme la Scholie Générale de la VI<sup>e</sup> Section qui nous occupera ici, et la Scholie de la Proposition XL, l'expérience prend le relais au détriment des démonstrations géométriques sans rien enlever à la certitude offerte par ces dernières. Dans ce sens le Livre II est plus expérimental que le Livre I. Quelle est la limite qui sépare les mathématiques de la physique ? La question reste en suspens. Si l'intérêt que nous portons à ce Livre est restreint, c'est parce qu'il ne nous renvoie pas directement au Livre III et aux Propositions du Livre III qui nous intéressent. Néanmoins, une brève présentation lui sera consacrée avec une mise en lumière particulière en ce qui concerne le mouvement oscillatoire des pendules et la chute des corps. Dans les deux cas, cependant, il n'est pas question de la mesure du temps (par le pendule en tant qu'instrument) ou de calcul du temps de chute libre. Les expériences, ou plutôt les observations soignées, portées par l'auteur, consistent en l'étude exclusive de la résistance des milieux.

---

<sup>336</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre II, Section I, Scholie.

Un coup d'œil sur la table de matières de ce deuxième Livre peut nous donner une idée assez claire de son contenu :

*Section I. Du mouvement des corps qui éprouvent une résistance en raison de leur vitesse*

*Section II. Du mouvement des corps qui éprouvent une résistance en raison doublée des vitesses*

*Section III. Du mouvement des corps qui éprouvent des résistances qui sont en partie en raison de la vitesse, et en partie en raison doublée de cette même vitesse*

*Section IV. Du mouvement circulaire des corps dans les milieux résistants*

*Section V. De la densité et de la compression des fluides et de l'hydrostatique*

*Section VI. Du mouvement et de la résistance des corps oscillants*

*Section VII. Des mouvements des fluides et de la résistance des projectiles*

*Section VIII. De la propagation du mouvement dans les fluides*

*Section IX. Du mouvement circulaire des fluides*

Comme les intitulés des 9 Sections mentionnées plus haut nous le dévoilent, Newton dans un premier temps (Section I-III, Propositions I-XIV) étudie les résistances des milieux. On les trouve selon lui dans la nature, proportionnelles soit à la vitesse soit au carré de la vitesse, soit aux deux combinés, avec une méthodologie qui caractérise Newton, du cas le plus simple au plus complexe. Mais comme mentionné plus haut, Newton doute de l'applicabilité de ses résultats mathématiques aux phénomènes naturels. Afin de s'approcher de la réalité physique, il pose ce qu'il croit être les trois facteurs majeurs de la résistance du milieu éprouvée par le corps sphériques lors de leur mouvement : la ténacité, la friction et la densité du milieu.

Dans la Section IV (Propositions XV-XVIII) Newton traite la question du mouvement circulaire. Il fait l'hypothèse des corps qui suivent une trajectoire circulaire uniforme dans des milieux résistants. La densité du milieu est considérée ici inversement proportionnelle à la distance d'un centre immobile et la force centripète, et proportionnelle au carré de la densité du milieu. Il traite le problème de la nature de la trajectoire du corps dans ces conditions, et, à la fin de cette section, traite le problème inverse. Il détermine la trajectoire décrite par le corps (une spirale donnée). La loi de la force centripète étant donnée, il part à la recherche de la détermination de la résistance.

Newton ici, comme auparavant lorsqu'il traite mathématiquement un problème, étudie toutes ses facettes possibles. Il détermine dans un premier temps les éléments essentiels qu'il doit considérer dans sa problématique. À chaque Proposition il traite le problème en supposant à chaque fois un paramètre connu afin de déterminer les autres. Il est ainsi capable de traiter et de vérifier les résultats de ses démonstrations. À partir de cette Section IV et jusqu'à la Proposition LII de la Section IX, comme Michel Blay le souligne très bien<sup>337</sup>, le Livre II est dédié à la critique des Tourbillons de Descartes. L'un des objectifs de l'auteur est de démontrer par le biais d'expériences la non-existence de l'éther. Néanmoins nous n'allons pas nous attarder sur l'analyse de l'aspect critique de cette partie, pour nous concentrer sur la simple présentation des faits.

La Section V (Propositions XIX-XXIII) s'ouvre avec la définition d'un fluide : « Les corps fluides sont ceux dont les parties cèdent à toute espèce de force qui agit sur eux, & qui se meuvent très-facilement entre eux. »<sup>338</sup>. Cette Section est consacrée à la présentation des principes généraux de l'Hydrostatique. Pour ce faire, Newton considère la définition des fluides citée plus haut et les forces en question comme inversement proportionnelles à la distance de leur centre. La densité ainsi sera proportionnelle à la compression (Prop. XXIII).

Dans la VIe Section (Propositions XXIV-XXXI) est traité le mouvement oscillatoire de pendules simples dans les milieux résistants. La proposition XXIV sert à la présentation de la loi des mouvements pendulaires. Celle-ci est nécessaire pour la réalisation des expériences que l'on trouve dans la Scholie Générale de cette Section. L'influence du travail effectué par Huygens est évidente sur ce point<sup>339</sup>. Newton nous dit ici que « si deux corps décrivent en oscillant des arcs égaux, et que ces arcs soient divisés en parties égales ; comme les temps dans lesquels ces corps décrivent chaque partie correspondante des arcs sont comme les temps entiers des oscillations, les vitesses seront entre elles dans les parties correspondantes des oscillations, comme les forces motrices et les temps entiers des oscillations directement, et comme les quantités de matière réciproquement : donc les quantités de matière sont comme les forces, et les

---

<sup>337</sup> Blay M. (1995), 61.

<sup>338</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre II, Section V, 301.

<sup>339</sup> Newton I., (1999), 180.

temps des oscillations directement, et réciproquement comme les vitesses. Mais les vitesses sont réciproquement comme les temps, donc les temps sont directement, et les vitesses sont réciproquement comme les carrés des temps, et par conséquent les quantités de matière sont comme les forces motrices, et les carrés des temps, c'est-à-dire, comme les poids et les carrés des temps (C.Q.F.D). »<sup>340</sup> Au Corollaire VII de cette Proposition l'auteur attire notre attention sur le fait que la gravité n'est pas la même dans des lieux de latitudes différentes. Afin de déterminer la différence de la force gravitationnelle en des lieux divers, Newton nous invite à comparer le poids d'un même corps dans ces différents lieux. Ce principe posé ici, sera utilisé dans la Proposition XX du livre III concernant la détermination de la forme du sphéroïde terrestre.

Newton ouvre la Scholie Générale de cette Section concernant la détermination de la résistance de l'air comme suit : « On peut trouver par le moyen de ces Propositions la résistance de toutes sortes de milieux lorsqu'on connaît les oscillations des pendules dans ces milieux. J'ai trouvé, par exemple, la résistance de l'air par les expériences suivantes. »<sup>341</sup>. Afin d'exposer ses observations, Newton définit dans un premier temps son cadre expérimental. Il décrit en détail les pendules simples utilisés, la longueur du fil (entre le point de suspension et le centre du corps attaché [ $10\frac{1}{2}$  pouces]), la forme (diamètre du globe), la matière (bois) et le poids du corps ( $57\frac{7}{22}$  onces romaines) suspendu (sans donner les caractéristiques du fil utilisé)<sup>342</sup>. L'observation newtonienne est centrée sur le comptage du nombre d'oscillations du pendule jusqu'au moment où le pendule perd un huitième de l'amplitude son mouvement. Pour ce faire il marquait « sur le fil un point éloigné de 10 pieds & un pouce du centre du suspension ; & je plaçai vis-à-vis de ce point une règle partagée en pouces, par le moyens desquels je marquois la longueur des arcs décrits par le pendule. »<sup>343</sup>

---

<sup>340</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre II, Section VI, 317.

<sup>341</sup> Ibid., Livre II, 331.

<sup>342</sup> Steffen Ducheyne (2012), 124, décrit le dispositif pendulaire autrement : le corps attaché par le fil est un "empty firewood box, which he suspended to a hook in such a way that the friction was minimal, with the number of oscillations of the same box filled with metals."

<sup>343</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre II, 331

La détermination de la résistance du milieu (de l'air dans ce cas) est faite par rapport à la vitesse du pendule. Newton a réalisé plusieurs observations avec une amplitude d'oscillation variée, qui représentent des mouvements de vitesse différente. Il arrive ainsi à la conclusion que « la résistance de ce globe lorsqu'il se meut le plus vite est à peu près en raison doublée de la vitesse ; & lorsqu'il se meut le plus lentement elle est un peu plus grande que dans cette raison. »<sup>344</sup> L'auteur fait par la suite une parenthèse : le rapprochement du mouvement pendulaire en cercle pour les oscillations de petite amplitude, se met en rapport avec le mouvement pendulaire dans la cycloïde.

Une autre série d'observations suit cette parenthèse, et utilise la même méthode suivie dans les expériences précédentes. Cependant cette fois-ci Newton ne compte pas le nombre des oscillations pendulaires dans lesquels le pendule perd la huitième partie mais la quatrième partie de son mouvement. Il dresse ainsi une table des résultats obtenus. Ces résultats nous dit l'auteur sont le produit de l'expérience « la plus exacte qui ait été faite »<sup>345</sup> jusqu'à ce jour. Il renouvelle ces expériences à plusieurs reprises avec des corps de matière et de poids différents. Ces expériences néanmoins ne prennent pas en compte la résistance du fil utilisé. Newton exécute par la suite la même expérience, mais en remarquant que « la résistance du fil est moins remarquable dans les plus grands globes »<sup>346</sup>, il utilise donc un globe de diamètre environ triple du globe utilisé jusqu'alors. Le problème des globes de très grands diamètres est leur forme. Newton nous dit que les grands globes utilisés dans ses expériences n'étaient pas absolument sphériques. Il faudrait ainsi, afin d'obtenir des résultats d'une grande exactitude, effectuer un nombre d'expériences plus important que celui effectué par l'auteur. Newton détermine le rapport entre la résistance de l'air et la vitesse du mouvement oscillatoire des pendules : « ces résistances qui sont, dans des globes égaux, comme les carrés des vitesses ; sont aussi, les vitesses étant égales, comme les carrés des diamètres des globes. »<sup>347</sup> Ce rapport étant établi, il met en place un certain nombre d'expériences afin de déterminer les résistances des fluides (pour l'eau et le mercure). Pour ce faire il compare les résultats du mouvement pendulaire dans les fluides au rapport établi pour le même mouvement dans l'air.

---

<sup>344</sup> Ibid., 332.

<sup>345</sup> Ibid., 335.

<sup>346</sup> Ibid., 337.

<sup>347</sup> Ibid., 338.

Dans la Section VII (Propositions XXXII-XL) l'auteur fait usage de sa détermination de la résistance de l'air et étudie la chute des corps. Les expériences présentées ne sont cette fois-ci pas de lui-même. Smith E.G. a étudié ces expériences de près à plusieurs reprises<sup>348</sup>. Nous allons reprendre ici une partie de son analyse. Smith nous dit que la Section VII comme présentée à la première édition des *Principia* a été presque complètement réécrite. David Gregory y témoigne dans ses Memoranda :

« Il va faire beaucoup de changements à la Section VII, Livre II, dans la prop. 37 particulièrement, concernant la hauteur de jets d'eau où il corrige ses erreurs et prouve tout cela beaucoup plus facilement : dans la Scholie Générale annexée à la prop. 40 également. Car il ne fait pas entièrement confiance aux observations obtenues par le pendule afin de déterminer le rapport de la résistance, mais reconsidère tout cela avec la chute de graves. Il choisit le lieu pour effectuer ses expériences du haut de la Chapelle du Trinity Collège, dans le jardin à droite quand on entre dans le Collège ». <sup>349</sup>

Turnbull H.W.<sup>350</sup> attire notre attention sur un manuscrit de jeunesse de Newton, dans lequel l'auteur propose une expérience de chute libre pour la détermination de la résistance de l'air. Il s'agit du manuscrit MS Add. 3996, folio 121v. Ce manuscrit se trouve dans le Notebook que Newton a utilisé de 1661-1665 en tant que jeune étudiant à Cambridge. Ce qui est intéressant c'est que ce manuscrit témoigne encore une fois du fait que Newton prenait en grande considération le résultat de chute libre de Galilée

---

<sup>348</sup> Smith G.E. (2000), « Fluid resistance : Why did Newton Change His Mind ? » in *The foundations of Newtonian scholarship*, Dalitz, R. H., & Nauenberg, M. (eds.), 105-136, voir aussi Smith G.E. (1999), « Another Way of Considering Book 2 : Some achievements of Book 2 » in Newton, I. (1999). *The Principia: mathematical principles of natural philosophy*. Univ of California Press, 188-194.

<sup>349</sup> Newton, I. (1959). *The correspondence of Isaac Newton*, Turnbull H.W.(ed). London: Royal Society at the University Press, Volume III, 384 :

« He will make many changes in Sec. 7, Book II, particularly in Proposition 37 about the height of jets of water where he adjusts his errors and proves everything more easily : also in the General Scholium appended to Proposition 40. For he does not sufficiently trust the observations obtained from a pendulum to determine the ratio of the resistance, but he will subject everything afresh to the test of falling weights. He is choosing the place for contriving his experiments from the top of Trinity College Chapel into his own garden on the right as one enters the College. »

<sup>350</sup> Newton, I. (1959). *The correspondence of Isaac Newton*, Turnbull H.W.(ed). London: Royal Society at the University Press, Volume III, 387.

In the descension of a body There is to be considered the force which it receives every moment from its gravity (which must be least in a spatious body) how much the swifter a body is moved) & the opposition it receives from the air (which increaseth in proportion to its swiftnesse). To make an experiment concerning this increase of motion. When globe a is fallen from z to f let globe b begin to move at g soe that both the globes fall together at h.

According to Galileus a iron ball of 100<sup>th</sup> florentine line (it is 78<sup>th</sup> at London of Oldverdupois weight) descends in 100 brasses florentine or cubits (or 49,01 Ells, perhaps 66<sup>th</sup> in 5<sup>th</sup> of an hour



By this figure it may appear how to weigh without altering the weights. And to tell exactly the weight of bodies at the first triall.

But it will be best to fix the wheels & make the arms cd & ac very long especially cd.

This balance may be of excellent use for finding the proportions of alloyed or mixt bodies (as of gold & copper), or to compare the quantity of any two bodies (as gold & stone) by their difference of weight in divers mediums.

To compare the weights of ~~two~~ bodies, viz. to find at proportion the weights of those bodies would have were they equall.

Try whether the weight of a body may be altered by heats or cold, by dilatation or condensation, beating, powdering, transferring to severall places, or severall heights, or placing a heavy body over it, or by drawing magnetisme. whether heads or its dust spread abroad, whether a plate flat ways or edg ways is heaviest, whether the rays of gravity may be stopp'd by reflecting or refracting them, if so a perpetual motion may be made one of these two ways



The gravity of bodies is as their solidity, because all bodies descend equall spaces in equall times

consideration being had to the Resistance of the air &c.



annoncé dans ses *Dialogues*. Dans la première partie de ce manuscrit Newton propose et décrit l'expérience à mettre à place, et directement après il annonce le résultat de Galilée, disant que selon les galiléens un corps de fer de 100 livres florentines parcourait 100 *braccia*, que Newton en les convertissant écrit : 66 *yards anglais* dans 5 secondes. Pour reprendre le témoignage de David Gregory cité plus haut, la méfiance de Newton envers les résultats des expériences pendulaires est compréhensible. La détermination de la résistance des fluides par le biais du mouvement oscillatoire des pendules présentait un nombre élevé de sources d'erreurs. La plus probable étant celle du mouvement de va et vient du fluide dans lequel le pendule effectuait ses oscillations, comme l'auteur nous le dit lui-même :

« Dans la scholie qui suit la sixième section, j'ai fait voir par les expériences des pendules, que les globes égaux qui ont des vitesses égales éprouvent, lorsqu'ils se meuvent dans l'air, dans l'eau, et dans le vif-argent, des résistances qui sont comme les densités de ces fluides. Mais je l'ai fait voir ici plus exactement par les expériences des corps qui tombent dans l'air et dans l'eau ; car les pendules à chaque oscillation excitent dans le fluide un mouvement qui est toujours contraire au retour du pendule, et la résistance qui vient de ce mouvement, ainsi que celle qui vient du fil auquel le pendule est suspendu, font qu'il éprouve une résistance plus grande que celle qu'ont donné les expériences des corps qui tombent. (...) Donc les résistances étaient plus grandes dans les expériences des pendules (par les causes dont on vient de parler) que dans les expériences des globes tombants, et cela en raison de 4 à 3 environ. »<sup>351</sup>

Les expériences de la chute des corps graves dans l'air ont été effectuées par Francis Hauksbee. La Royal Society depuis sa fondation, avait toujours une personne chargée de la démonstration d'expériences. En 1703 après la mort de Hooke, c'est Hauksbee qui prit sa place. Il est fort probable que ce soit lui qui ait effectué les expériences nécessaires de chute libre pour Newton<sup>352</sup>. Hauksbee a réalisé ces expériences en juin 1710 du haut de la cathédrale de St. Paul au Trinity College. « Deux balles – une remplie de mercure ; l'autre d'air- se trouvaient sur une plate-forme de laquelle on pouvait libérer un côté en

---

<sup>351</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre II, Section VII, Scholie de la Prop. XL après l'expérience XIV.

<sup>352</sup> Smith G.E. (2000), Note 35, 131-132.

tirant une cheville. En tirant la cheville rapidement, les deux balles tombaient simultanément.»<sup>353</sup> Newton compare les résultats expérimentaux de la mesure du temps et de distance dans la chute libre aux résultats de son calcul théorique et ~~il~~ trouve que les valeurs des deux méthodes se correspondent très bien. Le calcul a été effectué en considérant la résistance du milieu proportionnelle au carré de la vitesse. Le temps était mesuré durant les expériences, comme mentionné par Newton dans la Scholie annexée à la Proposition XL, avec un pendule qui battait les demi-secondes. Newton a noté dans cette partie quatorze expériences au total, les comparant non seulement à ses propres résultats de calcul mais aussi aux expériences effectuées par Dr. Desaguliers en Juillet 1719. L'exactitude avec laquelle Newton traite le sujet de la résistance des fluides est remarquable. Son objectif est la correspondance parfaite entre la théorie et la pratique.

Dans les deux dernières Sections (Propositions XLI-LIII) qui suivent Newton traite le mouvement ondulatoire. Il démontre dans un premier temps l'argument qu'il utilisera contre la théorie ondulatoire de la lumière : « la pression ne se propage pas en ligne droite dans un fluide »<sup>354</sup>. Dans la Proposition XLVI afin de démontrer que « la vitesse des ondes est en raison sousdoublée de leur largeur ». La largeur d'onde est définie ici par Newton comme « l'espace transversal qui est entre leurs moindres ou leurs plus grande élévation, ce qu'on appelle aujourd'hui longueur d'onde. Il considère un pendule de longueur égale à la longueur d'onde et nous dit que pour le temps d'une oscillation pendulaire, l'onde parcourra une distance à-peu-près égale à la racine carrée de cette longueur d'onde. Encore un exemple qui démontre que le pendule se retrouve à plusieurs reprises dans l'œuvre newtonienne comme support de la représentation géométrique. La VIII Section se clôt avec une Scholie dédiée au sujet de la vitesse du son et le Livre II à dans son intégralité avec l'étude « du mouvement circulaire des fluides ».

---

<sup>353</sup> Ducheyne S. (2012), 124. Trad. pers. : « Two balls – one filled with quicksilver; the other with air – rested on a platform of which one side could be released by pulling a peg. Upon pulling the peg rapidly, the two balls fell simultaneously. »

<sup>354</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre II, 394.

### 3. De mundi systemate: liber tertius.

Nous avons présenté jusqu'ici les deux premiers Livres qui partagent un caractère commun. Le troisième Livre, comme nous avons mentionné plus haut, trouve ses origines non pas dans des manuscrits mathématiques de Newton mais dans un traité de vulgarisation intitulé *Du système du Monde*. C'est Newton lui-même qui en informe ses lecteurs :

« J'ai donné dans les Livres précédents les principes de la Philosophie naturelle, et je les ai traités plutôt en Mathématicien qu'en Physicien, car les vérités mathématiques peuvent servir de base à plusieurs recherches philosophiques, telles que les lois du mouvement et des forces motrices. Et afin de rendre les matières plus intéressantes, j'y ai joint quelques scholies dans lesquelles j'ai traité de la densité des corps et de leur résistance, du vide, du mouvement du son et de celui de la lumière ; qui sont à proprement parler, des recherches plus physiques. Il me reste à expliquer par les mêmes principes mathématiques le système général du Monde.

J'avais d'abord traité l'objet de ce troisième Livre par une Méthode moins mathématique, afin qu'il puisse être à la portée de plus de personnes. Mais de crainte de donner lieu aux chicanes de ceux qui ne voudraient pas quitter leurs anciens préjugés, parce qu'ils ne sentiraient pas la force des conséquences que je tire de mes principes, faute d'avoir assez médité les Propositions que j'ai données dans les Livres précédents, j'ai rédigé ce Livre en plusieurs Propositions, selon la méthode des Mathématiciens, pour ceux qui auront lu les deux premiers Livres, car c'est pour eux que ce troisième Livre est destiné, et comme il y a dans les deux premiers Livres plusieurs Propositions qui pourraient arrêter longtemps, même les Mathématiciens, je ne prétends pas exiger qu'ils lisent ces deux premiers Livres entiers ; il leur suffira d'avoir lu attentivement les Définitions, les Lois du Mouvement, et les trois premières Sections du premier Livre, et ils pourront passer ensuite à ce troisième Livre, qui traite du Système du Monde, et avoir soin seulement de consulter les autres Propositions des deux premiers Livres lorsqu'ils les trouveront citées et qu'ils en auront besoin. »<sup>355</sup>

---

<sup>355</sup> Newton I. ([1726] 1759), Livre III, 1-2.

Newton fait la distinction entre ces Livres. Les deux premiers sont caractérisés par le regard du mathématicien tourné vers les phénomènes physiques et le troisième par le désir de son auteur d'appliquer les résultats démontrés dans le premier Livre principalement au Système du Monde. Ce troisième Livre pourtant était censé être, dirait-on aujourd'hui, un ouvrage de vulgarisation. L'objectif de Newton était de communiquer ce troisième Livre au plus grand nombre de lecteurs possible. Ce Livre représente d'une certaine manière la grande idée que son auteur se fait du monde. C'est la vérité universelle de son auteur. Les deux autres Livres paraissent sous ce prisme comme une suite de démonstrations mathématiques nécessaires afin de pouvoir soutenir le Système du Monde vu par l'auteur.

On trouve aujourd'hui la traduction anglaise de ce texte de vulgarisation scientifique<sup>356</sup>. Il est intitulé *A Treatise of the système of the Wolrd*, parue en 1728 un an après la mort de son auteur. Cette traduction vise à réaliser l'objectif initial de Newton, de s'adresser au plus grand nombre de ces concitoyens. Andrew Motte, le traducteur, présente dans la préface de manière claire et aussi simple que possible quelques notions nécessaires à la compréhension du texte qui suit. Il demande dans un premier temps aux lecteurs de quitter leur vision du monde habituelle. De laisser de côté ce que leurs sens leur indiquent du monde et de se fier aux vérités géométriques. D'oublier l'idée d'une voute céleste qui tourne autour de la Terre, de ne pas croire au mouvement apparent du soleil. L'image que Motte propose à ses lecteurs est celle du système copernicien. Cette préface est une sorte d'introduction générale aux avancées de la pensée philosophico-géométrique du début du XVIIe siècle. Il commence avec l'idée de l'héliocentrisme, pour passer ensuite aux lois de Kepler et à la déduction newtonienne de la gravitation universelle. Tout cela d'une manière très soignée, en étant fidèle aux vérités géométriques et avec un esprit fort pédagogique. Le traducteur met à la disposition du lecteur la méthodologie suivie par Newton : d'abord des démonstrations géométriques et la prise en compte des observations astronomiques, afin de pouvoir appliquer sa théorie et déterminer le Système du Monde. On ne trouve peut-être pas de

---

<sup>356</sup> Cohen annonce, dans Newton I. (1999), Note 1, 196, une version nouvelle de la traduction anglaise de ce traité, à paraître sous le titre de *Essay on the System of the World*, aux éditions University California Press, jamais réalisée.

démonstrations géométriques dans cet ouvrage mais les références aux observations astronomiques sont bien présentes.

Cette première version du Livre III nous donne une explication concernant la caractérisation de ce dernier comme le moins mathématique des trois. Il est vrai que dans ce troisième Livre, comme il est présenté dans la troisième édition des *Principia*, il n'est plus question de constructions mathématiques mais plutôt d'application des résultats mathématiques trouvés dans les deux premiers Livres au Système du Monde. Dans son introduction du Livre III, Newton invite les lecteurs à lire les deux premiers livres avant de passer au troisième. Le passage d'une version du Livre III, écrite dans un langage plus simple à la portée de tous, au Livre III des *Principia* structuré en plusieurs propositions géométriques, est fait par l'auteur qui veut éviter des réactions conflictuelles que son idée du monde (structurée sur la base de la gravité universelle) peut susciter chez les savants de son époque. C'est dans cet ouvrage qu'il développe sa théorie de l'attraction universelle. L'argument en faveur de cette force universelle est jugé par les spécialistes de Newton comme extrêmement complexe : « (...) c'est un chef d'œuvre de perception mathématique, intuition physique et exactitude expérimentale. »<sup>357</sup>

La difficulté élevée de ce Livre réside dans deux facteurs. Dans un premier temps les mathématiques développées par l'auteur dans les deux premiers Livres ne lui sont pas suffisantes pour décrire certains phénomènes ; comme par exemple l'étude des comètes. Il est ainsi obligé de tout réinventer. Et puis Newton néglige très régulièrement de donner des preuves sous une forme complète, en ce qui concerne des problèmes astronomiques, géodésiques et les marrés. Ainsi ses hypothèses étaient sujettes à discussion et ses démonstrations mathématiques jugées obscures par ses contemporains.<sup>358</sup>

Ce Livre avec toutes ses particularités mathématiques ne suit pas l'ordre de division en Sections des Livres précédents. C'est un ouvrage que l'on peut néanmoins diviser en six

---

<sup>357</sup> Guicciaridni N. (1999), 90. Trad. pers. : « it is a masterpiece of mathematical insight, physical intuition and experimental accuracy. ».

<sup>358</sup> Ibid. 91-95.

parties distinctes. Dans la première partie l'auteur pose le cadre dans lequel sa théorie du Système se dévoilera. Il énonce les quatre règles à suivre dans la Philosophie Naturelle. Dans la deuxième partie il présente six phénomènes sur lesquels sera basé son Système du Monde. La troisième partie (Propositions I-XXI) est consacrée à l'action universelle de la gravité et à son application aux mouvements des planètes et de leurs satellites. Cette partie se trouve au centre de notre intérêt. C'est là que l'on trouve les Propositions que nous avons définies dans cette thèse comme l'achèvement de la construction de la théorie gravitationnelle de Newton et l'application de cette théorie, c'est-à-dire les Propositions IV et XX. Les quatrième et cinquième parties (Propositions XXII-XXX) sont dédiées à l'application de la gravitation pour l'explication des marrés et l'étude et l'analyse du mouvement de la Lune. La sixième et dernière partie (Lemme IV, Propositions XL – XLII) expose le point de vue de Newton sur le mouvement des comètes.

La première partie de ce troisième Livre a subi une grande transformation lors de son passage de la première à la troisième édition des *Principia*. Les dites *Hypothèses* de la première édition se sont transformées, dès la deuxième édition, en règles et phénomènes. Si cette transformation nous concerne ici, c'est parce que dans la Proposition IV de ce Livre (Test de la Lune) Newton nous renvoie plusieurs fois aux deux premières règles de ce Livre. Il est ainsi utile de consacrer quelques lignes au statut de ces règles. À la première édition, juste après l'introduction, il y a une partie, nommée *Hypothèses*, qui en comporte neuf. Le terme *hypothèse* disparaît quasi complètement dès la deuxième édition (il y a que l'hypothèse IV qui reste sous le terme d'hypothèse, mais déplacée et nommée Hypothèse I) et une partie des hypothèses devient *Règles* et une autre *Phénomènes*. Plus précisément :

L'hypothèse I devient Règle I (à la 2 <sup>ème</sup> édition): « <i>Il ne faut pas admettre de causes, que celles qui sont nécessaires pour expliquer les Phénomènes.</i> »
---

L'hypothèse II devient Règle II (à la 2 <sup>ème</sup> édition): « <i>Les effets du même genre doivent toujours être attribués ainsi, autant qu'il est possible, à la même cause.</i> »
---

L'hypothèse III disparaît: « <i>Corpus omne in alterius cujuscunque generis corpus transformari posse, &amp; qualitatum gradus omnes intermedios successivè induere.</i> »
--

Il y a la Règle III qui s'ajoute à la 2 <sup>ème</sup> édition et qui maintient sa place dans la 3 <sup>ème</sup>
---

édition: « *Le qualités des corps qui ne sont susceptibles ni d'augmentation ni de diminution, & qui appartiennent à tous les corps sur lesquels on peut faire des expériences, doivent être regardées comme appartenantes à tous les corps en général.* »

La Règle IV s'ajoute à la 3<sup>ème</sup> édition: « *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. »

L'Hypothèse IV maintient son statut d'hypothèse et elle devient Hypothèse I, tout en changeant de place, elle apparaît juste après la Proposition X, avec une phrase rajoutée. « *Le centre du système du monde est au repos. C'est ce dont on convient généralement, les uns seulement prétendent que la terre est ce centre, & d'autres que c'est le soleil. Voyons ce qui résulte de cette hypothèse.* »

L'Hypothèse V devient Phénomène I (à la 2<sup>ème</sup> édition) : « *Les satellites de Jupiter décrivent autour de cette Planette des aires proportionnelles aux temps, & leurs temps périodiques (en supposant que les étoiles fixes soient en repos) sont en raison sesquiplée de leurs distances au centre de cette Planette.* »

Phénomène II s'ajoutée à la 2<sup>ème</sup> édition : « *Les satellites de Saturne décrivent autour de cette Planette des aires proportionnelles aux temps ; & leurs temps périodiques, (les étoiles fixes étant supposées en repos) sont en raison sesquiplée de leurs distances au centre de Saturne.* »

L'Hypothèse VI devient Phénomène III (à la 2<sup>ème</sup> édition) « *Les cinq principales planette, Mercure, Venus, Mars, Jupiter & Saturne enferment le Soleil dans leurs orbés.* »

L'Hypothèse VII devient Phénomène IV (à la 2<sup>ème</sup> édition) « *Les temps périodiques des cinq principales planette autour du Soleil, & celui de la terre autour du Soleil, ou du Soleil autour de la terre (supposant les étoiles fixes en repos) sont en raison sesquiplée de leur moyenne distance au Soleil.* »

L'Hypothèse VIII devient Phénomène V (à la 2<sup>ème</sup> édition) « *Si on prend la terre pour centre des révolutions des planette principales, les aires qu'elles décrivent ne seront point proportionnelles aux temps ; mais si on regarde le Soleil comme le centre de leurs mouvements, on trouvera alors leurs aires proportionnelles aux temps.* »

L'Hypothèse IX devient Phénomène VI (à la 2<sup>ème</sup> édition) « *La Lune décrit autour de la terre des aires proportionnelles aux temps.* »

Nous allons faire ici une parenthèse pour discuter la notion d'*Hypothèse* tirée de l'article homonyme de *Cyclopaedia : or, an Universal Dictionary of Arts and Sciences*<sup>359</sup>. Il y a trois types d'Hypothèses présentées ici, l'Hypothèse en Logique, l'Hypothèse en Physique et l'Hypothèse en Astronomie. Pour désigner la Logique l'auteur se sert d'exemples géométriques. L'Hypothèse Physique correspond à l'hypothèse de la Philosophie naturelle et inclut en son sein les hypothèses de l'astronomie ptoléméenne jusqu'aux théories cartésiennes et newtoniennes. La définition de l'hypothèse en Logique donnée dans l'Encyclopédie est la suivante :

« HYPOTHÈSE, en Logique, est une Proposition ou un Principe que l'on suppose, ou que l'on considère comme acquis(e), afin de tirer des Conclusions, pour la Preuve en question. Voir SUPPOSITION et PRINCIPE...»<sup>360</sup>

L'auteur ici nous renvoie à deux autres termes : la Supposition<sup>361</sup> et le Principe. À *Supposition* il nous renvoie au terme de Position en Arithmétique. À *Principe*, à la fin de sa définition il nous parle du Principe appliqué à la fondation des Arts et des Sciences. Dans ce sens les principes sont des notions communes, des axiomes, sans la nécessité de preuve. Autrement, ils sont considérés comme des règles des Arts et des Sciences, un exemple donné par l'auteur sont les *Éléments* d'Euclide vus comme les principes de la géométrie. L'Hypothèse en Logique, « l'art de penser juste, ou de faire un usage convenable de nos facultés rationnelles, en définissant, en divisant, & en raisonnant »<sup>362</sup> désigné ici par l'auteur devient équivalent au Principe ou à l'Axiome. La suite de cette définition est tirée du *Dictionnaire Universel françois et latin* de Trévoux de l'édition de

---

<sup>359</sup> Chambers, E. (1680 (ca.)-1740), *Cyclopædia, or, An universal dictionary of arts and sciences*, London: Knapton J. & J.(...) Johnson A. & Osborn T, Vol I. 281.

<sup>360</sup> Trad. pers. « HYPOTHESIS, in Logic, is a Proposition or Principle which we suppose, or take for granted, in order to draw Conclusions therefrom, for the Proof in Question. See SUPPOSITION and PRINCIPLE ».

<sup>361</sup> Ibid. Vol II, 154. Quand au renvoie à la Supposition, le terme est définit par rapport à la musique et l'harmonie, et à la fin il nous renvoie à la Position, « Supposition in Arithmetick. See Position. »

<sup>362</sup> Traduction en français trouvée dans l'*Encyclopédie* 1<sup>ère</sup> édition 1751, Tome 9, 637-641.



1721, surtout pour souligner un aspect important de l'Hypothèse logique : « En bonne Logique il ne faut pas passer de l'*hypothèse* à la thèse, c'est à dire, il faut prouver le principe qu'on suppose, avant que d'en vouloir faire croire la conséquence. »<sup>363</sup> Dans ce cadre l'Hypothèse est vue comme un Principe dont la vérité demande à être prouvée avant la thèse. Alors que l'Axiome par définition est une vérité acceptée sans preuve. La définition de l'Hypothèse physique suit :

« HYPOTHÈSE en Physique, etc. est une sorte de Système, établi par notre Imagination, afin de rendre compte quelques Phénomènes ou Apparences de la Nature. --- Nous avons ainsi des *Hypothèses* pour estimer les Marées, la Gravité, le Magnétisme, les Inondations, etc. Les Causes vraies et scientifiques des Choses naturelles sont en général très profondes : l'Observation et l'Expérimentation, les bons moyens pour y arriver, sont dans la plupart des Cas très lents ; et l'Esprit humain est impatient : De ce fait nous sommes fréquemment amenés à feindre ou à inventer quelque chose qui peut paraître comme la Cause, et qui est pensé afin de répondre à plusieurs phénomènes ; de manière à ce qu'il soit probablement la vraie Cause. Les Philosophes sont divisés concernant l'Usage de ces fictions ou *Hypothèses* ; qui sont beaucoup moins courantes aujourd'hui qu'autrefois-- Les meilleurs et plus récents parmi les écrivains sont d'avis d'exclure les hypothèses, et se reposent entièrement sur l'observation et l'expérience. Voir Philosophie EXPERIMENTALE. »<sup>364</sup>

L'auteur mentionne ainsi les « meilleurs et plus récents » des écrivains, se référant très probablement à Newton et à sa célèbre phrase *Hypotheses non fingo* qui figure dans la Scolie Général de ces *Principia*. Pour Chambers c'est par impatience que l'on fait des hypothèses sur les causes des phénomènes naturels. La bonne manière d'arriver à la

---

<sup>363</sup> Dictionnaire, D. T. (1738-1742), Tome 3, 753.

<sup>364</sup> Chambers E. (1728). Trad. pers. : « HYPOTHESIS, in Physics, etc. is a kind of System, laid down from our own Imagination, whereby to account for some Phaenomenon or Appearance of Nature. --- Thus we have *Hypotheses* to account the Tides, for Gravity, for Magnetism, for the Deluge, etc. The real and scientific Causes of natural Things generally lie very deep: Observation and Experiment, the proper Means of arriving at them, are in most Cases extremely slow; and the human Mind impatient: Hence we are frequently driven to feign or invent something which may seem like the Cause, and which is calculated to answer the several Phaenomena; so that it may possibly be the true Cause. Philosophers are divided as to the Use of such Fictions or *Hypotheses*; which are much less current now than formely.-- The latest and best Writers are for excluding Hypotheses, and standing wholly on Observation and Experiment. See EXPERIMENTAL Philosophy. »

vérité d'une cause est l'expérimentation et l'observation. Mais les expériences et les observations ne sont pas figées dans le temps. Elles sont toujours en cours d'amélioration. Comment peuvent-elles représenter une vérité quelconque ? Comment peut-on soutenir une thèse qui dit que pour arriver à la vérité des causes il faut se fier à quelque chose qui évolue sans cesse ? Il ne faut pas oublier que la rédaction de la *Cyclopaedia* de Chambers prend place dans une période de grands changements, et elle nous témoigne de l'ambiance générale de l'époque.

Chambers nous parle ensuite de l'Hypothèse comme un outil principal de l'Astronomie et plus particulièrement des différents Systèmes du Monde. Il présente les acteurs principaux à l'origine de ces Systèmes et en vient à dire que « (L'hypothèse) copernicienne est devenue maintenant si courante, et est si bien garantie par l'Observation, que ses défenseurs tiennent pour injurieux de l'appeler *Hypothèse*. »<sup>365</sup> Ainsi, une Hypothèse à partir du moment où elle a été *vérifiée* par les observations, quitte son statut d'Hypothèse pour entrer dans le monde de la certitude scientifique. Mais l'Hypothèse copernicienne avant d'être confirmée était une Hypothèse. « Les bons Astronomes croient qu'il est impossible de trouver la vraie *hypothèse*. On le dit aussi des autres suppositions qu'on fait dans la Physique pour expliquer les autres phénomènes de la nature. »<sup>366</sup> L'objectif de l'hypothèse astronomique selon Trévoux c'est de « sauver tous les phénomènes, apparences célestes » avec comme critères de vérité, ou de plus grande possibilité de vérité la clarification dans l'explication et la simplicité. L'Hypothèse Physique est à l'image de l'hypothèse astronomique<sup>367</sup>. Chambers n'adhère pas à cette définition car son objectif est d'introduire en force la nouvelle Philosophie.

Dans la Scholie générale à la fin du troisième livre, Newton parlant de la force de la gravité et des raisons cachées derrière les propriétés de cette force nie catégoriquement toute hypothèse. Il déclare ouvertement ne faire confiance qu'aux déductions faites

---

<sup>365</sup> Ibid. « The *Copernican* (Hypothesis) is now become so current, and is so well warranted by Observation ; that the Retainers thereto, hold it injurious to call it an *Hypothesis*. »

<sup>366</sup> Dictionnaire, D. T. (1738-1742), 753-754.

<sup>367</sup> Ibid. 754. Trévoux dédie une seule phrase à l'hypothèse Physique : « On le dit aussi (comme pour l'astronomie) des autres suppositions qu'on fait dans la Physique pour expliquer les autres phénomènes de la nature. »

d'après les phénomènes, c'est-à-dire les observations et les expériences. Toute autre déduction est une hypothèse et la Philosophie expérimentale ne peut pas se permettre de suivre une telle sorte d'hypothèse. Dans cette philosophie, nous dit Newton, on tire les propositions des phénomènes, et on les rend ensuite générales par induction, l'exemple de Copernic dans la définition de l'hypothèse astronomique semble aller à l'encontre de la Philosophie Expérimentale. Si Newton est contre toute hypothèse comment se fait-il qu'il utilise le terme *hypothèse* dans sa première édition des *Principia* ? Si l'on s'en remet aux définitions de Chambers, on peut penser que le terme *Hypothèse* utilisé dans un premier temps par Newton est celui de la logique au même titre que les Principes des Eléments d'Euclide, ce qui lui permet par la suite de remplacer un certain nombre d'entre elles par le terme *Règles* (Hypothèse comme Règle des Arts et des Sciences) pour éviter tout type de confusion avec la deuxième définition d'Hypothèse donnée par Chambers, celle qui résulte de l'imagination, ou de la fiction. L'Hypothèse en Physique au détriment de l'Observation et de l'Expérimentation. À ce point il serait fort utile de voir les grands traits de la définition de la Philosophie Expérimentale.

Sa définition commence par un renvoi à l'origine grecque du terme expérience comme *Εμπειρία* ou *Εμπειρική* des textes de la philosophie ancienne. Il introduit un schisme entre la philosophie ancienne et la philosophie moderne (expérimentale) dû à l'usage plus courant des expériences et leur place dans la pensée scientifique. Alors que le centre de la réflexion ancienne était tourné dans un premier temps vers les causes des Phénomènes, la pensée contemporaine commence par les Expériences et les Observations. Toute une tradition anglaise reflète ce type de processus de réflexion scientifique, qui commence d'après Chambers par Roger Bacon, Robert Boyle, Isaac Newton et perdure depuis. L'auteur n'hésite pourtant pas à présenter des avis contradictoires sur l'usage et l'importance des expériences surtout pour souligner le fait que plusieurs fois les expériences ou les observations sont déformées dans le but d'appuyer une théorie plutôt qu'une autre.<sup>368</sup> Devant le sentiment ambigu concernant

---

<sup>368</sup> Chambers E. (1728), Vol I, 368 : « Dr Keill allows, that Philosophy has receiv'd very considerable Advantages from the Makers of *Experiments* ; but complains of their Disingenuity, in too often wresting and distorting their *Experiments*, and Observations, to favour some darling Theories they had espoused. But this is not all : M. Hartsoeker, in his *Recueil de plusieurs pieces de physique*, undertakes to shew , that they who imploy

les observations et les expériences scientifiques et leur statut dans cette période, on peut comprendre les réactions philosophiques contre le système newtonien et sa théorie gravitationnelle, ainsi que les précautions prises par Newton en ce qui concerne la formulation de ces idées.

Les deux premières Règles de ce troisième livre concernent bel et bien les causes des phénomènes. Dans la première, il est question de nécessité. Il ne faut se prononcer sur la question des causes des phénomènes qu'en cas de nécessité, mais sans que cette nécessité soit fondée sur des critères concrets. On peut néanmoins la définir dans le cadre des *Principia*. Elle doit être une nécessité dictée par les besoins de la démonstration géométrique. Dans la deuxième règle qui suit, Newton nous invite à attribuer la même cause aux effets du même genre. Cette règle lui permet d'universaliser la gravité.

Concernant le découpage de ce troisième Livre, nous avons dit que ces Règles étaient suivies par des Phénomènes, dont certains avaient le statut d'hypothèse dans la première édition des *Principia*. Ces hypothèses sont d'un genre différent des Hypothèses Logiques que nous avons présentées plus haut. Ce que Newton appelle Phénomènes à partir de la deuxième édition des *Principia*, ne sont pas les observations de simples phénomènes, car ils sont accompagnés d'une affirmation. Aux Phénomènes I & II, Newton nous dit qu'il considère la loi des aires de Kepler pour les satellites de Jupiter et de Saturne, de laquelle il déduit le rapport entre le temps périodique et la distance du centre de révolution. Et il rajoute : «Ce qui est constaté par les observations astronomiques. Car les orbites de ces planètes sont à-peu-près des cercles concentriques à Jupiter, et leurs mouvements dans ces cercles paraissent uniformes. À l'égard de leurs temps périodiques tous les astronomes conviennent qu'il sont en raison sesquiplée des

---

themselves in the making of Experiments, are not properly Philosophers, but, as it were, the Labourers, or Operators of Philosophers, who work under them, and for them, furnishing them with Materials to build their Conjectures upon.

The learned M. *Dacier*, in the Beginning of his Discourse on *Plato*, at the Head of his Translation of the Works of that Philosopher, deals still more severely with the Makers of *Experiments*. He breaks out with a Sort of Indignation, at a Tribe of idly curious People, whose Philosophy consists in making Experiments on the Gravity of the Air, the Equilibrium of Fluids, the Loadstone, etc. and yet arrogate to themselves the noble Title of Philosophers. »

demi-diamètres de leurs orbes, (...) ».<sup>369</sup> Newton nous confirme donc que c'est bien un usage des astronomes d'appliquer la loi des aires de Kepler aux satellites<sup>370</sup>. Au Phénomène III l'auteur nous dit que le système du monde est héliocentrique. Au Phénomène IV, que l'on peut appliquer aux planètes en relation avec le soleil la même loi que nous avons appliquée aux satellites, ce pour quoi elle avait été mise en évidence par Kepler. Au Phénomène V, que si l'on considère notre système géocentrique la loi de Kepler ne peut plus s'appliquer, et au Phénomène VI que cette même loi s'applique également au système Terre-Lune « Cela se prouve par le mouvement angulaire de la Lune et par son diamètre apparent. Les mouvements de la Lune sont à la vérité un peu troublés par la force du Soleil, mais je néglige dans ces phénomènes ces petites erreurs insensibles. »<sup>371</sup>

Maintenant que loi de Kepler est prise au sérieux et est appliquée aux mouvements satellitaires et planétaires dans le cadre de l'héliocentrisme, Newton peut appliquer sa loi gravitationnelle à ces mêmes phénomènes.

#### « PROPOSITION I – THÉORÈME I

*Les forces par lesquelles les satellites de Jupiter sont retirés perpétuellement du mouvement rectiligne et retenus dans leurs orbites, tendent au centre de Jupiter et sont en raison réciproque des carrés de leurs distances à ce centre. (...)*

#### PROPOSITION II – THÉORÈME II

*Les forces par lesquelles les planètes principales sont perpétuellement retirées du mouvement rectiligne, et retenues dans leurs orbites, tendent au Soleil, et sont réciproquement comme le carré de leurs distances à son centre. »<sup>372</sup>*

Ces Propositions ne sont pas suivies par des démonstrations particulières. Newton ne fait ici que des renvois aux Phénomènes et aux Propositions II, III & IV du Livre I. La

---

<sup>369</sup> Newton I. ([1729] 1756), Livre III

<sup>370</sup> On sait bien que c'est en comparant les tables d'occultation des satellites de Jupiter établies par Cassini sur la base de ces lois, qu'Olaf Roemer estima, en 1676 à l'observatoire de Paris, le temps qu'il fallait à la lumière pour parcourir la distance de la Terre au Soleil.

<sup>371</sup> Ibid.

<sup>372</sup> Ibid.

démonstration qui constituera le corps de l'universalisation de la gravité approche à grand pas.

#### 4. Principia, Livre III, Le test de la Lune.

« Une de plus célèbres expériences de pensée dans l'histoire des sciences est rendue possible par une coïncidence naturelle unique. Cette coïncidence réside dans la durée d'une seconde de temps en rapport à la minute, et sur la taille de la Terre dans son rapport à la distance de la Lune. Dans notre système de mesure du temps, une seconde de temps est le un soixantième de la minute ; le rayon de la Terre est aussi le un soixantième de sa distance à la Lune. Isaac Newton a découvert que cette coïncidence dans les proportions offrait un test facile de son hypothèse de la gravitation qui pouvait être saisi par tout le monde. »<sup>373</sup>

Le chiffre 60 est en effet une heureuse coïncidence entre les deux systèmes de mesure. Cette division en unités, dans chacun des cas, est à vrai dire très ancienne. Mais utiliser le lien entre les deux, est preuve de la grande ingéniosité de Newton. Afin de pouvoir soutenir sa thèse sur l'universalisation de la force gravitationnelle, Newton devait démontrer que la gravité est une force qui agit au delà des limites terrestres et quantifier dans quelles proportions elle agit. Pour ce faire, il étudie le système Terre-Lune et démontre que la force qui est la cause de la chute des corps graves à la surface terrestre est la même que celle qui retient la Lune sur son orbite, la gravité. Pour cela, il compare les deux chutes. La distance parcourue par un corps grave dans sa chute partant du repos, et celle parcourue par la Lune en une minute vers la Terre, si elle était privée de tout autre mouvement que celui dû à la force qui la retient sur son orbite. Comparant les deux distances parcourues dans les deux chutes respectives, si la

---

<sup>373</sup> MacDougal D.W. (2012), *Newton's Gravity : An Introductory Guide to the Mechanics of the Universe*, New York : Springer, 107. Trad. pers. :

« One of the most famous thought experiments in the history of science was made possible by a unique natural coincidence. The coincidence resides in the length of a second of time in relation to the minute, and the size of the Earth in relation to its distance from the Moon. In our system of keeping time, a second is one-sixtieth of a minute ; the Earth's radius is also one sixtieth the distance to the Moon. Isaac Newton discovered that this coincidence of proportion enabled an easy test of his gravitational hypothesis that could be grasped by anyone. »

proportion trouvée suit la loi de la gravité, c'est à dire, le fait que la gravité est inversement proportionnelle au carré de la distance au centre attracteur, le centre de la Terre, son universalité se trouve ainsi établie. Cette démonstration prend vie dans la Proposition IV-Problème IV du troisième Livre des *Principia*. Dans l'intention de préparer l'arrivée de cette Proposition, Newton nous dit, dans la Proposition précédente, que « *La force qui retient la Lune dans son orbite, tend vers la terre, & est en raison réciproque du quarré de la distance des lieux de la Lune au centre de la terre.* »<sup>374</sup>. Dans cette Proposition, il démontre que dans le système Terre-Lune, la force centripète est inversement proportionnelle au carré de la distance au centre. Newton peut se permettre un tel énoncé car, comme il l'a affirmé au Phénomène VI, il considère le mouvement orbital de la Lune circulaire. Il est vrai que la trajectoire elliptique de la Lune est difficilement décrite avec exactitude. Le mouvement très complexe de la Lune était un problème non résolu à l'époque de Newton. L'auteur décide de considérer l'orbite lunaire comme une orbite circulaire, qui est proche de l'orbite elliptique lunaire réelle, et de faire abstraction des perturbations du mouvement lunaire dues au Soleil<sup>375</sup>. Nous avons ainsi un système de deux corps et la Terre est le centre de la force centripète qui agit sur la Lune. L'objectif de la Proposition suivante (IV, connue sous le nom du *test de la Lune*) sera de démontrer que cette force centripète est la gravité.

« Proposition IV Théorème IV

*La Lune gravite vers la terre, & par la force de la gravité elle est continuellement retirée du mouvement rectiligne & retenue dans son orbite.* »<sup>376</sup>.

Ce qui nous intéresse ici est la démonstration géométrique de cette hypothèse. Afin de présenter cette démonstration nous allons reprendre la lettre Seconde de la *Vie littéraire de Newton* écrite par Aimé-Henri Paulian en 1763<sup>377</sup> destinée au Cardinal Torrigiani,

---

<sup>374</sup> Newton I. ([1729] 1756), Livre III, 11-12. Pour une analyse détaillée de la démonstration de cette Proposition voir Densmore ([2003] 2010), 356-360 & Ducheyne, S. (2011). *"The main Business of natural Philosophy": Isaac Newton's Natural-Philosophical Methodology* (Vol. 29). New York : Springer Science & Business Media, 134-135.

<sup>375</sup> Voir Newton I. & Densmore D. ([2003] 2010), 356-357.

<sup>376</sup> Newton I. ([1729] 1756), Livre III, 13-15.

<sup>377</sup> Paulian A.-H. (1763), *Traite de paix entre Descartes et Newton*, Avignon : Chez veuve Girard, Tome 2, 128- 130.

dans l'objectif de présenter les théories newtoniennes à un esprit formé à la Philosophie Naturelle comme celui du Cardinal. Suivant l'exemple de Paulian, on fait appel, dans un premier temps, à l'imagination. Imaginons donc que sur une montagne d'une hauteur considérable on pose un canon très bien chargé, et que l'on tire. Le boulet parcourra une certaine distance et suivra une trajectoire curviligne jusqu'à ce qu'il retombe sur le sol. Cette trajectoire curviligne peut être vue comme la composition de deux autres, l'une rectiligne horizontale et l'autre rectiligne verticale. L'horizontale représente l'impulsion donnée au boulet par le canon et la verticale représente la gravité terrestre qui attire le corps vers le centre de la terre. Maintenant on imagine que le canon est capable de donner une telle impulsion au boulet que le boulet continuerait sa trajectoire courbe autour de la terre sans que le frottement de l'air puisse l'arrêter, parcourant à l'infini des aires proportionnelles au temps autour de la terre, tel qu'il devienne un satellite terrestre. Si l'on remplace le boulet par la Lune, on peut dire que la Lune avait une vitesse initiale horizontale, une vitesse inertielle, donnée par Dieu cette fois-ci, et qu'elle se compose avec la force de la gravité terrestre et le résultat de cette composition est celui d'une trajectoire circulaire autour de la terre. Ce mouvement inertiel est celui qui fait que la Lune résiste à l'attraction gravitationnelle et persiste dans son mouvement orbital. De cette manière Newton explique non seulement le mouvement orbital de la Lune autour de la Terre mais aussi le mouvement orbital des planètes autour du soleil.

La force gravitationnelle, ou centripète n'est néanmoins pas uniforme, selon Newton elle est inversement proportionnelle au carré de la distance au centre. Pour l'exprimer en proportions il faut imaginer « qu'un corps à 1 lieüe tende 4 fois plus vers le centre qu'à 2 ; 9 fois plus à 1 lieüe qu'à 3 ; 16 fois plus à 1 lieüe qu'à 4 etc. »<sup>378</sup> Afin d'universaliser cette proportion Newton a dû démontrer géométriquement que puisque la distance entre la Lune et le centre de la Terre est de 60 rayons terrestres, et selon la loi de la gravité mentionnée plus haut, la gravité doit être 3600 fois plus forte sur terre qu'à la Lune. Mais laissons la parole à Newton. Voici la démonstration de la Proposition IV Théoreme IV parue dans la troisième édition des *Principia* en 1726. Pour faciliter son étude nous pouvons la découper en plusieurs parties<sup>379</sup> :

---

<sup>378</sup> Ibid., 130.

<sup>379</sup> D'autres manières de découpage de cette Proposition sont proposées par Densmore D., MacDougal, Ducheyne.



1. Les données utilisées.
2. Le calcul de la détermination de la distance de chute parcourue par la Lune depuis son orbite dans une minute de temps si la seule force exercée sur elle était la gravité.
2. La détermination de la distance parcourue par un corps en chute libre à proximité de la surface terrestre dans une seconde de temps.
3. Une seule force : la gravité.
4. La chute de la Lune à proximité de la surface Terrestre.

Allons voir ainsi de plus près cette démonstration :

1. Les données utilisées.

« La distance moyenne de la Lune à la terre dans les syzygies est, suivant *Ptolomé* & plusieurs Astronomes, de 59 demi diamètres de la terre, *Vendelinus* & *Hughens* la font de 60, Copernic de  $60\frac{1}{3}$ , *Street*, de  $60\frac{2}{5}$  & *Ticho* de  $56\frac{1}{2}$ . Mais *Ticho* & tous ceux qui suivent ses tables de réfraction, supposent que les réfractions du Soleil & de la Lune sont plus grandes que celles des étoiles fixes, de 4 ou 5 minutes environ, (ce qui est entièrement contraire à ce qu'on connoît de la lumière) & par-là ils ont augmenté la parallaxe de la Lune d'autant de minutes, c'est-à-dire, presque de la douzième ou de la quinzième partie de toute sa parallaxe.

En corrigeant cette erreur, on trouvera cette distance déterminée par *Ticho* de  $60\frac{1}{2}$  demi diamètres de la terre environ, c'est-à-dire, telle à peu près que les autres Astronomes l'avoient trouvée.

Prenons 60 demi diamètres de la terre pour la distance moyenne dans les syzygies ; & supposons que la révolution de la Lune autour de la terre, par rapport aux étoiles fixes, s'achève en 27 jours 7 heures 43 minutes, comme les Astronomes l'ont déterminé : enfin prenons 123249600 pieds de Paris pour la circonférence de la terre, suivant les mesures prises en France : »

Les données utilisées sont de nature multiple. La première donnée est la mesure astronomique de la distance moyenne Terre-Lune. Dans la dernière édition des *Principia* (1729) sur laquelle nous nous basons pour la distance moyenne Terre-Lune (en rayons terrestres) Newton se réfère aux travaux de nombreux astronomes :

Première édition 1687 :	Deuxième édition 1713 :	Troisième édition 1726 :
Nombre donné par les Astronomes : 59	Nombre donné par les Astronomes : 59	Ptolémée (et autres) : 59
Vendelius : 60	Vendelius : 60	Vendelius & Huygens : 60
Copernic : $60\frac{1}{3}$	Copernic : $60\frac{1}{3}$	Copernic : $60\frac{1}{3}$
-	-	Street : $60\frac{2}{5}$
Kircher : $62\frac{1}{2}$	-	-
Tycho : $56\frac{1}{2}$	Tycho : $56\frac{1}{2}$	Tycho : $56\frac{1}{2}$

En références faites sur ce point, Newton semble suivre l'exemple aristotélicien à savoir citer les autorités qui le précèdent, mais sans présenter les théories de chacun d'eux, ni les méthodes utilisées pour arriver au résultat, ni les différents facteurs pris ou pas en compte lors du processus d'observation et de calcul. Comparant les trois éditions, on observe une certaine stabilité des références astronomiques (Nombre d'Astronomes/autres, Vendelius, Copernic et Tycho), puis la disparition de Kircher dès la deuxième édition et l'apparition de Ptolémée, Huygens et Street à la troisième édition.

Malgré les différences au sein du processus d'observations et des calculs, le seul résultat critiqué par Newton est celui de Tycho Brahe et des astronomes qui ont fait le choix de suivre ses tables. Dans sa critique il met en avant le phénomène de réfraction. Il est vrai que Tycho est le premier à avoir déduit le phénomène de réfraction atmosphérique par ces observations. Les corrections dues à la réfraction étaient introduites tardivement par Tycho et à contre cœur. Les résultats *bizarres* de ces tables de réfractions (concernant principalement le Soleil) sont dus au fait que Tycho a adopté la valeur traditionnelle de 3' pour la parallaxe du Soleil à l'horizon (à la place de 9'). Il a ainsi introduit des erreurs dans toutes ses mesures d'altitude solaire. Alors que ses données d'observations lui permettaient d'ignorer la parallaxe solaire, il est resté fidèle à la tradition et a dû inventer des solutions en introduisant des réfractions étranges afin d'offrir à sa théorie solaire une cohérence.<sup>380</sup> Il considère ainsi les réfractions du Soleil

---

<sup>380</sup> Moesgaard, K. P. (1988), « Refraction in TYCHO Brahe's Small Universe » in *Mapping the Sky : past heritage and future directions* : proceedings of the 133rd Symposium of the

plus importantes que celles des étoiles fixes et les réfractions de la Lune tantôt moindres tantôt plus importantes. Comme le souligne Chambers dans son *Cyclopeadia* :

« Mais la théorie des *Réfractions* (celle observée par lui est celle due à *Snellius*) n'a pas été entièrement comprise à son époque (celle de Tycho Brahe). »<sup>381</sup>

Il semble probable que la critique de Newton n'ait pas comme cible Tycho lui même, mais les astronomes qui persistent à suivre son exemple. Par sa critique, Newton peut ainsi se débarrasser de la donnée la moins en accord avec les autres. Ptolémée et Copernic qui n'ont pas pris en compte la réfraction atmosphérique de la lumière lors de leurs observations et calculs, ne deviennent point sujets de critique, au contraire, puisque Ptolemée apparaît aux côtés d'astronomes contemporains et que Copernic garde sa place d'autorité dans chaque édition. En ce qui concerne l'apparition de Street dans la troisième édition, il est possible que Newton ait voulu inclure dans ces références l'édition de Halley de l'*Astronomia Carolina* de Thomas Street. Cet ouvrage a paru en anglais en Février 1710, où l'on trouve un nombre d'observations effectués par Halley (de la Lune et des étoiles, réalisées à Islington entre Octobre 1682 et Février 1684, avant sa fameuse visite à Newton, qui figurent dans les appendices.)<sup>382</sup>

Newton retient la distance Terre-Lune de 60 demi diamètres terrestres, qui correspond pratiquement à la moyenne arithmétique des trois autres, dans l'édition de 1726. On peut aussi reprendre Whistleside comme dans le MS Add 3958, 87<sup>r-v</sup>, et considérer que Newton reste fidèle à une tradition du XVIIe qui veut que cette distance soit égale à 60 demi-diamètres terrestres<sup>383</sup>.

---

International Astronomical Union, held in Paris, France, June 1-5, 1987 / edited by S. Débarbat, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 87-92.

<sup>381</sup> Chambers E. (1728), *Cyclopeadia : or, an Universal Dictionary of Arts and Sciences ; The things signify'd thereby, in the several Arts, both Liberal and Mechanical, And the several Sciences, Human and Divine*, London : Printed for James ans John Knapton etc., Vol II. 982. « But the theory of *Refractions* (which he have observed is owing to *Snellius*) was not fully understood in his Age ».

<sup>382</sup> Schaffer S. (2013), « Swedenborg's Lunars. », in *Annals of Science*, Vol. 71, No. 1., 1-25.

<sup>383</sup> Chapitre III, partie 3 de cette thèse.

La deuxième donnée est un résultat d'observations célestes également. Il s'agit de la période de rotation de la Lune autour de la Terre, de 27 jours 7 heures 43 minutes. Newton ne fait pas référence à une autorité quelconque mais il considère ce résultat comme accepté par l'ensemble des Astronomes. La dernière donnée utilisée par Newton est le résultat d'une mesure géodésique effectuée en France. Il s'agit du résultat donné par Jean Picard dans son ouvrage intitulé *Mesure de la Terre* publié en 1671. Dans cet ouvrage Picard nous dit que la longueur d'un degré de latitude terrestre entre Paris et Amiens est égale à 57060 toises françaises<sup>384</sup>. La Terre, dans cette opération, est considérée comme absolument sphérique, « passant par dessus des inégalitéz de la surface de la Terre »<sup>385</sup>, ce qui fait que l'on peut la diviser en 360 degrés. Si l'on arrive ainsi à mesurer un degré de latitude terrestre nous pouvons déduire la circonférence terrestre, son rayon etc. L'objectif de Picard était de déterminer la mesure de la Terre « non seulement pour l'utilité de la Géographie, en ce qui concerne les différences des Longitudes, mais particulièrement encore pour l'usage de la Navigation ; »<sup>386</sup> Cette mesure, réalisée suivant la méthode de la triangulation, a trouvé un usage très large. Un usage pratique, et, dans le cas des *Principia*, un usage théorique.

2. Le calcul de la détermination de la distance parcourue par la Lune depuis son orbite dans une minute de temps si la seule force exercée sur elle était la gravité.

« on aura  $15\frac{1}{2}$  pieds de Paris pour l'espace que la Lune parcouroit en une minute, si elle était privée de tout autre mouvement & qu'elle descendit vers la terre par la seule force qui la retient (selon le Cor. de la Prop. 3.) dans son orbite : ce qui est aisé à tirer, par le calcul, soit de la Prop. 36. du Liv. 1. ou (ce qui revient au même) du Cor. 9. de la quatrième Proposition du même Livre. Car le sinus verse de l'arc que la Lune parcourt en une minute, dans son mouvement moyen, à la distance de 60 demi diametres de la terre, est de  $15\frac{1}{12}$  pieds de Paris environ, ou plus exactement de 15 pieds un pouce &  $1\frac{4}{9}$  lignes. Or, comme cette force doit augmenter en approchant de la terre en raison

---

<sup>384</sup> Débarbat S. (2013), « The French Savants, and the Earth-Sun distance », in *The Journal of Astronomical Data*, 19, 1. Débarbat fait la conversion des toises françaises en mettre 1 toise = 1,95m.

<sup>385</sup> Picard J. (1671), *Mesure de la Terre*, Paris : Imprimerie Royale, 3.

<sup>386</sup> Ibid., 2.

doublée inverse de la distance, & que par conséquent elle doit être 60 × 60 fois plus grande à la surface de la terre qu'à la distance où est la Lune ; »

Le calcul est fait dans l'hypothèse d'une Terre immobile, sans mouvement diurne ni mouvement annuel, le seul mouvement considéré ici est celui de la rotation de la Lune autour de la Terre. La Lune est supposé sphérique. Elle suit un mouvement circulaire uniforme autour de la Terre et se trouve à une distance de 60 rayons terrestres du centre de la Terre, ce qui veut dire que selon la loi de la gravité mentionnée plus haut, la gravité doit être 3600 fois plus forte à la surface de la terre qu'à la distance de la Lune. Newton calcule par les opérations géométriques la chute imaginée de la Lune si elle s'arrêtait à un point (B) de sa trajectoire circulaire. Reprenons les données nécessaires à ce calcul, que nous avons analysées plus haut :

1. La distance de la Lune du centre de la Terre qui par les observations astronomiques a été déterminée en 60 rayons terrestres,  $R=60$  r.t. et son diamètre est de 120 rayons terrestres.
2. La circonférence de la Terre par les observations astronomiques 123249600 pieds de Paris
3. La période de rotation de la Lune autour de la Terre utilisant comme unité de temps le jour sidéral. Elle effectue un tour complet autour de la Terre dans 27 jours 7 heures 43 minutes ou 39343minutes.

Le calcul effectué ici suit la démonstration du corollaire 9 de la Proposition IV du Livre I. Connaissant la circonférence de la Terre donnée par les observations astronomiques, 123249600 pieds de Paris, on peut calculer le rayon terrestre par la formule géométrique  $C=2\pi R$ <sup>387</sup>, soit  $R_T = 19607890,9$  pieds de Paris. Le rayon de l'orbite lunaire est 1176473454,54, donc le diamètre 2352946909,08 et la circonférence du cercle *ABD* décrit par la Lune est 7394976000 pieds de Paris. On peut alors calculer la distance, ou l'arc *AB* parcouru par la Lune dans une minute de temps. Une révolution complète

---

<sup>387</sup> Newton utilise souvent  $\pi=22/7$  au lieu de 3,1415926. Voir Newton I. & Du Chatelet E. (2015), Principes mathématiques de la philosophie naturelle, Toulmonde M. (eds), Ferney-Voltaire : Centre International d'étude du XVIIe siècle, Tome 1, 36 ; Tome 2, 211 (note 30), 92 (n.28), 362 (n.217) et 374 (n.228), avec  $\pi/2 =$  environ 11/7.

autour de la Terre s'effectue en 39343min, dans une minute la Lune parcourt donc une distance de 187961,67 pieds de Paris.

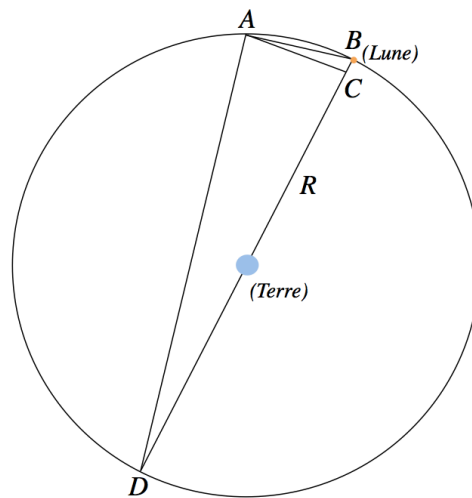


Fig. 4.6. Figure explicative créée par l'auteur de cette thèse.

Supposons maintenant que la Lune a parcouru dans une minute de temps sous l'action seule de la gravité lors de sa chute une distance imaginaire  $BC$ . Notre objectif est de calculer cette distance. Dans le cercle  $ABD$  on suppose deux triangles  $ABC$  et  $ABD$ . Ces deux triangles sont des triangles rectangles avec les angles  $\hat{A}=\hat{C} = 90^\circ$ , et avec un angle commun,  $\hat{B}$ . Ces deux triangles ayant les mêmes angles sont semblables, leur côtés sont ainsi proportionnels :  $\frac{BC}{AB} = \frac{AB}{DB} \Rightarrow BC = \frac{AB^2}{DB}$ . Si l'on considère que le temps d'une minute est un temps infiniment petit on peut considérer que l'arc  $AB$  est égal au segment  $AB$ . Dans ce cas là on peut calculer  $BC$  à partir de la relation qu'on a trouvée plus haut,  $BC$  ainsi est égale à 15,015 pieds de Paris<sup>388</sup>.

Ce n'est pas un hasard si nous ne trouvons pas le même résultat que Newton, à savoir 15 pieds un pouce &  $1\frac{4}{9}$  lignes. Densmore D. et Ducheyne S.<sup>389</sup> soutiennent que Newton dans son calcul inclut l'influence de la force du Soleil sur la Lune. Prenant en compte le

<sup>388</sup> Nous ne trouvons pas le même résultat ni avec Densmore D. ([2003] 2010, 370) qui trouve 15,0089161 pieds de Paris ni avec Ducheyne S. (2012, 137) qui trouve environ 15.009 pieds de Paris. Les deux utilisent comme valeur de  $\pi$  égale à 3,1415926.

<sup>389</sup> Densmore D. ([2003] 2010), 370 & Ducheyne S. (2012), 137-138.

corollaire II de la Proposition XLV du Livre I<sup>390</sup>, nous dit Densmore, on peut calculer l'effet du Soleil sur la Lune. « Il s'avère que l'action du Soleil qui éloigne la Lune de la Terre est à la force centripète de la Lune comme le 1 est à  $178\frac{29}{40}$ . (...) Il multiplie alors le résultat (15,0089161 pieds de Paris) au  $178\frac{29}{40}/177\frac{29}{40}$  et il obtient 15.093366, ou 15 pieds de Paris, 1 pouce &  $1\frac{4}{9}$  lignes<sup>391</sup>. Sans l'éloignement de la Lune de la Terre provoqué par le Soleil (par conjonction) et l'éloignement de la Terre de la Lune (par opposition), la Lune tomberait beaucoup plus loin dans une minute de ce que l'on observe, d'un peu plus que huit centièmes de pieds, ou un peu plus qu'un pouce. »<sup>392</sup>

2. La détermination de la distance parcourue par un corps en chute libre à proximité de la surface terrestre dans une seconde de temps.

« un corps qui tomberoit avec cette force, devrait parcourir ici-bas dans une minute  $60 \times 60 \times 15\frac{1}{12}$  pieds de Paris, & dans une seconde  $15\frac{1}{12}$  pieds de Paris, ou plus exactement 15 pieds 1 pouce &  $1\frac{4}{9}$  lignes. Et c'est en effet l'espace que les corps décrivent dans une seconde en tombant vers la terre. Car la longueur du pendule qui bat les secondes dans la latitude de Paris, est de 3 pieds de Paris & 8 lignes & demie, selon que *M. Hughs* l'a déterminé ; & la hauteur qu'un corps grave parcourt en tombant pendant une seconde, est à la demi longueur de ce pendule en raison doublée de la circonférence du cercle à son diamètre (comme *M. Hughs* l'a aussi déterminé) c'est-à-dire, que cette hauteur est de 15 pieds de Paris 1 pouce et  $1\frac{4}{9}$  lignes. »

---

<sup>390</sup> « **Cor. 2.** Ainsi, si le corps, par une force centripète qui soit réciproquement comme le carré de la hauteur, fait sa révolution dans une ellipse qui ait son foyer dans le centre des forces, et qu'à cette force centripète on ôte ou on ajoute une force nouvelle quelconque ; on peut connaître (par l'exemple 3) le mouvement des apsides causé par cette force nouvelle : et réciproquement. »

<sup>391</sup> Le pied de Paris étant environ égal à 0,324839 m la chute de la lune vers le centre de la Terre, avec l'effet du Soleil prise en compte, serait égal à 1592657,654233m.

<sup>392</sup> Newton I. & Densmore D. ([2003] 2010), 370. Trad. pers. : « It turns out that the action of the sun in drawing the moon away from the earth is to the centripetal force of the moon as 1 to  $178\frac{29}{40}$ . (...) So he multiplies the result ((15,0089161 Paris feet) by  $178\frac{29}{40}/177\frac{29}{40}$  to get 15.093366, or 15 Paris feet, 1 inch &  $1\frac{4}{9}$  lines. »

Newton, en ce qui concerne la chute libre d'un corps à proximité de la surface terrestre, n'utilise pas son propre calcul du Vellum manuscrit utilisé dans le MS Add 3958 87, mais fait référence au résultat donné par Christiaan Huygens dans son *Horloge à Pendule*, publié en 1673. Ce résultat sera étudié dans son contexte dans le Chapitre VII de cette thèse. Mis à part le résultat de Huygens, il souligne le rapport géométrique entre la longueur du Pendule à secondes ( $T=2$  sec) et le cercle que Huygens a utilisé pour déduire son résultat. On verra dans le Chapitre VII que le résultat de chute annoncé par Huygens n'est pas un résultat de pure mesure, mais est un mélange entre géométrie et expérience. Une relation très particulière se met en place lors de cette recherche dans l'œuvre de Huygens. Nous avons vu que l'identification du processus suivi par Newton pour l'établissement de son propre résultat de mesure du temps lors d'une chute, dans les manuscrits étudiés dans le Chapitre III de cette thèse, est très difficile. Newton utilise ici l'heureuse coïncidence de la division du temps et de la distance Terre-Lune pour démontrer l'universalité de la gravité.

### 3. Une seule force : la gravité.

« Donc la force par laquelle la Lune est retenue dans son orbite, serait égale à la force de la gravité ici-bas, si la Lune étoit près de la surface de la Terre, donc (selon les Règles 1 & 2.) c'est cette même force que nous appelons *gravité*. Car si cette force étoit autre que la gravité, les corps en s'approchant de la terre par ces deux forces réunies descendroient deux fois plus vite, & ils parcourroient en tombant pendant une seconde un espace de  $30\frac{7}{6}$  pieds de Paris : ce qui est entièrement contraire à l'expérience.

Ce calcul est fondé sur l'hypothèse que la terre soit en repos, car si la terre & la Lune se meuvent autour du Soleil, & qu'elles tournent en même temps autour de leur commun centre de gravité : la distance respective des centres de la Lune & de la terre sera de  $60\frac{1}{2}$  demi diamètres de la Terre environ, la loi de la gravité demeurant la même ; c'est ce qu'on verra clairement si on veut faire le calcul, lequel ne demande que la Prop. 60. du Livre 1. »<sup>393</sup>

---

<sup>393</sup> Traduction par feu de Madame la Marquise du Chastellet.

« PROPOSITIO IV. THEOREMA IV.

*Lunam gravitare in terram, & vi gravitatis retrahi semper a motu rectilineo, & in orbe suo retineri.*



Newton nous renvoie ici aux Règles I & 2 présentées plus haut. Ces sont ces deux Règles, qui permettent l'universalisation de la Gravité. Une remarque très pertinente par rapport au choix du cadre posé par Newton (que la terre est au repos) a été faite par

---

Lunae distantia mediocris a terra in syzygiis est semidiametrorum terrestrium, secundum *Ptolemaeum* & prorsusque astronomorum 59, secundum *Vendelinum* & *Hugenium* 60, secundum Copernicum  $60\frac{1}{33}$  secundum *Streetum*  $60\frac{2}{5}$ , & secundum *Tychonem*  $56\frac{1}{2}$ . Ast *Tycho*, & quotquot ejus tabulas refractionum sequuntur, constituendo refractiones solis & lunae (omnino contra naturam lucis) majores quam fixarum, idque scrupulis quasi quatuor vel quinque, auxerunt parallaxin lunae scrupulis totidem, hoc est, quasi duodecima vel decima quinta parte totius pallaxeos. Corrigatur iste error, & distantia evadet quasi  $60\frac{1}{2}$  semidiametrorum terrestrium, fere ut ab aliis assignatum est. Assumamus distantiam mediocrem sexaginta semidiametrorum in syzygiis ; & lunarem periodum respectu fixarum compleri diebus 27, horis 7, minutis primis 43, ut ab astronomis statuitur ; atque ambitum terrae esse pendum Parisiensium 123249600, uti a Gallis mesurantibus definitum est : & si luna motu omni privari fingatur ac dimitti, ut urgente vi illa omni, qua (per corol. prop. III) in orbe suo retinetur, descendat in terram ; haec spatio minuti unius primi cadendo describet pedes Parisienses  $15\frac{1}{12}$ . Colligitur hoc ex calculo vel per propositionem XXXVI. libri primi, vel (quod eodem recidit) per corollarium nonum propositionis quartae ejusdem libri, confecto. Nam arcus illius quem luna tempore minuti unius primi, medio suo motu, ad distantiam sexaginta semidiametrorum terrestrium describat, sinus versus est pedum Parisiensium  $15\frac{1}{12}$  circiter, vel magis accurate pedum 15. dig. 1. & lin.  $1\frac{4}{9}$ . Unde cum vis illa accedendo ad terram augeatur in duplicata distantiae ratione inversa, ideoque ad superficiem terrae major sit partibus 60x60 quam ad lunam ; corpus vi illa in regionibus nostris cadendo, describere deberet spatio minuti unius primi pedes Parisienses  $60x60x15\frac{1}{12}$ , & spatio minuti unius secundi pedes  $15\frac{1}{12}$ , vel magis accurate pedes 15. dig. 1. & lin.  $1\frac{4}{9}$ . Et eadem vi gravia revera descendunt in terram. Nam penduli, in latitudine Lutetiae Parisiorum ad singula minuta secunda oscillantis, longitudo est pedum trium Parisiensium & linearum  $8\frac{1}{2}$ , ut observavit *Hugenius*. Et altitudo, quam grave tempore minuti unius secundi cadendo describit, est ad dimidiam longitudinem penduli hujus in duplicata ratione circumferentiae circuli ad diametrum ejus (ut indicavit etiam *Hugenius*) ideoque est pedum Parisiensium 15. dig. 1. lin.  $1\frac{7}{9}$ . Et propterea vis qua luna in orbe suo retinetur, si descendatur in superficiem terrae, aequalis evadit vi gravitatis apud nos, ideoque (per reg. I. & II.) est illa ipsa vis quam nos gravitatem dicere solemus. Nam si gravitas ab ea diversa effet, corpora viribus utrisque conjunctis terram petendo duplo velocius descenderent, & spatio minuti unius secundi cadendo describerent pedes Parisienses ??? omnino contra experientiam.

Calculus hic fundatur in hypothesis quod terra quiescit. Nal si terra & luna moveantur circum solem, & interea quoque circum commune gravitatis centrum revolvantur : manente lege gravitatis distantia centrorum lunae ac terrae ab invicem erit 60 ??? semidiametrorum terrestrium circiter ; uti computatione xem ineunti patebit. Computatio autem iniri potest per prop. LX. lib. I.

Michel Blay et Georges Barthélémy dans leur article intitulé *Changements de repères chez Newton : le problème des deux corps dans les Principia*.<sup>394</sup> L'objet principal de cet article est la détermination des « mouvements de deux corps en interaction »<sup>395</sup>. Le système Terre-Lune s'inscrit effectivement dans l'étude de deux corps en interaction. Les deux historiens attirent notre attention sur le fait que le cadre posé ici par Newton est problématique. Tout d'abord, Newton suppose l'immobilité de la Terre sans explication. Sans l'introduction d'une force quelconque qui serait la cause de cette immobilité « il va jusqu'à le poser immobile (l'un de deux corps, pour nous ici la Terre) (...), sans aucune justification, en particulier sans que cette fixité résulte d'une opération dynamique. »<sup>396</sup> Ensuite, Newton dans ce système de deux corps, considère le premier comme attirant et le second comme attiré. Mais ceci va à l'encontre de sa troisième loi qui nous dit que « l'action est toujours égale et opposée à la réaction »<sup>397</sup>. Si c'est ainsi comment peut-on considérer que l'un de deux corps est immobile ? Les auteurs nous invitent à voir la relation entre attirant et attiré sous un autre prisme. Soit la relation entre les deux corps est plus « mathématique que naturelle »<sup>398</sup> soit il faut considérer que la masse de l'attiré est négligeable devant la masse de l'attirant. Dans le cas du test de la Lune c'est plus particulièrement la seconde hypothèse qui est la bonne. Les auteurs nous disent que « la distance 60,5 a effectivement été reconnue au début de la Proposition comme conforme aux meilleures observations. Puis la comparaison de l'accélération de la lune à celle de la gravité au sol a été menée, sur la base de la distance 60, avec succès, mais sans justification. La bonne justification ne serait-elle contenue dans l'indication finale ? »<sup>399</sup>

---

<sup>394</sup> Blay M. & Barthélémy G. (1984), « Changements de repères chez Newton : le problème des deux corps dans les *Principia*. » in *Archives Internationales d'Histoire des Sciences Oxford*, 34(112), 68-98.

<sup>395</sup> Ibid., 68.

<sup>396</sup> Ibid., 84.

<sup>397</sup> Newton I. ([1729] 1756), Livre I, 18.

<sup>398</sup> Les auteurs à ce point nous renvoie à l'édition de Cajori F. : *The systeme of the world*, 568, paragraphe 20, et au Cohen I.B., *Introduction to Newton's Principia*, 327-335.

<sup>399</sup> « Ce calcul est fondé sur l'hypothèse que la terre soit en repos, car si la terre & la Lune se meuvent autour du Soleil, & qu'elles tournent en même temps autour de leur commun centre de gravité : la distance respective des centres de la Lune & de la terre sera de  $60\frac{1}{2}$  demi diamètres de la Terre environ, la loi de la gravité demeurant la même ; c'est ce qu'on verra clairement si on veut faire le calcul, lequel ne demande que la Prop. 60. du Livre 1. »

De fait, l'application de la Proposition LX (ou si l'on veut l'utilisation anticipée de la Proposition XV) donne 60 pour la distance de la lune à la terre au repos si l'on part de 60,5 quand la terre est mobile et si l'on prend avec Newton 39,788 comme rapport de la masse de la terre à celle de la lune<sup>400</sup> ; »<sup>401</sup> on doit alors interpréter la distance de 60 utilisée ici par Newton, dans l'idée que la masse de la Lune est considérée comme négligeable, tout en conservant la période de révolution observée. Les auteurs voient un intérêt double à l'usage de ce mouvement fictif. De cette manière, dans un premier temps, l'approximation faite est valable pour le système Terre-Lune et pour le système Soleil-Planètes également. Deuxièmement, pour pouvoir comparer simplement la chute de la Lune à celui des corps graves à proximité de la surface terrestre. Car pour ces derniers on peut considérer la Terre immobile vu leur taille négligeable comparée à celle de la Terre. Néanmoins les auteurs concluent que « Ce repos (de la Terre) n'étant pas attribué par Newton, dans ces textes, à l'écart des masses, il n'est pas impossible qu'il y ait eu, en son esprit, quelque confusion avec un changement de repère. »<sup>402</sup>

#### 4. La chute de la Lune à proximité de la surface Terrestre.

##### « SCHOLIE

On peut rendre la démonstration de cette Proposition plus sensible, par le raisonnement suivant. Si plusieurs Lunes faisoient leurs révolutions autour de la terre, ainsi que dans le système de Jupiter ou de Saturne, leurs temps périodiques, par l'induction, suivroient la loi découverte par Kepler, & par conséquent leurs forces centripètes (Prop. I. de ce Livre) seroient réciproquement comme les quarrés de leurs distances au centre de la terre. Et si celle de ces Lunes qui seroit la plus proche de la terre étoit petite, & qu'elle touchât presque le sommet des plus hautes montagnes : la force centripète, par laquelle cette Lune seroit retenue dans son orbite, seroit, suivant le calcul précédent, à peu près égale à celle des corps graves placés sur le sommet de ces montagnes. En sorte que si cette même petite Lune étoit privée de tout le mouvement par lequel elle avance dans son orbe, & qu'elle n'eût plus par conséquent de force centrifuge, elle descendroit vers la

---

<sup>400</sup> Les auteurs précisent que ce rapport est donné dans le Livre III, Proposition XXXVII, Corollaire IV au sujet de la théorie des marrés.

<sup>401</sup> Blay M. & Barthélemy G. (1984), 91.

<sup>402</sup> Ibid.

terre avec la même vitesse que les corps graves placés au sommet de ces montagnes tombent vers la terre, & cela à cause de l'égalité qui seroit entre la gravité & la force qui agiroit alors sur cette petite Lune. Or si la force par laquelle cette petite Lune descend étoit autre que la gravité, & que cependant elle pesât sur la terre comme les corps graves placés au sommet de ces montagnes, cette petite Lune devroit par ces deux forces, c'est-à-dire, celles des corps graves & celles de ces petites Lunes, sont dirigées vers le centre de la terre, & qu'elles sont égales & semblables entr'elles, ces forces sont les mêmes & par conséquent elles doivent avoir (Regles 1 & 2.) une même cause. Donc la force, qui retient la Lune dans son orbite, est celle-là même que nous appelons gravité : puisque sans cela cette petite Lune n'auroit point de gravité au sommet de cette montagne, ou bien elle tomberoit deux fois plus vîte que les graves. »

Dans la Scholie de la Proposition IV, Newton nous invite à faire une expérience de pensée. Il nous demande d'imaginer la Terre avec plusieurs Lunes en révolution autour d'elle. De cette manière il peut la comparer à Jupiter ou Saturne, et nous dire que ces phénomènes ont des effets semblables. Ensuite il nous demande d'imaginer une petite Lune à proximité de la surface terrestre. Il nous dit que la Lune tomberait vers le centre de la Terre de la même manière qu'un corps grave quelconque. Cette expérience n'a pas d'autre raison d'être que d'appuyer encore plus l'usage des Règles I & 2 et surtout de la deuxième, qui nous demande de considérer la même cause pour les effets semblables, ici la gravité. La gravité, une cause nécessaire pour une explication du système du Monde réussie.

On a vu dans cette Proposition qu'il est question de la mesure du temps dans la chute libre. Quelle chute dans une minute, réelle ou imaginaire, quelle chute dans une seconde, réelle ou imaginaire. La comparaison effectuée ici n'est pas celle du temps de la chute mais celle de la distance parcourue dans un temps non seulement déterminé mais aussi considéré comme infiniment petit. La mesure du temps est néanmoins nécessaire même s'il s'agit d'une durée déterminée. Mais qu'en est-il de la précision de cette mesure ? Newton ici est très loin de la précision dans la mesure du temps que nous avons définie dans cette thèse. Comme on a vu dans ces manuscrits, Newton est à la recherche d'une valeur satisfaisante afin de pouvoir démontrer et établir universellement sa loi gravitationnelle. Il n'est point dans la quête de la subdivision des unités temporelles à

l'infinie. Le résultat de mesure du temps n'a pas non plus le rôle d'élément de validation de sa théorie, d'autant plus qu'il n'est pas le résultat d'une mesure pure mais d'un mélange théorie et pratique au service de la géométrie. Il est un élément constitutif de la démonstration de sa théorie entre autres, une des pièces du *puzzle* newtonien qui doit s'ajuster avec les autres afin de représenter l'image générale.

## V. GALILEO GALILEI, « 100 BRACCIA DANS 5 SECONDES »

On a vu dans le Vellum manuscrit étudié plus haut que pour la chute libre des corps graves partants du repos, le premier choix de Newton du temps de la chute, et de la distance parcourue, était le résultat annoncé par Galilée dans son ouvrage *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*. Dans cette partie nous allons étudier le contexte dans lequel ce résultat a été annoncé par Galilée et les expériences et les calculs liés à ce résultat. Le *Dialogue* de Galilée apparu en 1632 est le fruit de nombreuses années de travail. Cet ouvrage est écrit sous forme de dialogues, comme son titre l'indique, imitant les dialogues platoniciens. C'est une discussion entre trois personnages sur les deux théories capables de décrire le système du monde : celle établie par Ptolémée et celle établie par Copernic. Les trois personnages en question sont inspirés des connaissances de Galilée :

« Il y a bien des années, j'ai eu plusieurs occasions, dans la merveilleuse cité de Venise, de converser avec le signor Giovan Francesco Sagredo, de très illustre naissance et d'esprit très pénétrant. Il y avait là aussi, venu de Florence, le signor Filippo Salviati dont les moindres titres de gloire étaient l'éclat de son sang et la magnificence de ses richesses ; c'est un homme d'une intelligence élevée qui se délectait avec le plus d'avidité d'exquises spéculations. Avec ces deux hommes, j'eus l'occasion de discuter de ces matières, en présence d'un philosophe péripatéticien chez qui le principal obstacle à l'intelligence de la vérité était précisément la renommée que lui avaient acquise ses interprétations d'Aristote.

À présent, la mort cruelle a privé Venise et Florence de ces deux grandes lumières, au plus beau de leurs années; j'ai résolu de prolonger leur vie et leur renommée, dans la faible mesure de mes forces, en les présentant dans les pages qui suivent comme les interlocuteurs du débat. Il n'y manquera pas non plus le bon péripatéticien auquel en raison de son affection excessive pour les commentaires de Simplicius, il m'a paru convenable de laisser le nom de son auteur révérend et de taire son propre nom. Puisse ces deux grandes âmes, que mon cœur continue toujours à vénérer, agréer ce monument

public de mon amour toujours vivant ! Puisse aussi la mémoire de leur éloquence m'aider à exposer à la postérité les réflexions que j'ai promises !»<sup>403</sup>

Galilée peut ainsi faire parler plusieurs personnages qui soutiennent des avis différents sur le sujet, sans qu'il ait besoin de s'exprimer lui-même en rélevant ses propres convictions. Et ceci non pas sans raison. À l'époque de Galilée, le système du monde comme décrit par Copernic n'était pas accepté par les doctrines ecclésiastiques. Galilée avait accepté d'écrire cet ouvrage en respectant les consignes du Pape Urbain VIII : Il fallait présenter le mouvement de la Terre soutenu par Copernic seulement au titre d'hypothèse, et donner la parole aux savants qui soutenaient l'idée du géocentrisme (la Terre immobile au centre du système du monde). Le cadre dans lequel cet ouvrage devait être accueilli était celui de l'hypothèse scientifique et non pas de la vérité. Galilée a eu du mal à respecter ces consignes. Dans cet ouvrage il soutient ouvertement l'héliocentrisme (le soleil immobile au centre du cosmos) contre le géocentrisme. Même s'il a essayé de se cacher derrière ses personnages, on peut facilement identifier son propos. Sagredo représente la pensée galiléenne, Salviati un esprit cultivé et curieux, et Simplicio tous ceux que Galilée appelle les « Aristotéliens » défenseurs du géocentrisme. Les deux premiers soutiennent la thèse copernicienne et Simplicio, seul contre tous, fait tout son possible pour soutenir et argumenter pour le géocentrisme, mais sans succès. Galilée dans ce dialogue est fortement inspiré par Platon non seulement en ce qui concerne la forme mais également dans la méthode utilisée (la maïeutique socratique) et parfois même dans le contenu.

Cet ouvrage est découpé en cinq parties distinctes : la Préface « au lecteur avisé » et les quatre journées de rencontre et de discussion. La discussion commence lors de la première journée avec l'ordre du cosmos. Elle continue sur le sujet du mouvement diurne et annuel de la Terre pour finir avec la théorie galiléenne qui explique le phénomène des marées. Dans la Préface Galilée prépare ses lecteurs à ce qui va suivre : « Je chercherai d'abord à montrer que toutes les expériences qu'on peut faire sur la Terre sont insuffisantes pour conclure à sa mobilité, mais aussi qu'elles peuvent

---

<sup>403</sup> Galileo G. ([1632] 1992), *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, traduit par René Fréreau, Paris : Seuil, 42-43.

indifféremment s'accorder aussi bien avec la mobilité de la Terre qu'avec son repos; (...) En second lieu, j'examinerai les Phénomènes célestes, en donnant de la force aux hypothèses coperniciennes comme si elles devaient absolument obtenir la victoire, (...) En troisième lieu, je proposerai une ingénieuse fantaisie. Il se trouve que j'ai dit, il y a bien des années, que le problème non résolu du flux de la mer pouvait recevoir quelque lumière si on admettait le mouvement de la Terre.»<sup>404</sup> Ce sont les arguments de la mobilité terrestre qui vont nous occuper ici.

### 1. Galilée vs Christophe Scheiner dans le *Dialogue*.

Lors de la deuxième journée dans l'ouvrage, il est question du mouvement diurne de la terre. Lors de l'étude de ce mouvement terrestre, Simplicio présente les arguments contre la révolution diurne faisant référence à des auteurs qui lui sont contemporains. Celui qui porte un intérêt tout particulier pour nous ici est le premier livre présenté par Simplicio. Il s'agit de l'œuvre de Ioannes Georgius Locher intitulé *Disquisitiones mathematicae, de controversiis et novitatibus astronomicis*<sup>405</sup>. C'est un ouvrage anticopernicien, qui présente des arguments par l'absurde contre le mouvement diurne de la terre. L'argument principal porte sur les trajectoires suivies par des corps graves lors de leurs chutes libres à des latitudes terrestres différentes. Locher trouve que les trajectoires en question (spirales à l'intérieur d'un cercle, spirales tracées sur un cône, hélicoïdales etc.) semblent tellement improbables que le mouvement diurne de la Terre ne peut pas être affirmé. La chute qui intéresse particulièrement Galilée est la chute rectiligne, au niveau de l'équateur, d'un corps pesant, depuis « la concavité de l'orbe lunaire » jusqu'au centre de la Terre<sup>406</sup>. Par la bouche de Simplicio, Galilée présente l'argumentation de l'ouvrage comme suit :

« SIMPLICIO : (...) Il s'agit des critiques de deux auteurs qui *ex professo* écrivent contre Copernic : on peut lire les premières dans un petit ouvrage de conclusions physiques ;

---

<sup>404</sup> Ibid., 41-42.

<sup>405</sup> Locher J.G. (1614), *Disquisitiones mathematicae, de controversiis et novitatibus astronomicis*, Ingolstadii : ex typographeo Ederiano apud Elisabetham Angermariam.

<sup>406</sup> L'argument principal contre le mouvement diurne, de la trajectoire de la chute libre des corps, dans l'ouvrage de Locher, a été traité par Koyré A. (1973), *Chute des corps et mouvement de la terre de Kepler à Newton*, Paris : Vrin, 16-17 & par Gapaillard J. (1993) *Et pourtant elle tourne : Le mouvement de la Terre*, Paris : Seuil, 203-215.



(...) Je vais donc commencer par les objections que contient le petit livre des conclusions, (...). Tout d'abord l'auteur calcule soigneusement combien de milles un point de la surface terrestre situé sur l'équateur parcourt en une heure, et combien en parcourent des points situés sur d'autres parallèles ; il ne se contente pas de calculer ces mouvements par heure, il les calcule aussi par minute ; non content de la minute, il descend jusqu'à la seconde. »<sup>407</sup>

Locher, dans la partie XIV de son ouvrage intitulée *Argument du mouvement diurne*, considère la période de la rotation de la Terre autour de son axe en 24 heures. Il présente ensuite le résultat de la chute libre partant du repos d'un point déterminé au-dessus de l'équateur. Simplicio restant fidèle au texte de Locher nous dit que l'auteur a effectué un calcul tellement subtil qu'il arrive à nous donner le résultat de la distance parcourue par un corps lors de sa chute non seulement en une heure, mais aussi en une minute et même en une seconde de temps. Dans une journée, selon le calcul de Locher, un corps situé à l'équateur parcourra une distance de 5400 *milles* allemands<sup>408</sup>. Dans une heure, 225 *milles* allemands, dans une minute  $3\frac{3}{4}$  *milles* allemands et dans une seconde  $0\frac{1}{16}$  de *milles*-allemands. Par la suite l'auteur effectue un calcul analogue pour la latitude de son pays, de 48 degrés, très probablement pour Augsbourg en Allemagne dont la latitude est 48.3291 degrés, pour les mêmes durées.<sup>409</sup> Galilée pose alors la

<sup>407</sup> Galileo G. ([1632] 1992), 231-232.

<sup>408</sup> Ibid., 233 : « Le mille allemand est la 5400<sup>e</sup> partie de la circonférence de l'équateur. »

<sup>409</sup> Locher J.G. (1614), 29 :

« *Hoc posito irrefragabili fundamento : cum terra viginti quatuor horis unam periodum obsoluat, necesse est unumquodq; puncum in terra sub aequatore constitutum conficere.*

Uno die naturali milliaria germanica	5400.
Hora una millaria germanica,	225.
Scrupulo uno primo, milliaria germanica	$3\frac{3}{4}$ .
Scrupulo uno secundo, milliaria germanica	$0\frac{1}{16}$ .

Si milliare unum sumatur pro 4166 passibus, ut Orontius sumit.

In nostro vero climate, graduum latitudinis 48. fertur terra

Motu diurno milliaria germanica	$3613\frac{1}{3}$ .
Motu horario,	$150\frac{1}{2}$
Unius scrupuli	$2\frac{1}{2}$ .

question, à travers la bouche de Salviati, de la méthode que l'auteur a utilisée pour arriver à ce résultat si fin. Simplicio prend la parole pour donner une réponse adéquate :

« SIMPLICIO : (...) Il montre même très clairement combien des milles parcourrait en ces temps un boulet d'artillerie placé dans la concavité de l'orbe lunaire (pour écarter tous les subterfuges de l'adversaire, il suppose que cet orbe est aussi grand que Copernic lui-même se l'est représenté) ; avec cette supputation très ingénieuse et élégante, il démontre qu'un corps lourd qui tomberait de là-haut mettrait bien plus de six jours pour arriver jusqu'au centre de la Terre, vers lequel tendent naturellement toutes les choses lourdes. (...) Pour prouver son idée *a fortiori*, il a fait son calcul en avantageant beaucoup l'adversaire : il suppose que la vitesse de chute le long de la verticale jusqu'au centre de la Terre est égale à la vitesse de son mouvement circulaire sur le grand cercle de la concavité de l'orbe lunaire ; cela fait 12 600 milles allemands à l'heure, ce qui tient vraiment de l'impossible ; toutefois, par souci de prudence et pour donner tous les avantages à l'adversaire, il veut bien tenir ce résultat pour vrai ; il en conclut que le temps de chute doit de toute façon dépasser les 6 jours. »<sup>410</sup>

D'après Galilée, ce résultat de temps de chute depuis la concavité lunaire a été calculé par Locher en faisant l'hypothèse que le corps, ou le boulet, tombera de cette distance avec une vitesse uniforme égale à celle qu'il aurait sur la concavité lunaire. Quand Locher parle de la « concavité lunaire », il le fait pour souligner une idée particulière. Il suppose que si l'on attribue à la Terre un mouvement diurne de vitesse uniforme, ce mouvement (et sa vitesse uniforme) sera partagé avec le monde sublunaire dans son intégralité. Dans sa discussion de la chute d'un corps de la concavité lunaire il suppose bel et bien que ce corps partage le mouvement diurne de la Terre. Il suppose ainsi la même vitesse entre le mouvement circulaire sur une orbite et le mouvement vertical de chute libre. Dans l'extrait cité plus haut on voit cependant que la vitesse considérée est probablement celle à l'équateur terrestre, qui conduit à dépasser 6 jours pour le temps de chute. Mais allons voir de plus près ce que Locher soutient dans sa thèse.

---

Unius secundi,

$0\frac{1}{24}$ .

<sup>410</sup> Galileo G. ([1632] 1992), 232-233.

« (...) Cela posé, *il est nécessaire que sur une terre mue circulairement, tout ce qui tend à tomber de l'air vers elle perpendiculairement soit entraîné en même temps qu'elle et d'un mouvement qui soit à tous [égards] proportionnel*<sup>411</sup>. Donc, tandis que la terre BNX tourne autour de l'axe  $v\lambda$  de B en B en passant par X, la petite sphère A tendant incontinent au point B, la petite sphère Y au-dessus du point  $\iota$  et la petite sphère  $\nu$  au pôle tourneraient elles aussi et accompliraient leur révolution en même temps que les points de la terre B et  $\iota$  et le pôle situés sous ces [petites sphères]. Supposons que ces boules, de même poids, de même forme et gravité aient été placées sur l'orbe lunaire, et soient lâchées en chute libre, et admettons que le mouvement vers le bas et le mouvement circulaire aient des vitesses égales. Bien qu'il en soit autrement sur l'orbe lunaire, puisque la boule A traverserait en son mouvement circulaire horaire au moins 12 600 milles allemands et la boule Y à notre latitude 8 431 (chiffres déduits de l'enseignement *a*) de Copernic et *b*) qu'on devrait encore majorer si l'on suit son disciple Maestlin), et qu'il est impossible que la descente puisse avoir une vitesse aussi considérable. La descente prendrait (afin de concéder le maximum aux adversaires) au moins six jours : pendant ce temps, la boule A ferait six fois le tour de la terre, tournant en même temps que la terre elle-même, de façon à se trouver toujours exactement au-dessus de son point B ; et il se produirait à six reprises aussi que la boule Y parviendrait en vingt-quatre heures en  $\alpha$  (allant de Y en Z en douze heures et revenant de Z en a), puis de  $\alpha$  en  $\beta$  avec le retour à  $\gamma$  en un jour, puis (en tournant en même temps que la terre) de  $\gamma$  en  $\varepsilon$  en passant par  $\delta$ , de  $\varepsilon$  en  $\eta$  en passant par  $\zeta$ , de  $\eta$  en  $\iota$  en passant par  $\theta$ , de  $\iota$  au centre du monde C en passant par K. Et il en irait semblablement avec la proportion convenable pour les oiseaux, la fumée, le feu, les nuages ou tous autres objets qui demeurent immobiles pendant des heures entières à l'aire libre au-dessus de la terre. (...) »<sup>412</sup>

Locher présente ici la terre BNX qui tourne autour de son axe  $v\lambda$ , et suppose trois boules, identiques, A au-dessus de l'équateur, Y au-dessus d'Augsbourg et  $\nu$  au-dessus du pôle. Tout cela noté sur une figure pour nous contre-intuitive. Alors que nous sommes habitués à nous représenter l'axe de la Terre à la verticale, ici Locher fait le choix de la représentation de la Terre dont l'axe de rotation est horizontal, le pôle Nord étant en  $\nu$ .

<sup>411</sup> L'usage d'italiques à ce point est fait par l'auteur dans la version latine mais elle n'est pas présente à la traduction française par Koyré A. (1973).

<sup>412</sup> Traduction du texte en français par Koyré A. (1973), *Chute des corps et mouvement de la terre de Kepler à Newton*, Paris : Vrin, 16-17.

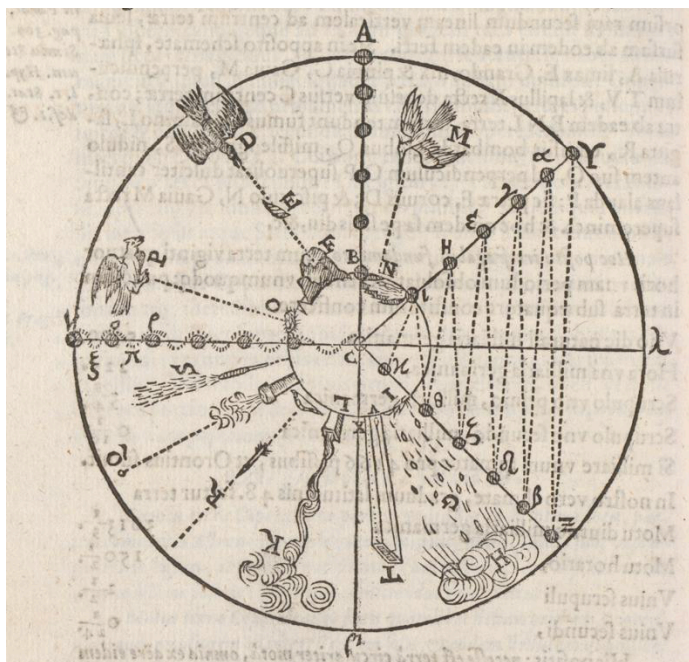


Fig. 5.1. Photographie de la figure originale présentée dans l'ouvrage de Locher étudié ici.

Il se peut que le choix de l'auteur reflète son désir de mettre en avant la seule chute qu'il considère véritablement rectiligne, celle qui a lieu au-dessus de l'équateur. Il fait l'hypothèse que dans un premier temps les trois boules suivent le mouvement circulairement uniforme de la Terre restant ainsi toujours au-dessus des mêmes points par rapport à la surface terrestre à la distance de la lune. Les boules en question partagent la vitesse du mouvement diurne de la Terre. Et plus précisément celle du point B à l'équateur. À un certain moment les boules commencent leur chute libre vers le centre de la Terre à vitesse uniforme égale à la vitesse terrestre dans son mouvement diurne. Locher nous dit que concevant la même vitesse, il faudrait au moins 6 jours pour les boules pour descendre jusqu'au centre de la Terre. Chacune d'elles suivant une trajectoire différente. Locher fait alors le rapport entre le mouvement circulaire uniforme et le mouvement rectiligne également uniforme de la chute. Il nous dit que la boule A pour le même temps, celui de sa chute (6 jours), ferait 6 révolutions suivant le mouvement de la Terre avec la même vitesse.

L'objectif de Galilée dans cette partie de son *Dialogue* est de réfuter l'argumentation présentée dans la thèse de Locher. Il ne se concentre pas pourtant sur la trajectoire décrite par les boules à des latitudes différentes mais surtout sur le résultat annoncé de

la chute rectiligne d'une boule de la concavité de la Lune jusqu'au centre de la Terre en 6 jours. Rappelons nous aussi que Galilée était en querelle avec Christophe Scheiner, le prêtre jésuite allemand, mathématicien et astronome de l'Université de Ingolstadt, concernant la priorité de la découverte des taches solaires,<sup>413</sup> et que Locher était son élève. On voit ainsi qu'il ne s'agit pas seulement pour Galilée de défendre le copernicanisme mais aussi de critiquer Scheiner à travers l'œuvre de son élève. Galilée qui s'exprime par la bouche de Salviati va démontrer l'absurdité du résultat annoncé par Locher.

La première remarque de Galilée est de l'ordre de la géométrie. Pour Galilée il est absurde de soutenir une thèse qui dit qu'un corps avec une vitesse uniforme (celle de la Lune) peut pour un même temps parcourir le rayon d'un cercle d'un côté (la distance Terre-Lune) et la circonférence du même cercle de l'autre (la circonférence de l'orbite lunaire). Le rapport entre la circonférence et le rayon est bien connu,  $C=2\pi R$ , le rayon est moins que le  $\frac{1}{6}$  de la circonférence du cercle. Comment est-il possible de soutenir que les deux distances sont parcourues dans un même temps par un corps qui suit un mouvement uniforme et de même vitesse ? Ceci est le signe pour Galilée d'une mauvaise connaissance des rapports géométriques fondamentaux de la part de l'auteur des *Disquisitiones mathematicae*. Alors que Galilée aurait pu se satisfaire de ce qu'il considère comme une erreur grave commise par Locher, il saisit l'opportunité d'anéantir les arguments de son adversaire en présentant les résultats de démonstrations géométriques originales, qui lui sont propres, inconnus du milieu savant de son époque. Ces démonstrations deviendront plus tard, des propositions piliers de son *Discours concernant les deux nouvelles sciences*, publié en 1638.

La deuxième remarque de Galilée (toujours exprimée via Salviati) porte sur la supposition de Locher concernant la vitesse de chute libre de la boule qui est uniforme et égale à sa vitesse de rotation dans la concavité lunaire. Ainsi en tombant à cette vitesse elle mettrait 6 jours pour atteindre le centre de la terre. Mais laissons la parole au personnage galiléen :

---

<sup>413</sup> Galilée avait découvert les taches solaires au mois d'Avril de 1611 et Scheiner six mois plus tard.

« SALVIATI : Avant tout il faut considérer que le mouvement des corps lourds n'est pas uniforme : partant du repos, ils accélèrent continuellement : c'est un effet que tout le monde connaît et a observé, sauf l'auteur moderne dont on vient de parler, puisqu'il ne parle pas d'accélération et présente ce mouvement uniforme. Mais cette connaissance générale ne sert à rien si on ne sait pas selon quelle proportion se fait cet accroissement de vitesse : cette conclusion, restée jusqu'à notre époque inconnue par les philosophes, a été trouvée et démontrée pour la première fois par notre ami commun l'Académicien. Dans certains de ses écrits encore inédits qu'il m'a fait la confiance de me montrer, à moi et à certains d'autres de ses amis, il démontre que l'accélération du mouvement rectiligne des corps lourds se fait selon les nombres impairs à partir de l'unité ; autrement dit, si on définit des temps égaux quelconques, aussi nombreux qu'on veut et si on suppose que, dans le premier temps, le mobile, partant du repos, a parcouru tel espace, par exemple une aune, pendant le second temps, il en parcourra trois, cinq pendant le troisième, sept pendant le quatrième, et ainsi de suite, selon la suite des nombres impairs. Cela revient à dire que les espaces parcourus par le mobile à partir du repos ont entre eux la proportion doublée de celle des temps mis à les parcourir ; ou encore, je dirai que les espaces parcourus sont entre eux comme les carrés des temps. »<sup>414</sup>

L'argument mis en évidence par Galilée est celui du genre de mouvement qui est celui de la chute libre, uniformément accéléré. Un mouvement considéré par Locher comme uniforme alors qu'en réalité, comme l'expérience nous le montre dans le monde d'ici-bas, c'est un mouvement uniformément accéléré. Il est intéressant de remarquer que Galilée n'envisage de variation de l'accélération avec la distance à la Terre. Pour lui la gravité au sens newtonien n'a pas de sens. Il est ainsi clair que cette force ne peut pas avoir d'action sur la Lune. Le point fort de l'argument de Galilée est que l'auteur ne se repose pas sur la simple observation du phénomène mais détermine la proportion entre l'espace et le temps lors de la chute. La détermination de l'accélération de la chute libre que fait Galilée est purement cinématique et locale (à la surface terrestre) et il extrapole cette valeur tout naturellement. Cette proportion nous dit Salviati, a été démontrée mathématiquement par l'Académicien. Ici visiblement Galilée parle de lui-même. Concernant la démonstration mathématique de cette proportion entre espace et temps,

---

<sup>414</sup> Galileo G. ([1632] 1992), 234-235.

il se réfère très probablement aux manuscrits qui constitueront plus tard son ouvrage *Discours concernant deux sciences nouvelles* le Théorème II- Proposition II de la troisième journée.<sup>415</sup> À la suite de cette référence à la « démonstration mathématique très pure »<sup>416</sup> Galilée revient au calcul : « Combien de temps mettrait un corps lourd pour tomber de la concavité de la Lune jusqu'au centre de la Terre ? »<sup>417</sup>. La méthodologie que Galilée propose se divise en deux étapes. Il faut dans une première étape établir une expérience qui sera répétée plusieurs fois de sorte à avoir un résultat qui offre une certaine certitude. Lors de la seconde étape, il faudrait combiner le résultat expérimental trouvé avec le résultat de la démonstration géométrique et effectuer le calcul pour le cas étudié ici. L'expérience consiste à déterminer le temps de la chute libre d'un boulet de fer de cent livres, partant du repos, d'une hauteur de 100 *braccia*<sup>418</sup> « en répétant plusieurs fois l'expérience »<sup>419</sup>. Les résultats « ... des expériences répétées montrent qu'il met cinq secondes pour descendre de cent *braccia*. »<sup>420</sup> Si l'on insiste autant ici au terme *expérience* utilisée plusieurs fois par Galilée, sous prétexte qu'elle fait partie importante de sa méthodologie, c'est pour souligner que Galilée ne donne aucune information sur la manière dont cette expérience a été réalisée. L'expérience en question n'a en fait très probablement jamais eu lieu, ou elle n'était pas une « vraie » expérience, comme le Père Marin Mersenne l'a bien remarqué et comme nous le verrons par la suite. Il est très probable que Galilée a répété plusieurs fois les expériences avec les plans inclinés qui l'ont conduit à extrapoler les 100 *braccia* en 5 secondes sans avoir à faire cette expérience particulière.

C'est le résultat utilisé par Newton dans le Vellum Manuscript étudié plus haut lors du premier calcul. Il est nécessaire d'ouvrir une petite parenthèse pour présenter une brève remarque sur la traduction anglaise du texte. Dans la traduction du *Dialogue* par

---

<sup>415</sup> Galilei G. ([1638] 1995), *Discours concernant deux sciences nouvelles*, introduction, traduction, notes et index par Maurice Clavelin, Paris : PUF, 140.

« Si un mobile, partant du repos, tombe avec un mouvement uniformément accéléré, les espaces parcourus en des temps quelconques par ce même mobile sont entre eux en raison double des temps, c'est-à-dire comme les carrés de ces mêmes temps. »

<sup>416</sup> Galilei G. ([1632] 1992), 235.

<sup>417</sup> Ibid.

<sup>418</sup> On utilise dans cette thèse *braccia* comme le pluriel de *braccio*, et on le corrige dans les traductions des textes qui l'on conservé au singulier.

<sup>419</sup> Galilei G. ([1632] 1992), 235.

<sup>420</sup> Ibid., 236.

Thomas Salusbury, que Newton avait à sa disposition, le traducteur fait le choix d'utiliser des unités de mesures anglaises conservant les mêmes nombres, c'est-à-dire pour le poids du boulet en question et Salusbury à la place de cent livres écrit cent « pounds ». De même, pour la hauteur de la chute à la place de cent *braccia* furent notés cent « yards »<sup>421</sup>. Il fait le choix de ne pas faire une conversion directe pour conserver la forme de la présentation de Galilée à l'identique. Il note dans la marge gauche de la page 200:

« À noter que ces Calculs sont faits en poids et mesures *Italiens*. Et 100 pounds *Haverdupoise* font 131 *l. Florentines*. Et 100 yards Anglaises font  $150 \frac{2}{5}$  Brasses *Florent*. de sorte que la brasse ou le yard de notre *Auteur* soit le  $\frac{3}{4}$  de notre yard. »<sup>422</sup>

Fermons la parenthèse et reprenons l'argumentation galiléenne. Galilée dans son *Dialogue* après avoir déterminé le poids et la hauteur de la chute, donne directement le résultat de la mesure du temps lors de la chute libre : celui de 5 secondes. Combinant le résultat expérimental et la proportion géométriquement démontrée par l'Académicien, entre temps et espace, Galilée poursuit son calcul.

« SALVIATI : (...) je viens de le dire, les espaces parcourus par un corps qui tombe croissent en proportion doublée, autrement dit selon les carrés des temps, et une minute vaut douze fois cinq secondes : si nous multiplions les cent *braccia* par le carré de 12, soit 144, nous obtenons 14400, nombre des *braccia*, que ce mobile parcourrait en une minute ; selon la même règle, sachant qu'une heure contient 60 minutes, multiplions 14400, nombre des *braccia* parcourus en une minute, par le carré de 60, soit 3600 : on obtient 51840000 comme nombre des *braccia* parcourus en une heure, soit 17280 milles<sup>423</sup>. Si nous voulons savoir la distance qui serait parcourue en 4 heures, nous

---

<sup>421</sup> Galilei G. (1661), *Dialogues on two world systems*, traduction par Salusbury Th., London: Printed by William Leybourn, 199-200.

<sup>422</sup> Ibid., 200.pers. : « Note that these Calculations are made in *Italian* weights and measures. And 100 pounds *Haverdupoise* make 131 *l. Florentine*. And 100 English yards makes  $150 \frac{2}{5}$  Braces *Florent*. so that the brace or yard of our *Author* is  $\frac{3}{4}$  of our yard. »

<sup>423</sup> La conversion donnée par Salsbury dans sa traduction concernant les milles italiens est « The *Italian* mile is  $\frac{1000}{1056}$  of our mile. »



multiplierons 17280 par 16, carré de 4 : on obtient 276480 milles ; ce nombre est bien plus grand que la distance de 196000 milles qui sépare la concavité de la Lune du centre de la Terre, si du moins, avec l'auteur moderne, on retient pour cette distance 56 rayons terrestres, ce rayon étant de 3500 de 3000 *braccia* chacun (il s'agit là de nos milles italiens). Signor Simplicio, votre calculateur disait qu'il fallait plus de six jours pour parcourir la distance de la concavité de la Lune au centre de la Terre ; or, quand on fait le calcul d'après l'expérience et pas en comptant sur les doigts, elle serait parcourue, vous le voyez, en bien moins de 4 heures, 3 heures 22 minutes et 4 secondes, si on fait un calcul exact.<sup>424</sup> »

Le résultat calculatoire, très différent de celui de Locher, est fondé sur la proportion découverte par Galilée entre le temps et l'espace. Mais qu'en est-il de la vitesse ? Quelle est la vitesse finale de la boule lors de son arrivée au centre de la Terre ? Salviati nous dit que « le degré de vitesse acquis par le boulet dans sa chute depuis la concavité jusqu'au centre sera bien supérieur au double de la vitesse du mouvement diurne dans la concavité lunaire. »<sup>425</sup> Galilée pour supporter cette thèse, se réfère ici à une démonstration géométrique encore une fois faite par lui-même qui deviendra plus tard le Théorème I, Proposition I de la troisième Journée des *Discours concernant deux sciences nouvelles*.<sup>426</sup>

Ce théorème pour nous ici est crucial et même si nous l'avons déjà utilisé au sujet du temps comme paramètre dans l'œuvre Galiléenne, nous allons le reprendre une deuxième fois sous un prisme différent cette fois-ci. Lors de l'étude de la création de la théorie newtonienne de la gravitation universelle, nous sommes arrivés à la conclusion que le temps et sa détermination jouent un rôle important dans la mise en rapport entre deux mouvements, le mouvement circulaire uniforme et le mouvement rectiligne

---

<sup>424</sup> Galileo G. ([1632] 1992), 236-237. Galilée par la suite expose en détail ce qu'il appelle « un calcul exact » : « SALVIATI : (...) Une expérience faite avec soin permet d'observer, je l'ai dit, que ce mobile met cinq secondes pour tomber de 100 braccia ; on demande donc : si 100 braccia sont parcourues en 5 secondes, en combien de secondes 588 000 000 (c'est la valeur de 56 rayons terrestres) seront-elles parcourues ? Voici la règle à suivre pour cette opération : on multiplie le troisième nombre par le carré du second, ce qui donne 14 700 000 000 ; on divise ce résultat par le premier nombre, soit 100, et la racine carré du quotient, soit 12 124 secondes, c'est 3 heures 22 minutes et 4 secondes. »

<sup>425</sup> Ibid., 238.

<sup>426</sup> Galileo G. ([1638] 1995), 139.

uniformément accéléré. Dans ce théorème on trouve la première mise en rapport entre ces deux mouvements. La notion de force newtonienne est absente ici, les notions de vitesse et de temps ne sont peut être pas les mêmes que celles de Newton non plus, (car la notion de vitesse ou de temps instantanés n'existent pas chez Galilée comme on l'a discuté dans le Chapitre II de cette thèse ; on ne peut parler que de degrés de vitesse, et des instants comme limites externes du temps). Mais la première démonstration géométrique de cette relation est mise en place, lors de la détermination du rapport entre le temps et la vitesse. Reprenons l'énoncé de ce théorème : « Le temps pendant lequel un espace donné est franchi par un mobile, partant du repos, avec un mouvement uniformément accéléré, est égal au temps pendant lequel le même espace serait franchi par le même mobile avec un mouvement uniforme, dont le degré de vitesse serait la moitié du plus grand et dernier degré de vitesse atteint au cours du précédent mouvement uniformément accéléré. »<sup>427</sup> Le mouvement uniforme considéré ici par Galilée n'est pas un mouvement circulaire mais un mouvement rectiligne. L'espace parcouru est prédéterminé  $CD$ , le temps nécessaire pour qu'un corps en chute libre puisse parcourir cette distance est représenté par un segment  $AB$ , « le dernier degré de vitesse accrue dans les instants du temps  $AB$  »<sup>428</sup>, ce qu'on appelle aujourd'hui la vitesse finale de la chute, est représenté par la ligne  $EB$  en sorte de pouvoir construire un triangle  $ABE$ . « (...) toutes les lignes parallèles à  $BE$ , tirées des différents points de la ligne  $AB$ , représenteront les degrés de vitesse croissants après l'instant initial  $A$  »<sup>429</sup>, ici Galilée a tracé 7 lignes parallèles de sorte de diviser le triangle en 8 parties. « 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  $AEB$ . »<sup>430</sup>

---

<sup>427</sup> Ibid.

<sup>428</sup> Ibid.

<sup>429</sup> Ibid., 140.

<sup>430</sup> Ibid.

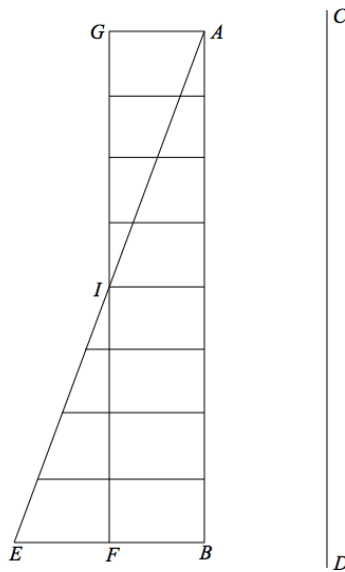


Fig. 5.2. D'après le schéma figurant dans la traduction française des *Discours*.<sup>431</sup>

Galilée a construit un parallélogramme pour représenter le mouvement uniforme, qui inclut des degrés de vitesse égaux entre eux, et un triangle pour représenter les degrés de vitesses croissants du repos jusqu'à la fin de la chute. Ces deux figures partagent un côté commun, le temps total  $AB$  dépensé pour parcourir l'espace  $CD$ . Dans un même temps pour une même distance, la même quantité « de moments de vitesse » sera utilisée dans les deux cas, celui d'un mouvement uniforme et celui d'un mouvement uniformément accéléré. Car les moments de vitesse inclus dans le triangle sont égaux à ceux dans le parallélogramme. Les triangles  $GIA$  et  $IEF$  sont égaux, et le trapèze  $AIFB$  est commun aux deux figures. « Il est donc manifeste que des distances égales seront parcourues en un même temps par deux mobiles dont l'un, partant du repos, se meut d'un mouvement uniformément accéléré, et l'autre d'un mouvement uniforme que caractérise un moment de vitesse égal à la moitié du plus grand moment de vitesse atteint par le premier. »<sup>432</sup> C'est de cette manière que Galilée fait un premier lien entre les deux mouvements de genre différent. Galilée a établi un rapport d'égalité entre les deux mouvements et a démontré le rapport des vitesses dans ce cas. Pour un temps donné, la même distance sera parcourue par un corps grave, si la vitesse du mouvement uniforme est égale à la moitié de la vitesse finale du mouvement uniformément accéléré. Une démonstration de cette relation purement géométrique.

<sup>431</sup> Ibid.

<sup>432</sup> Ibid.

L'argumentation du *Dialogue*, consiste au fait qu'en ayant un résultat fiable d'observation soignée nous pouvons suivant la certitude qui nous est offerte par les démonstrations géométriques construire une méthodologie certaine pour l'étude des phénomènes naturels. Ce qui reste paradoxal c'est que l'expérience en question ne semble pas avoir été effectuée par Galilée. Le dit résultat du temps de chute d'une hauteur prédéterminée semble avoir été choisi par simple extrapolation d'une valeur éventuellement arrondie. Ce résultat a eu un impact majeur non seulement sur les contemporains de Galilée mais aussi sur la génération des savants qui vont suivre jusqu'à Newton. Ce résultat a mobilisé les esprits critiques et a inspiré les esprits enthousiastes.

## 2. La critique du Père Marin Mersenne.

Le résultat calculé par Galilée du temps de la chute libre d'un corps depuis la Lune était critiqué et revu par P. Marin (deux ans après la publication des *Dialogues*) dans son *Traité des mouvemens*.<sup>433</sup> La Proposition III de ce Traité est exclusivement dédiée à l'étude du résultat galiléen, intitulé *Examiner l'expérience des chutes dont parle Galilée dans ses Dialogues du mouvement de la terre*.

« Le Sieur Galilée dit dans la 219. Page de ses Dialogues, qu'il a experimenté qu'une boule tombe de cent brasses de haut dans le temps de cinq secondes, ce qui seroit veritable, suivant mes experiences, si la brasse, dont il a usé, avoit 3. pieds de long, mais s'il s'est servi de la brasse de Florence, qui n'a que demie aulne de Paris, c'est à dire qui n'a qu'un pied, & dix poulces ou environ, son experience n'est pas vraye, car encore que chaque brasse eust 2. piedz de Roy, il s'ensuivroit que la boule serroit seulement tombée de 200. pieds dans 5'', au lieu qu'elle tombe de 300. pieds. »<sup>434</sup>

---

<sup>433</sup> P. Mersenne M. (1634), *Traité des Mouvements, et de la chute des corps pesans, & et de la proportion de leurs différentes vitesses. Dans laquelle l'on verra plusieurs expériences très exactes.*, Paris : Chez Jacques Villery, avec le privilege du Roy.

<sup>434</sup> P. Mersenne M. (1634), 12-13. Mersenne corrigerait donc Galilée d'un facteur 1,5. Ce qui donnerait une accélération de  $8,2\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

Pour la validation du résultat annoncé par Galilée, le Minime recourt aux expériences, croyant que le résultat de Galilée est un fruit expérimental. Pour le Minime, il ne s'agit pas de mettre en question le cadre théorique dans lequel Galilée a présenté ce résultat, ni même la méthodologie suivie par l'auteur, mais seulement de comparer un résultat expérimental à un autre. Cela n'empêche en rien au Minime d'exercer une critique générale envers tous ceux qui n'embrassent pas les méthodes expérimentales. Dans le même traité dans la Proposition I, il déclare son étonnement général auprès des Philosophes qui ont eu tant de mal à « déterminer la proportion qu'observent les corps pesans en descendant, attendu qu'il estoit assez aisé de consulter l'expérience ; »<sup>435</sup>. La notion d'expérience ici semble se rapprocher plus d'une observation soignée que d'un résultat précis. L'objectif de cette expérience présentée par le Minime ne semble pas être celui d'une détermination précise, mais celle d'une proportion, de la mise en forme géométrique du phénomène, de la mise en rapport des grandeurs. Il s'agit de la mise en place d'une expérience dont le fruit serait d'une précision disons suffisante, pour l'établissement du rapport entre le temps et l'espace. Il considère une balle de plomb qui tombe de 147 pieds de hauteur en trois secondes & demie, de 108 pieds en trois secondes, & de 48 pieds en 2 secondes. Le Minime a beau nous annoncer les résultats de ses expériences de chute libre, toute information relative à l'instrument de mesure du temps utilisé dans ces expériences est absente dans ce traité. Mais les 3 hauteurs de chute mentionnées par Mersenne conduisent rigoureusement à la même valeur. Il a dû obtenir une valeur expérimentalement, celle pour 108 pieds par exemple, puis a extrapolé pour une hauteur plus grande et pour une hauteur plus petite. Une année plus tard, le 15 Janvier 1635, le Minime reprend cette critique dans sa correspondance avec Nicolas Fabri de Peiresc, grand défenseur de Galilée, où il présente son calcul comparé à celui de Galilée, toujours étonné du résultat qu'il trouve<sup>436</sup> :

« (...) je veux vous tesmoigner par la presente le soin que j'ay de vous faire passer le temps en des considerations, qui ne seront pas à mon avis indignes de vostre esprit et que vous pourrez communiquer à M<sup>r</sup> Galilée, si vous le jugez à propos, affin qu'il n'ayt pas la peine de faire le calcul de ses experiences, lequel je vous envoye tres fidelle et tres exact.

---

<sup>435</sup> Ibid., 1.

<sup>436</sup> P. Mersenne M. (1959), « Lettre No. 404, Mersenne à Paris, à Nicolas Fabri de Peiresc, à Aix, 15 Janvier 1635 », in *Correspondance*, De Waard C. (eds), Paris : CNRS, Tome V, 24-26.

Or il suppose que le boulet tombe cent brasses dans 5'', d'où il s'ensuit qu'il ne tombera que 4 brasses dans une seconde, quoyque je sois assuré qu'il tombe de plus haut. Mais le respect que je porte à ce grand homme m'a fait déterminer en vostre faveur de supputer tous les plus grands intervalles du monde suivant son experience, affin que je recompense en quelque façon la peine que vous avez pris de m'envoyer la grandeur de la brasse de Florence, que j'avois toujours supposee moindre d'un pouce et demi, suivant la relation de nos marchands et du nepveu ou cousin du Sr Galilee qui demeure à Lion. »<sup>437</sup>

Dans la suite de cette lettre le Minime calcule la chute d'un boulet de la surface de la Terre à son centre, une distance considérée de 17181818 pieds de Roi en 25 minutes 30 secondes et 42 tiers de la seconde, puis la chute d'un boulet de l'orbite de la Lune vers la Terre, la distance Lune-centre de la Terre considérée comme 56 rayons terrestres en « 3 heures, 10'54''36''' peu moins et jusques à sa surface 3 heures, 9'11''51'''53'''' et conséquemment elle tomberoit de la surface jusques au centre dans 1'42''44'''7'''' ». <sup>438</sup> Il calcule même la chute d'un boulet du Soleil vers le centre de la Terre et même du firmament vers le centre de la Terre. Le résultat de Mersenne, de chute libre d'un corps de l'orbite lunaire jusqu'au centre de la Terre, n'est pas si lointain du résultat galiléen, la différence étant de l'ordre de la minute. Le Minime semble avoir adopté d'emblée la valeur de Galilée et non la sienne, déjà pour la chute au centre de la Terre, sinon il aurait trouvé 19 minutes au lieu de 25. Mersenne annonce que le temps de chute doit correspondre à un temps équivalent de moins de quatre heures, en 3 heures 22 minutes et 4 secondes. On voit ainsi qu'il n'entre même pas dans la critique de la contre argumentation de Galilée envers Locher. Le Minime est un tel admirateur de Galilée qu'il ne peut pas croire que Galilée puisse se tromper. Sa première hypothèse, sur la différence de résultat d'expérience de chute à Florence et à Paris, porte sur le fait que Mersenne ne connaît pas bien la conversion de brasses florentines en pieds de Paris. Il a ainsi pris soin de s'informer auprès des différents marchands qui utilisent couramment cette conversion pour leur métier, et d'un personnage proche de l'entourage de Galilée,

---

<sup>437</sup> Ibid., 24-25.

<sup>438</sup> Ibid., 25.

Roberto Galilei<sup>439</sup>, neveu ou cousin de Galilée qui demeurait à Lyon. Même si la valeur de la brasse prise en compte par le Minime était plus petite que celle utilisée par Galilée, il savait très bien que le résultat d'expérience de chute donné par Galilée n'était pas le bon<sup>440</sup>.

Cette critique est reprise dans l'ouvrage majeur du Minime *Harmonie Universelle* publié aux environs de 1636-37. Dans la première Proposition du Second Livre le Minime tente d' « Expliquer la vitesse dont les pierres & les autres corps tombent vers le centre de la terre »<sup>441</sup>. Dans un premier temps il pose le cadre dans lequel Galilée a annoncé son résultat et sa querelle avec Scheiner et il reprend le calcul galiléen qui repose sur le rapport établi entre le temps et l'espace lors des expériences sur les plans inclinés. Ayant trouvé la bonne conversion des brasses florentines il nous dit que « les cent brasses de Galilée font  $166\frac{2}{3}$  de nos pieds<sup>442</sup> : mais nos experiences repetees plus de 50 fois, jointes à la raison doublee, nous contraignent de dire que le boulet fait 300 pieds en 5'', c'est à dire 180 brasses, ou quasi deux fois davantage qu'il ne met : de sorte qu'il doit faire les cent brasses, ou 166 pieds  $\frac{2}{3}$  en  $3''\frac{18}{25}$ , qui font 3'', 43''', 20''''', et non pas 5'' : car nous avons esprouvé tres exactement qu'un globe de plomb pesant environ demie livre, & que ce luy de bois pesant environ une once tombent de 48 pieds en 2'', de 108 en 3'' ; & de 147 pieds en  $3''\frac{1}{2}$  : or les 147 pieds reviennent à  $88\frac{2}{5}$  brasses ; & s'il se trouve du mesconte, il vient plustost de ce que nous donnons trop peu d'espace ausdits temps, qu'au contraire, car ayant laissé cheoir le poids de no pieds, il est justement tombé en 3'' : mais nous prenons 108 pour regler la proportion : & les hommes ne peuvent observer la difference du temps auquel tombe de 110, ou de 108 pieds. Quant à la hauteur de 147 pieds, il s'en falloit un demi-pied ; ce qui rend la raison doublee tres-juste, dautant que le poids doit faire 3 pieds en une demie seconde, suivant cette vistesse, 12 pieds dans une seconde minute ; & consequemment 27 pieds en  $1''\frac{1}{2}$ , 48

---

<sup>439</sup> P. Mersenne M. (1959), Tome V, 25, Note 3. « Roberto Galilei, né à Florence le 30 Novembre 1595. Envoyé par son oncle, le banquier Ottavio, à Lyon, il y obtint en 1621 la qualité de bourgeois. »

<sup>440</sup> P. Mersenne M. (1634), Proposition III, 12-13.

<sup>441</sup> P. Mersenne M. (1636-37), *Harmonie Universelle, contenant la théorie et la pratique de la musique*, Paris : S. Cramoisy, 85.

<sup>442</sup> 1 pied avant 1668 est égal à environ 0,326592m, 1 *braccio* florentin est ainsi égal à environ 0,54m.

pieds en 2'', 75 en 2'' &  $\frac{1}{2}$  : 108 pieds en 3'', 147 pieds en 3'' &  $\frac{1}{2}$  : ce qui revient fort bien à nos experiences, suivant lesquelles il tombera 192 pieds en 4'', & 300 en 5'', pendant lequel Galilée ne met que 166 pieds ou 100 brasses, selon lesquels il doit faire une brasse et une demieseconde, 4 en 1'', qui font pres de 6 pieds  $\frac{2}{3}$  au lieu de 12 que le poids descend en effet. »<sup>443</sup>

Cette fois-ci Mersenne effectue des observations et il trouve un résultat différent de celui de Galilée. L'unité du temps des observations est la demi seconde. Il présente ses résultats dans un tableau, ce qui lui permet de les comparer directement avec le résultat galiléen et il conclut que le résultat en question n'est pas un résultat d'observation soignée.

A (le temps en demi-secondes)	B (espace réduits en pieds pour le temps de l'expérience effectuée par Mersenne)	C (espace en pieds suivant le résultat galiléen)	D (l'espace en C converti en brasses)
2	12	$6 \frac{2}{3}$	4
3	27	15	9
4	48	$26 \frac{2}{3}$	16
5	75	$41 \frac{2}{3}$	25
6	108	60	36
7	147	$81 \frac{2}{3}$	49
8	192	$106 \frac{2}{3}$	64
10	300	$166 \frac{2}{3}$	100

Pour réaliser ces observations Mersenne a sûrement utilisé un instrument de mesure du temps. Mersenne fait allusion ici à un pendule à secondes (T=1sec). L'idée de cet

<sup>443</sup> Ibid., 87.



instrument est présentée plus loin dans cet ouvrage dans la Proposition XV<sup>444</sup>. Dans cette Proposition Mersenne explique comment on peut fabriquer une Horloge en moins d'un quart d'heure et sans avoir besoin de rien de plus qu'une ficelle de 3 pieds et demi de longueur et d'un poids attaché au bout de celle-ci. Cette Horloge, ou comme l'appelle Mersenne le pendule simple, marque les secondes ( $T = 2\text{sec}$ ). Mais elle n'est pas pour autant une Horloge dont on peut garantir un mouvement perpétuel (dans le vide peut-être nous dit l'auteur), car elle est ralentie continuellement par la résistance de l'air. Il ne s'agit pas ici d'une Horloge à proprement parler, mais de l'usage du pendule à secondes comme chronomètre qui peut surtout servir aux observations célestes (p.e. aux éclipses solaires ou lunaires). Pour ce faire nous dit le Minime, il faut deux personnes, une qui sera concentrée sur l'observation astronomique et l'autre qui comptera les va et vient du pendule. L'auteur n'a pas seulement déterminé la longueur du pendule à secondes mais il a réalisé un tableau qui donne les correspondances entre l'unité que l'on souhaite que notre pendule marque (par exemple 2 secondes) et la longueur du fil correspondant (14 pieds). L'idée de l'usage du pendule simple comme chronomètre pour les observations célestes est exprimée par Galilée environ à la même période, en 1637 comme on le verra par la suite.

Les observations de Mersenne présentées plus haut démontrent que le résultat galiléen n'était pas le fruit d'une expérience. Galilée n'a pas mesuré le temps d'une chute libre à l'aide d'un instrument précis de la mesure du temps. Dans le *Dialogue* il présente néanmoins son résultat comme le résultat d'une expérience très précise. La question des observations ou expériences galiléennes, a été longuement traitée par l'historiographie. Elles sont traitées soit en tant qu'expériences réelles soit en tant qu'expériences dites de pensée. Dans notre cas nous avons des difficultés à choisir l'une des deux catégories d'expérience, car sa réalité est réfutée par les expériences de ses contemporains et elle n'est pas une expérience de pensée à proprement parler. Galilée ici n'est pas en train d'imaginer une expérience infaisable en pratique afin de pouvoir établir une proportion ou une description géométrique d'un phénomène ; comme par exemple avec l'expérience de la chute de corps de poids différents dans le vide qui tomberaient en même temps. Il n'est pas en train d'établir une vérité géométrique. Il utilise une proportion déjà établie, et il extrapole sa vérité vers une expérience qu'il n'a jamais été

---

<sup>444</sup> Ibid., 135.

réalisée. Nous allons nous interroger sur la question de la notion d'expérience, et sur ce que ce cas précis dévoile de cette notion.

Il n'est pas question ici visiblement pour Galilée d'une mesure précise du temps d'une chute libre pour une distance donnée. C'est une extrapolation de la mise en rapport entre le temps et l'espace lors de ses expériences avec les plans inclinés. Son objectif n'est pas la grande précision dans les mesures. Son propos est purement géométrique. S'il insiste autant sur la pratique des expériences comme partie essentielle d'une méthodologie qui permettra une meilleure appréhension des phénomènes naturels, ce n'est pas parce qu'il essaye de déterminer un résultat chiffrable précis, mais parce qu'il suit le raisonnement que le rapport temps-espace lui dicte. La seule expérience réalisée ici est celle des plans inclinés, et celle-ci doit être vue sous le prisme d'une observation suffisante pour l'établissement des rapports et la mise en forme géométrique du phénomène de la chute libre. C'est un appel aux philosophes qui essayent de comprendre la création divine sans soulever les têtes des livres, sans observer. Ce n'est pas pour rien que Galilée pense à plusieurs reprises dans son dialogue qu'Aristote serait d'accord avec lui et non pas avec les Aristotéliens, car Aristote pour Galilée était un observateur des phénomènes qui l'entourent. Non pas un expérimentateur, mais un observateur. Ce comportement vis à vis de l'expérience de la mesure du temps d'une chute par le pendule n'est pas un choix par défaut de la part de Galilée. L'Académicien est capable de mesurer le temps avec une précision de l'ordre de  $\frac{1}{6}$  ou plus de la seconde par un pendule qui bâtit cette subdivision de la seconde, en étalonnant sa longueur par rapport au jour sidéral, comme on le verra par la suite. Mais il fait le choix de ne pas le faire. En tout cas pas pour établir sa théorie, ni pour argumenter contre un adversaire. Ces armes sont de l'ordre de la démonstration géométrique et de l'expérience, quelle soit réelle ou de pensée, au service de la description géométrique. Elle n'a pas d'existence par elle-même dans un objectif qui lui est propre. Elle n'a nullement le statut d'une argumentation fiable pour la validation ou la non validation d'une théorie. Ce statut est réservé à la démonstration géométrique. Le choix de la non précision de la mesure du temps démontre que l'idée de la vérité de la création du monde ne relève pas de l'expérience mais de la géométrie. Il y a que la géométrie qui contienne une vérité. L'expérience est de l'ordre du réel qui n'a pas une correspondance directe avec la vérité

mais elle est un outil qui permet une représentation géométrique, le seul accès à la vérité divine.

Tout ceci concernant l'aspect théorique de l'œuvre galiléenne, car ce grand homme est loin d'être ignorant des aspects pratiques d'une grande précision dans les mesures et surtout celle du temps. Voyons ci-dessous comment ce résultat du temps de chute libre en 5 secondes a inspiré un autre contemporain de Galilée et les aspects pratiques de la précision dans la mesure du temps qui émergent dans leur correspondance.

### 3. La correspondance avec Baliani.

Jean Batiste Baliani (1582-1666)<sup>445</sup>, patricien, fils de Sénateur, de formation juridique, doté d'un grand intérêt scientifique, rencontre Filippo Salviati, grand ami de Galilée, lors du voyage de ce dernier à Gênes en 1613. Le 27 Décembre de la même année Salviati écrit une lettre à Galilée au sujet de cette rencontre :

« J'ai trouvé ici un philosophe à notre usage, un gentilhomme très distingué qui se nomme Jean-Baptiste Baliani. Il philosophe sur la nature, se rit d'Aristote et de tous les aristotéliens. C'est un bon géomètre, et il m'a dit qu'il allait à Venise exprès pour vous voir. Il se moque de ce qui a été contre votre petit livre. (...) Et c'est le meilleur homme que j'aie jamais rencontré, mais il est un peu de son opinion, au reste très distingué et pour vous plaire, et il ne désire rien d'autre qu'une conversation de philosophes libres. »<sup>446</sup>

Dix-sept jours plus tard, Salviati écrit une deuxième lettre à Galilée pour l'inciter à commencer une correspondance avec Baliani. Peu de temps après Galilée écrit à Baliani. Commence ainsi une correspondance d'une fréquence faible mais qui durera vingt-cinq ans. La partie de cette correspondance qui nous intéresse est celle qui correspond à ce

---

<sup>445</sup> Baliani, G. B. (2008), « *Complete Dictionary of Scientific Biography* », rédigé par Drake St., Charles Scribner's Sons, vol. 1, 424-425. *Gale Virtual Reference Library*, & Baliani, Giovanni Battista, The Galileo Project, rédigé par Westfall R.S., Department of History and Philosophy of Science, Indiana University (<http://galileo.rice.edu/Catalog/NewFiles/baliani.html>)

<sup>446</sup> Galilei G. (1901), *Le Opere di Galileo Galilei*, Firenze : G. Barbera, Vol. 11. 610. Traduction de Moscovici S. (1967), *L'expérience du mouvement*, Paris : Hermann, 11.

que Serge Moscovici appelle les « Lettres sur quelques problèmes d'épistémologie scientifique. »<sup>447</sup>. Le sujet traité principalement dans cet ensemble de lettres est la mesure du temps.

Le 23 Avril 1632, à la réception de l'ouvrage de Galilée, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Baliani se précipite pour lui écrire. Après l'avoir félicité pour son texte, Baliani lui pose une question concernant la chute des graves. À la vue du résultat annoncé par Galilée, la distance de 100 *braccia* parcourue par un corps grave en 5 secondes de temps, Baliani essaye de son côté d'établir les expériences qui lui permettront de confirmer lui-même ce résultat. Dans cette lettre il demande une grande faveur à Galilée, partager avec lui l'expérience qui a donné ce résultat<sup>448</sup>. Baliani affirme avoir essayé plusieurs fois d'établir une expérience fiable avec une balle attachée à un fil de longueur assez grande mais il n'arrive toujours pas à déterminer cette longueur avec précision. Il a réussi toutefois à déterminer la distance parcourue par un corps grave en chute libre dans une seconde qui est de 4 *braccia* (ce qui revient à la valeur donnée par Galilée). Mais il reste sceptique sur son résultat, car il considère son expérience non fiable à cause du manque de tour de hauteur suffisante pour cette expérience.

---

<sup>447</sup> Moscovici S. (1967), 140-148.

<sup>448</sup> Galileo G. (1904), *Le Opere di Galileo Galilei*, Vol. 14, 342-344 :

« (...) Io riceverei a gran favore che V.S. mi desse conto del modo con che ha ritrovato che il grave scende per cento braccia in cinque secondi. Altre volte io tentai l'impresa per mezzo di una palla attaccata ad una funicella tanto longa, che le sue vibrationi durassero un secondo per aponto, né mi è sin hora riuscito ritrovar qual sia la longhezza precisa della fune. Mi manca poi la torre si alta. Abbiamo quella del porto della lanterna: però ha un risalto nel mezzo, che rende l'operatione difficile. So che nel primo secondo ha da scender quattro braccia; ma non credo l'esperienza asser sicura, se non vien fatta in maggior altezza.

Di questo orologio che misurasse i secondi, io mi do ad intendere che me ne servirei a più usi : e in misurar le grandi distanze per mezzo della differenza del tempo che è fra la vista e l'udito, se pur è vero, come io credo, che tal differenza sia proportionata alle distanze, onde facendo sparar un'artigleria lontano circa 30 miglia, pur che io possa venderne il fuoco e sentirne il tuono, dalla lor differenza verrei in cognitione della distanza precisamente; e in ritrovar i gradi della longitudine mediante il moto della luna, ancorchè non vi sia eclisse, atteso che con un oriole così esatto si ritroverebbe precisamente la differenza della distanza dalla luna a qualche stella e dall'un meridiano all'altro, calculandovi però l'anomalia di essa luna ; e molte cose simili. Che perciò io la priego a dirmi il modo di misurar i secondi e come ha fatto l'esperienza delle cento braccia, e scusarmi se io la tedio troppo, ringraziandola de'favori che per rispetto (...) »

« J'estimerai une grande faveur que vous me rendiez compte de la manière dont vous avez trouvé que le grave descend cent brasses en cinq secondes. Autrefois, j'ai essayé au moyen d'une balle attachée à une si longue ficelle que ses vibrations duraient une seconde exactement, mais je n'ai jamais réussi à trouver quelle était la longueur précise de la corde. Il me manque une tour assez haute. Nous avons celle de la Lanterne, mais elle a une saillie au milieu qui rend l'opération difficile. Je sais que, dans la première seconde, elle doit descendre quatre brasses, mais je ne crois pas que l'expérience soit sûre, si elle n'est pas faite d'une meilleure hauteur. »<sup>449</sup>

Une remarque soulevée à ce sujet par Serge Moscovici<sup>450</sup> mérite d'être discutée. Moscovici s'interroge sur le manque, exprimé par Baliani, d'une tour suffisamment haute pour considérer son résultat comme « sûr ». Moscovici présente plusieurs explications possibles de cette phrase de Baliani. Selon lui, entre autres, cette phrase exprime l'inquiétude portée par son auteur sur la question des conditions favorables afin qu'on puisse se référer à son résultat avec certitude. Comment faire pour savoir si l'expérience nous apporte des résultats fiables ? Une autre raison pourrait être le fait que Baliani prenait en compte dans ses expériences la résistance de l'air. « Mettant en rapport l'espace et le temps, Baliani ignorait la valeur de l'accélération gravitationnelle, mais non l'importance de la résistance. Si la tour était trop basse, les comparaisons auxquelles il voulait procéder ne pouvaient pas avoir lieu. »<sup>451</sup>

Une autre raison très plausible peut être, selon Moscovici, le fait que pour pouvoir déterminer avec certitude les relations entre l'espace et le temps il faudrait pouvoir comparer plusieurs chutes de hauteurs différentes. Ou bien c'était juste une manière d'entraîner Galilée à dévoiler son protocole d'expérience. La dernière hypothèse semble être la bonne, mais quoi qu'il en soit, cette lettre témoigne de l'intérêt intense que Baliani portait au résultat annoncé par Galilée, ou autrement dit à la question de la détermination précise de la longueur du pendule qui bat la seconde. Il explique par la suite les raisons pour lesquelles ce résultat lui est si cher. Une horloge de ce genre lui serait très utile pour la détermination précise des distances, et plus particulièrement pour la détermination des longitudes :

---

<sup>449</sup> Traduction de Moscovici S. (1967), 43.

<sup>450</sup> Ibid., 43-44. Note de bas de page No14.

<sup>451</sup> Ibid., 44. Cette hypothèse de Moscovici semble étrange puisqu'on sait que plus la tour sera haute, plus la résistance de l'air jouera en défaveur.

« De même que cette horloge qui mesurerait les secondes, je crois que je m'en servirais pour d'autres usages, et à mesurer les grandes distances au moyen de la différence de temps qu'il y a entre le voir et l'ouïr, s'il est vrai, comme je le crois, qu'une telle différence est proportionnelle à la distance ; donc, en faisant décharger un canon éloigné de trente milles environ, de façon à pouvoir en voir le feu et à en ouïr le son, d'après leur différence on pourrait connaître précisément la distance ; et aussi à trouver les degrés de longitude au moyen du mouvement de la lune, même s'il n'y avait pas d'éclipse, attendu qu'avec une horloge aussi exacte on saurait précisément la différence des distances de la lune à quelque étoile, et d'un méridien à l'autre, en calculant aussi l'anomalie de cette lune : et de nombreuses choses semblables. Pour cela, je vous prie de me dire la façon de mesurer les secondes, et comment vous avez fait l'expérience de cent brasses. »<sup>452</sup>

L'appréhension des applications diverses d'une horloge à seconde présentée ici par Baliani est admirable : la détermination précise des distances, des degrés de longitudes sans avoir besoin des tables d'éclipses lunaires et même le calcul des anomalies du mouvement lunaire ! Galilée n'a pas répondu à cette lettre, du moins pas dans l'immédiat. L'idée de Baliani de faire usage d'une telle horloge pour la détermination des longitudes ne fait pas partie des idées présentées par Galilée lors de ses négociations avec l'Espagne<sup>453</sup>. Lors de ces négociations, Galilée met en avant une horloge céleste, le mouvement des satellites de Jupiter. La première fois que Galilée présente cette idée pour résoudre le problème des longitudes est mentionnée en 1635 dans sa correspondance. On la trouve élaborée très tardivement, en 1637 lors de ces négociations avec les Etats Généraux de Hollande où il décrit son *mesureur de temps*. La même année on trouve la description d'un pendule comme instrument précis de la mesure du temps au service de l'astronomie dans son traité *Operations Astronomiques*. L'intention de l'auteur de parler d'instruments simples et précis utilisés pour les opérations astronomiques figure dans le paragraphe introductif. Il souligne qu'il est possible d'effectuer des observations aussi précises que celles de Tycho Brahé sans utiliser des instruments de prix excessif.

---

<sup>452</sup> Ibid.

<sup>453</sup> Les négociations de Galilée avec l'Espagne ne seront pas discutées dans cette thèse. Par contre celles avec les États Généraux d'Hollande au sujet de la détermination des longitudes seront traitées dans la partie 5 de ce Chapitre.

La première partie de ce traité est dédiée quasi intégralement au pendule comme instrument précis pour la mesure du temps<sup>454</sup>. Galilée présente le pendule en question comme un instrument capable de donner l'heure et ses plus petites fractions avec précision. Il présente par la suite la manière de fabriquer et de perfectionner cet instrument en détail.<sup>455</sup> Galilée pour souligner la précision du pendule, commence par affirmer qu'un pendule de toute taille est susceptible de marquer une subdivision

---

<sup>454</sup> Galilei G. (1898), *Le Opere di Galileo Galilei*, Firenze : G. Barbera, Vol. 8, 453-455.

<sup>455</sup> Ibid. « Esattissimo compartitore, in minutissime particelle, del tempo è un pendolo appeso a un sottil filo di qualsivoglia grandezza ; il qual pendolo, essendo di materia grave, rimosso dal perpendicolo e lasciato liberamente scorrere, fa le sue reciprocazioni, o vogliam dir vibrazioni, siano pur grandi o piccole, perpetuamente sotto tempi ugualissimi. Il modo poi di trovare, mercè di questo, esattamente la quantità di qualsivoglia tempo ridotto ad ore, minute, secondi etc., che sono le particole comunemente usate de gli astronomi, sarà tale. Accomodato un tal pendolo, di lunghezza, per esempio, d'un palmo o di mezzo braccio, e facendolo andare, e per una volta tanto numerando con pazienza le vibrazioni che passano in un giorno naturale, conseguiremo il nostro intento, tutta volta però che abbiamo una precisa conversione di detto giorno, o vogliam dire dell'equinoziale. E per ottener questa, voglio che si fermi un telescopio esquisito, di lunghezza di quattro braccia o piu, verso qualche stella fissa quand'ell'è intorno al meridiano, e tenendo sempre immobile il telescopio, aggiustato già alla stella, si continui di rimirlarla sino all'ultimo punto ch'ella scappa fuori della vista ; nel qual punto si comincino a numerare le vibrazioni del pendolo, continuando la notte e'l giorno seguente sino al ritorno della medesima fissa incontro al telescopio conservato sempre immobilmente nel medesimo posto ; ed aspettando che la stella scappi fuori della vista nel modo che fece nelle precedente osservazione, ritengase il numero delle vibrazioni scorse in tutto questo tempo : imperochè da esse in tutte l'altre osservazioni di tempi potermo avere le quantità loro in ore, minuti, secondi e terzi etc., operando con la seguente regola.

Pongasi, per esempio, che'l numero delle vibrazioni nel tempo delle 24 ore naturali sia stato 280536 : ed all'arrivo d'alcuna fissa nel meridiano si cominci a numerare le vibrazioni, sin che un'altra fissa pervenga al meridiano, e sia il tempo decorso, misurato, 16942 vibrazioni : vogliamo sapere quanto sia questo tempo, ridotto in ore, minuti, secondi etc. Dicasi dunque, per la regola aurea : Se 280536 vibrazioni sono il tempo di 24 ore, qual sarà il tempo delle 16942 ? Operisi per la regola, e troverassi un'ora, con l'avanzo della frazione 126072 ; dalla quale caveremo i minuti primi, moltiplicandola per 60, il cui prodotto è 7564320, che diviso pel primo numero 280536 ne dà 26, che sono minuti primi, ed avanza 270384 ; dal quale averemo i secondi, moltiplicandolo pure per 60, il cui prodotto è 16223040, che diviso pur per l'istesso partitore ne rende 57, e sono minuti secondi, ed avanza 212488 ; il qual di nuovo moltiplicato per 60, e'l prodotto partito pel medesimo partitore, ci dà 44 minuti terzi, con l'avanzo di 205696 ; che moltiplicato pure per 60, e diviso il prodotto pel medesimo partitore, ce dà 44 minuti quatri quasi appunto. E con tal ordine si troveranno frazioni piu minute, quanto ne piacerà. E tra notisi quanto grande sia l'utile che da questa prima operazione si ritrae, poi che per essa venghiamo in codnizione scrupolossima della differenza ascensionale retta de tali stelle, etc. »

temporelle précise, suivant le principe que tout pendule est isochrone indépendamment de l'amplitude d'oscillation, un point considéré comme vrai par l'auteur. Le pendule en question est un pendule simple, un corps grave attaché par un fil, de longueur d'un *palmo* ou un demi *braccio*<sup>456</sup>. Le premier geste à effectuer est d'éloigner le pendule de la verticale et de le laisser librement effectuer ses oscillations. Il faut par la suite compter, avec patience, le nombre d'oscillations dans 24 heures, ou comme dit Galilée, dans la durée d'une journée naturelle, afin de pouvoir déterminer les heures, les minutes, les secondes etc. Il faudrait pour cela relancer très régulièrement le pendule qui ralentit rapidement à cause des frottements. Ce que Galilée appelle ici un jour naturel est le jour sidéral. Il nous propose d'utiliser un télescope de quatre *braccia* ou plus, de fixer le télescope sur une étoile fixe et de compter les oscillations du pendule jusqu'à ce que l'étoile retrouve la même place vue du télescope, lequel en attendant est bien entendu resté immobile dans sa position initiale. Cette place de l'étoile vue par le télescope peut être le moment où l'étoile *fuit* le télescope nous dit Galilée. La détermination des heures et de ses subdivisions est déterminée par le calcul et plus précisément par l'application de la règle d'or. Cette règle est celle qu'on appelle aujourd'hui la règle de trois ou la règle de proportionnalité. Les subdivisions de Galilée suivent la division temporelle sexagésimale appliquée à volonté. La journée est égale à 24 heures, une heure (*ora*) est égale à 60 minutes (*minuti primi*), une minute est égale à 60 secondes (*minuti secondi*), une seconde est égale à 60 troisièmes (*minuti terzi*), une troisième est égale à 60 quatrièmes (*minuti quatri*) et ainsi de suite.

Galilée nous dit par la suite que le pendule de longueur 1 *palmo* ou 0,5 *braccio* effectue 280536 vibrations dans 24 heures. De là, avec l'aide de la règle de trois, on peut calculer l'heure et ses subdivisions pour tout nombre de vibrations du pendule avec une précision de quatrièmes (*minuti quatri*) ou plus si l'on a envie. Baliani n'était probablement pas au courant de l'existence de ce texte. C'est une partie de la réponse à sa question posée dans sa lettre de 1632 dans laquelle il se demande comment fabriquer un instrument de mesure de temps précis. Cet instrument est présenté ici par Galilée pour son application aux observations astronomiques, mais il peut également mesurer le temps d'une chute.

---

<sup>456</sup> De la conversion du P. Mersenne plus haut, nous avons trouvé qu'un *braccio* est égal à environ



En 1638, Baliani publie un bref traité sur le sujet du mouvement des corps graves intitulé « *De motu naturali gravium solidorum Ioannis Baptistae Baliani patritii genuensis* ». Dans cet ouvrage il présente et démontre la loi de chute des corps graves, accompagné par le compte rendu de ses expériences. Il étudie les propriétés des Pendules, tout en confirmant l'idée de Galilée sur l'isochronisme des Pendules, c'est-à-dire, l'isochronisme considéré indépendamment de l'amplitude d'oscillation. Il trouve la même relation entre temps et espace parcouru par un corps grave lors de sa chute libre et effectue lui aussi des expériences de chute sur des plans inclinés. Il est vrai que dans cet ouvrage, alors que les démonstrations sont géométriques, les expériences jouent un rôle crucial, le rôle de fondements même de la mécanique. L'idée que pour qu'une loi mécanique soit fiable, il faut qu'elle soit confirmée par l'expérience apparaît très vive dans ce traité.<sup>457</sup>

Le 17 Décembre 1638<sup>458</sup>, après un temps de silence des deux côtés d'un peu plus de 6 ans et demi, Baliani reprend sa correspondance avec Galilée envoyant cette fois-ci une lettre très brève pour lui demander son avis sur son ouvrage et exprimant le désir de s'illuminer de ses idées brièvement exposées dans le *Discours concernant deux sciences nouvelles*. Galilée répond trois semaines plus tard.<sup>459</sup> Dans cette lettre Galilée confirme la réception du traité sur le mouvement de Baliani. Il confirme aussi que ce traité comme ses *Discours* étudient les mêmes sujets mais de manière différente. Galilée dit ne rien supposer d'autre dans son ouvrage que la définition du mouvement qu'il veut traiter et les démonstrations géométriques des « *accidenti del moto naturale* ». Galilée ne semble pas partager l'idée de la primauté des expériences comme fondement des sciences. Quelques mois plus tard, le 20 juin 1639 Galilée envoie une autre lettre à Baliani, lettre aujourd'hui malheureusement perdue. Baliani rédige la réponse le 1<sup>er</sup> Juillet de la même année. Il débute cette lettre presque immédiatement par un discours sur la primauté de l'expérience, il soutient la thèse que « les expériences doivent être mises au commencement des sciences, quand elles sont sûres, et à partir des choses connues par le sens, c'est la tâche de la science de conduire à la connaissance de celles qui sont

---

<sup>457</sup> Cette idée lancera une discussion forte intéressante entre les deux correspondants dans les lettres qui suivent sur des problèmes de nature épistémologique, traitée dans Moscovici S. (1967, 140-148.)

<sup>458</sup> Galilei G. (1906), *Le Opere di Galileo Galilei*, Firenze : G. Barbèra, Vol. 17, 413-414.

<sup>459</sup> Ibid., Vol. 18, 11-13.

ignorées. »<sup>460</sup> Le problème primordial de Baliani resurgit dans cette lettre : comment faire pour qu'une expérience soit sûre ? Dans ce cadre de réflexion épistémologique Baliani reprend la question qu'il avait posée à Galilée six années et demie auparavant.<sup>461</sup> Il dit n'avoir vu nul part ailleurs ce que Galilée a écrit dans ses *Dialogues* concernant les vibrations des Pendules dans un certain temps et l'estimation de la chute libre des corps graves d'une hauteur de 100 braccia en 5 secondes de temps. Ce passage souligne la difficulté et le désir de Baliani, qui avait pleine conscience des enjeux de cette entreprise, de mesurer le temps avec précision. Baliani demande à connaître l'expérience qui établit cette vérité. Galilée, qui a suffisamment laissé mariner Baliani, donne dans sa lettre du 1<sup>er</sup> Août 1639<sup>462</sup> les explications nécessaires pour la réalisation de l'expérience tant désirée par son correspondant. Dans cette lettre Galilée confirme l'idée que son résultat est le produit de l'extrapolation du rapport établi par les expériences sur les plans inclinés.

« Vous me dites que vous aimeriez savoir le dispositif par lequel j'étais capable de m'assurer que le corps en chute libre verticale partant du repos parcourt 100 braccia de hauteur en 5 secondes. Deux choses sont recherchées: la première est le temps de la descente de 100 braccia, et la seconde est de trouver à quelle partie des 24 heures dans les étoiles (*del primo mobile*) correspond ce temps. Au sujet de la première opération, la descente de cette boule, que je fais descendre par un canal, arbitrairement incliné, nous donnera tous les temps – non seulement celui de 100 braccia, mais de toute autre quantité de chute verticale dans la mesure où (comme vous-même l'avez démontré) la longueur de ce canal, ou appelons-le plan incliné, est une moyenne proportionnelle entre la hauteur verticale dudit plan et la longueur de toute la distance verticale qui

---

<sup>460</sup> Ibid. 69. « Io in vero ho giudicato che l'esperienze si debbano por per principii delle scienze, quando son sicure, e che dalle cose note per Lo senso sia parte della scienza condurci in cognitione delle igniote. » Traduction Moscovici S. (1967, 141).

<sup>461</sup> Ibid. 69-70. « Rispetto a quel che dice di haver scritto delle vibrationi del pendolo fatte nell'istesso temps, e dell'osservatione de'gravi che con pari velocità discendono. Io non ho veduto altro, solo quel che scrive ne i Dialoghi del Sistema. Anzi che in quelli V.S. dice qualche cosa, di che io sperava che ne dovesse dar piu distinto conto in questi, cioè di haver osservato che il grave discende di moto naturale per cento braccia in cinque minuti secondi d'hora ; sperava, dico che dovesse dir con che ragione si è assicurata che sian cinque secondi, e massime dove, a fogli 175, V.S. dà conto distinto di altre esperienze fatte in simil materia. »

<sup>462</sup> Ibid. 75-79.

serait traversée dans le même temps par le mobile en chute. Ainsi par exemple, supposant que ledit plan soit de 12 braccia de long et sa hauteur verticale d'un demi-braccio, un braccio ou deux, la distance parcourue lors de la chute verticale sera 288, 144 ou 72 braccia, comme il est évident<sup>463</sup>. Il nous reste à trouver maintenant la quantité du temps de la descente à travers le canal. Nous allons l'obtenir par les propriétés merveilleuses du pendule, qui est celui qui fait toutes ses vibrations, grandes ou petites, en temps égaux. Ceci nécessite, une fois pour toute, que deux ou trois ou quatre amis fidèles et curieux, ayant noté une étoile fixe qui se trouve opposée à un signe stable, prenant un pendule de toute longueur, comptent ses vibrations durant la totalité du temps du retour de l'étoile fixe à son point d'origine, et ceci sera le nombre de vibrations en 24 heures. Du nombre de celles-ci nous pouvons trouver le nombre de vibrations de tout autre pendule, plus long ou plus court, à volonté, de sorte que si par exemple celles comptées par nous en 24 heures étaient 234,567, puis en prenant un autre pendule plus court avec lequel un [ami] compte 800 vibrations tandis qu'un autre compte 150 du plus long pendule, nous avons déjà, par la règle d'or, le nombre des vibrations pour la totalité du temps en 24 heures et si l'on veut savoir par ces vibrations le temps de la descente à travers le canal, nous pouvons aisément trouver non seulement les minutes, les secondes et les tierces (...), mais au-delà comme nous le voulons. Il est vrai que nous pouvons passer à une mesure plus exacte en ayant observé le débit d'eau à travers un passage mince, car en le recueillant et en pesant ce qui passe dans le temps de la descente à travers le canal on trouve la mesure et la quantité la plus exacte de ce temps, surtout en faisant usage d'une balance si précise qu'elle pourrait peser un sixième d'un grain. Voilà pour ce qui concerne le dispositif, qui je pense, vous jugerez très exact, mais si vous voulez expérimenter si ce que j'ai écrit sur les 100 braccia en cinq secondes est vrai, et que vous deviez trouver faux, [rappelez-vous] de montrer l'extrême sottise de celui qui a écrit et attribué le temps d'une boule de canon de l'orbe lunaire [à la terre] il importait peu si les cinq secondes pour 100 braccia était vrai ou non »<sup>464</sup>

---

<sup>463</sup> Si  $b$  la longueur du plan incliné,  $a$  la hauteur verticale du plan incliné et  $d$  la longueur de la chute verticale d'un corps grave dans le même temps,  $b$  étant la moyenne proportionnelle nous avons  $\frac{a}{b} = \frac{b}{d}$ . Pour  $b=12$  braccia et  $a=0,5$  braccia,  $d = \frac{b^2}{a} = \frac{12^2}{0,5} = 288$  braccia et ainsi de suite.

<sup>464</sup> Traduction personnelle, basée sur la traduction de Drake St. (1978), *Galileo at Work*, Mineola, New York : Dover Publications, INC., 399-400 :

La première partie de cette lettre est consacrée à formulation de la relation géométrique entre les différentes longueurs de chute, celle d'une chute verticale et celle d'une *chute* sur un plan incliné. Si l'on arrive à mesurer ainsi le temps de la *chute* d'une longueur sur un plan incliné nous pouvons ainsi calculer aisément la distance d'une chute libre verticale pour le même temps. La deuxième partie évoque les avantages que nous offrent les propriétés des pendules simples. Les comparaisons entre le nombre des vibrations dans 24 heures (un jour sidéral) des pendules de longueurs différentes nous permettront une subdivision temporelle très subtile, grâce à laquelle il va être possible

---

« V.S. Ill.<sup>ma</sup> mi dice che volentieri harebbe sentito l'artificio col quale io mi sia potuto assicurare che il grave descendente a perpendicolo, partitose dalla quiete, passi cento braccia di altezza in cinque minuti secondi. Qui due cose si cercano : la prima è il tempo della scesa per le cento braccia, la seconda è il trovare qual parte sia questo tempo delle 24 hore del primo mobile. Quanto alla prima operatione, la scesa di quella palla che io fo scendere per quel canale ad arbitrio nostro inclinato, ci darà tutti i tempi non solo delle cento braccia, ma di qualsivoglia altra quantità di caduta perpendicolare, atteso che, come ella medesima sa e dimostra, la lunghezza del detto canale, o vogliamo dire piano inclinato, è media proporzionale tra la perpendicolare elevatione di detto piano e la lunghezza di tutto lo spazio perpendicolare che nel medesimo tempo si passerebbe dal mobile cadente : come, per esempio, posto che il detto canale sia lungo 12 braccia, e la sua perpendicolare elevazione sia mezo braccio, un braccio o due, lo spazio passato nella perpendicolare sarà braccia 288, 144 o 72, come è manifesto. Resta hora che troviamo la quantità del tempo delle scese per il canale. Ciò otterremo dalla ammirabile proprietà el pendolo, che è di fare tutte le sue vibrationi, grandi o piccole, sotto tempi eguali. Si ricerca, *pro una vice tantum*, che dua, tre o quatro amici curiosi e pazienti, havendo appostata una stella fissa che risponda contro a qualche segno stabile, preso un pendolo di qualsivoglia lunghezza, si vadano numerando le sue vibrationi per tutto il tempo del ritorno della medesima fissa al primo luogo ; e questo sarà il numero delle vebrationi di 24 hore. Dal numero si queste potremo ritrovare il numero delle vibrationi di qualsivogliano altri pendoli minori e minori a nostro piacimento; sichè se, vgr., le numerate da moi nelle 24 hore fossero state, vgr., 234 567, pigliando un altro pendolo piu breve, col quale uno numeri, per esempio, 800 vibrationi mente che l'atro numerasse 150 delle maggiori, già havremo per la regola aurea il numero delle vibrationi di tutto il tempo delle 24 hore: e se con queste vibrationi vorremo sapere il tempo della scesa per il canale, potremo con la medesima agevolezza ritrovare non solo i minuti primi, secondi e terzi, ma quatri e quinti, e quanto piu ci piacerà. Vero è che noi potremo passare a piu esatte misure con havere veduto et osservato qual sia il flusso dell'acqua per un sottile cannelo, perchè raccogliendola, et havendo pesata quanta ne passa, vgr., in un minuto, potremo poi, col pesare la passata nel tempo della scesa per il canale, trovare l'esattissima misura e quantità di esso tempo, servendoci massime di una bilancia così esatta che tira ad un sessantesimo di grano; Questo è quanto all'artificio ; il quale penso che ella stimerà esquisitissimo, anchorchè poi volendo sperimentare se quello che io scrissi delle 100 braccia in cinque secondi sia vero, lo trovasse falso, perchè per manifestare la estrema gofferia di quello che scriveva et assegnava il tempo della cadutadella palla d'artiglieria dall'orbe lunare, poco importa che i cinque minuti delle 100 braccia siano o non siano giusti. »

de mesurer le temps d'une chute libre. Mais Galilée souligne à Baliani que même s'il suit ses indications à la lettre il pourrait bien obtenir un résultat différent que le sien. De plus, s'il veut une meilleure précision dans la mesure du temps, il l'encourage à utiliser des balances pour peser l'eau s'écoulant d'une clepsydre. Ces balances sont tellement précises nous dit Galilée, qu'elles peuvent peser même le sixième d'un grain. Elles sont considérées comme l'instrument le plus précis. Cette amélioration des balances comme instrument de mesures doit trouver ses raisons dans son usage commercial courant en orfèvrerie. Pour finir, Galilée souligne que ce résultat n'est pas si important comparé à « *l'extrême sottise* » de Locher et à son résultat de chute libre de l'orbite de la Lune jusqu'au centre de la Terre. Il montre aussi que ce ne sont pas des résultats d'expérience qui remettront en cause sa théorie.

Ce que l'on peut retenir de cette lettre est que le résultat annoncé dans les *Dialogues* ne semble pas être le résultat d'une expérience sûre et précise comme l'avait imaginée Baliani. Galilée déclare même ouvertement que son résultat est probablement faux. Dans cette lettre et dans ses *Operations Astronomiques*, il donne des nombres d'oscillations, qui pourraient tout aussi bien résulter d'une extrapolation à partir de l'observation de quelques centaines de vibration. Le 100 braccia dans 5 secondes était un résultat provocateur pour prouver la fausseté de la théorie de Locher et non pas pour donner une réponse précise au problème de la mesure du temps lors d'une chute libre. Il reconnaît explicitement dans sa lettre qu'il s'agit d'un résultat extrapolé à partir de ses mesures avec des plans inclinés.

Baliani dans sa lettre de 19 Août 1639<sup>465</sup> reconnaît les bénéfices que l'on peut avoir dans la mesure du temps avec la fabrication d'un pendule à secondes. L'intérêt de Baliani se

---

<sup>465</sup> Galilei G. (1906), *Le Opere di Galileo Galilei*, Firenze : G. Barbèra, Vol. 18, 87. « Vedo ciò che mi dice del modo di assicurarsi che il grave discenda per cento braccia on cinque secondi, il tutto camina dovesse giovare il ritrovar un pendolo di tal longhezza che facesse le vibrationi precisamente in un minuto secondo; e perchè è cosa che richiede diligenza e pazienza, pregai il Padre Niccolò Cabeo, che mi pareva atto a ciò et a molto maggior cosa, che volesse cercarlo, et esso mi scrisse da Ferrara di haverlo fatto, e me ne mandò la misura, che è come questa che è qui in margine: ove dice che il filo ha da esser longo quanto ED, e nel d sia il centro della palla grave da applicarvisi, dicendo che in un secondo retorna la palla nel luogo di dove partì. Questo, come V.S. vede, serve per un horrologgio da misurar molte cose che richiedono tempo breve, e particolarmente servirebbe a questi (*sic*) di misurar la scesa del grave, ove dosse una torre altissima. »

généralise, il n'est plus question de comment faire pour confirmer les 100 braccia dans 5 secondes. Et malgré l'invitation de Galilée à utiliser des balances pour plus de précision dans la mesure du temps, Baliani insiste sur son idée de la fabrication d'un pendule précis. Il informe Galilée avoir demandé à un ami (et non pas quatre), avec la patience et la curiosité scientifiques nécessaires, de compter les vibrations d'un pendule et qu'il a ainsi réussi à déterminer la longueur d'un pendule simple qui effectue ses vibrations dans une seconde précisément. Pour partager la mesure de cette longueur avec son correspondant, Baliani la dessine sur la marge de sa lettre. Il s'agit d'une ligne *ED* de 223mm où *D* représente le centre de la balle suspendu par le fil.<sup>466</sup> Ce que Baliani entend ici par Pendule à secondes est un pendule simple de période d'une seconde de temps. La grande utilité de ce pendule, de cette horloge, est soulignée encore une fois par Baliani pour toute chose qui se produit dans des durées temporelles fort petites, comme pour la mesure du temps lors de la chute libre des corps (d'où la nécessité d'une tour très haute). C'est la réponse donnée par Baliani à la remarque de Moscovici présentée plus haut. Comme des instruments capables de subdivisions très subtiles n'étaient pas jusqu'alors fabriqués, Baliani, afin de faciliter l'opération de mesure du temps lors de la chute, avait besoin d'une tour très haute. Galilée dans sa réponse du 1 Septembre 1639<sup>467</sup>, attire l'attention de son correspondant sur les erreurs possibles lors de la détermination de cette longueur, qui peuvent être peut être mineures mais qu'il se cumulent lors d'une opération de longue durée. Une petite erreur peut devenir très grande après un grand nombre d'oscillations. Pour Galilée l'importance d'un tel instrument réside dans la précision qu'il offre lors des observations astronomiques.

---

<sup>466</sup> Un tel pendule simple marquerait en fait 0,95 s pour des petites oscillations et 1,00 s pour des oscillations d'amplitude 60 degrés.

<sup>467</sup> Ibid. 93-94. « In risposta alla gratissima sua delli 19 del passato, dico che quanto al misurare il tempo con un pendolo aggiustato a fare le sue vibrationi in un minuto secondo, si avanza la fatica de fare il calcolo con la semplice operatione della regola aurea, havendo una volta tanto tenuto conto del numero delle vibrationi di qualsivoglia pendolo fatte in 24 ore: la quale osservatione è necessario che il Padre Cabeo habbia fatta con un pendolo di quasi sia lunghezza, e da esso cavatane, con l'inventione delle medie, la lunghezza del pendolo di un minuto secondo; la quale inventione è soto posta a qualche errore, il quale, benchè piccolo, multiplicato secondo il numero delle molte vibrationi, può partorire notabile errore, il che non accade nelle vibrationi non obligate alla lunghezza del filo che, molte centinaia di volte replicate, ce deve dare la misura del tempo, sichè ogni piccolo errore preso nella lunghezza del pendolo va molte centinaia di volte multiplicato: mentre nell'altra mia operazione l'errore non può nascere, salvo che nel numerare le vibrazioni, delle quali una sola parte di una sola vibratione può o meno del giusto. (...) Che l'uso del pendolo....»

La première chose à faire est le bon étalonnage du pendule, la détermination exacte de sa longueur par la pratique de l'observation d'une étoile lors d'une journée sidérale. Le principe pour l'étude des oscillations pendulaires est l'isochronisme indépendamment de l'amplitude d'oscillation : « peut importe qu'ils s'en écartent plus ou moins: c'est toujours en des temps égaux que le même pendule fait ses aller et retour, qu'ils soient très longs ou très courts, c'est-à-dire que le pendule s'écarte beaucoup ou peu de la verticale ; et si les temps ne sont pas absolument égaux, la différence est insensible, l'expérience peut nous le montrer »<sup>468</sup>. Les effets perturbateurs définis par Galilée lors du mouvement d'un pendule à secondes sont au nombre de deux. Le premier est la résistance du milieu (de l'air) et la deuxième est celle qui est liée au fil du pendule auquel le corps est attaché. Un peu plus loin dans le *Dialogue* Galilée présente cette « empêchement » au mouvement oscillatoire du pendule.

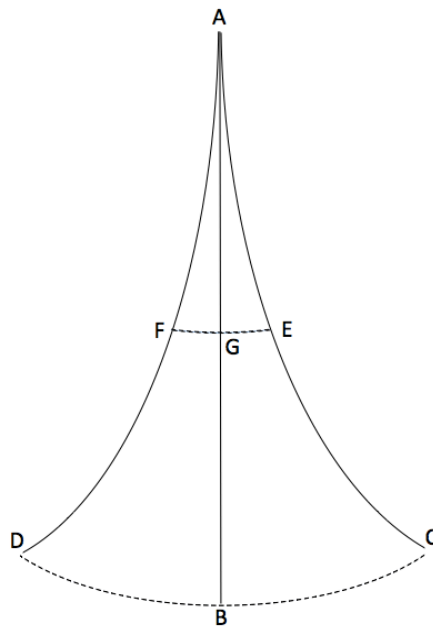


Fig. 5.4. D'après la figure qui illustre dans la traduction française du *Dialogue*.

Il imagine une ligne verticale AB et un pendule auquel deux corps lourds sont attachés, un à l'extrémité du pendule AC le corps C, et l'autre suspendu un peu plus haut sur le même fil, le corps E. Si l'on écarte ce pendule de la verticale et on le laisse osciller

---

<sup>468</sup> Galilei G. ([1632] 1992), 242. Cela entraîne une erreur de l'ordre de 10% sur la mesure de la période.

librement nous allons remarquer que le corps E décrira une courbe EGF et le corps C une courbe CBD. Le corps E étant moins écarté de la verticale « veut donc revenir à l'arrière plus vite et avoir des vibrations plus fréquentes que le poids C ; » ceci, selon Galilée, empêcherait le point C d'aller aussi loin qu'il voudrait, au delà du point D de sa courbe CBD, s'il était libre. L'effet observable de cet empêchement est la plie en arc du fil du pendule. Le fil perd sa forme de ligne droite lors de l'oscillation. L'auteur voit le pendule simple comme un pendule composé, chaque point de son fil représentant un poids. Nous pouvons encore mieux l'observer, nous dit l'auteur, si à la place du fil on utilise une chaîne qui est composée de plusieurs parties visibles avec un poids que l'on peut prendre en considération. Le poids du fil peut être rendu négligeable. En revanche, il est possible que Galilée ait considéré que dans les grandes oscillations du pendule, sa vitesse étant plus grande que pour de petites oscillations, les forces de frottements, plus importantes, pouvaient expliquer le fait que les oscillations observées n'étaient plus isochrones en comparant deux pendules identiques mais écartés différemment de la perpendiculaire. En faisant abstraction de l'air, il devait s'être persuadé de l'isochronisme.

#### 4. Galilée platonicien.

Galilée a très bien étudié le pendule. Il a étudié ses propriétés, déterminé les empêchements de son mouvement perpétuel, et il connaissait son potentiel de précision dans la mesure du temps. Il fait alors le choix de l'utiliser pour des raisons pratiques, au service des observations astronomiques (que ce soit pour les satellites de Jupiter lors de la détermination des longitudes, ou pour la cartographie du ciel) mais pas pour la mesure du temps d'une chute libre. Ce choix nous montre que ce qu'on appelle la fiabilité des arguments quantitatifs (faisant référence à des résultats de mesures liés à un instrument, dans notre cas la mesure du temps) ne dérive pas naturellement de la géométrisation de la nature. Ce n'est pas parce que la géométrie commence à être considérée comme le langage privilégié de la description de la nature qu'automatiquement les résultats de mesures jouent un rôle crucial au sein de la théorie. On peut alors à juste titre se poser la question du pourquoi ? Alors que les mesures et la géométrisation de la nature sont développées de paire, pourquoi la théorie n'inclut-elle pas ces résultats comme des résultats décisifs pour la construction de la théorie



même ? Pourquoi se contente-t-elle d'une observation suffisante pour la mise en rapport des grandeurs ? Pour poser la question autrement dans le cas précis de Galilée, on rejoint Alexandre Koyré quand il se demande pourquoi Galilée n'a pas utilisé le pendule pour mesurer le temps d'une chute libre. Cette question à notre avis est à mettre en relation avec celle du pourquoi Galilée croit si aveuglement à l'isochronisme du pendule.

Une réponse possible pourrait être ce que William Shea a formulé de la manière suivante : « Pour Galilée la révolution scientifique, le passage du point de vue traditionnel du Monde au point de vue nouveau, n'est pas principalement le résultat de plus nombreuses et meilleures observations. C'est la réduction mathématique inspirée d'un labyrinthe géométrique complexe à un système beau, simple et harmonieux. C'est une nouvelle vision, en effet, digne de Platon lui-même. »<sup>469</sup> Le platonisme de Galilée surgit à plusieurs reprises dans son œuvre. La forme dialectique de ses ouvrages, l'attachement à l'idée du cercle : Galilée « disciple de Platon pour lequel le cercle était la courbe privilégiée par excellence » ;<sup>470</sup> le fait qu'il considère le mouvement circulaire comme le mouvement premier ou naturel et la réminiscence platonicienne de la théorie des idées qui trouve une nouvelle application dans le monde mathématique. Pour Galilée platonicien « notre savoir est d'une certaine façon une réminiscence. »<sup>471</sup>. Il est indéniable que l'attachement de Galilée à la perfection du cercle trouve ses origines chez Platon<sup>472</sup>. Il est très probable que la croyance aveugle à l'isochronisme pendulaire provient de cet attachement et à l'idée que derrière la réalité mathématique se cache une vérité, idée également inspirée par Platon. Galilée est fortement influencé par certaines idées du philosophe. On trouve plusieurs éléments de la réflexion platonicienne dans le *Dialogue* galiléen, mais ses idées à partir du moment où elles sont décontextualisées ne sont plus platoniciennes. Elles ont un rôle et un sens précis que

---

<sup>469</sup> Shea W. R. (1997), *Galileo's intellectual revolution, Middle period, 1610-1632*, New York: Science History publications, A division of Neale Watson Academic Publications, Inc., 150. Trad. pers. : « For Galileo, the scientific revolution, the passage from the old to the new world-view, is not primarily the result of more and better observations. It is the inspired mathematical reduction of a complex geometrical labyrinth into a beautifully simple and harmonious system. It is, in fact, a new vision worthy of Plato. »

<sup>470</sup> Speiser D. (1988), « Le «Horologium Oscillatorium» de Huygens et les «Principia» », in *Revue Philosophique de Louvain*, Vol. 86 (72), 488.

<sup>471</sup> Galileo G. ([1632] 1992), 207-208.

<sup>472</sup> Pour une étude complémentaire à la notre à ce sujet voir Koyré A. (1960), « Newton, Galilée et Platon », in *Annales, Économies, Sociétés, Civilisations*, Vol. 15 (6), 1041-1059

dans un cadre particulier de réflexion. En dehors de ce cadre elles sont dénuées de leur sens premier et elles jouent le rôle que le nouveau système de réflexion leur impose. Quel est le sens du platonisme galiléen dans ce cadre ? Afin de souligner quelques similitudes et quelques différences entre l'œuvre galiléenne et les idées platoniciennes nous allons présenter le *Timée* de Platon. Nous allons voir dans quel contexte Platon utilise la géométrie, quel est l'objectif de la connaissance pour le philosophe et comment ce texte en perdant son aspect mythique devient une réalité physique dans la pensée galiléenne.

i. Galilée et le *Timée* de Platon.

Le *Timée* de Platon<sup>473</sup> est le premier livre d'une trilogie qui n'a jamais été réalisée par son auteur. L'ouvrage porte souvent la caractérisation courante de « dialogue », donnée à la majorité des œuvres de Platon, alors que la partie dialectique ne prend place que dans l'introduction, suivie d'un grand discours ininterrompu porté par le personnage principal. Les interlocuteurs principaux sont au nombre de quatre, Socrate l'Athénien, Critias l'Athénien, Hermocrate de Syracuse, et Timée de Locres, qui se rencontrent à Athènes lors d'une fête à l'honneur d'Athéna. Athéna, déesse de la sagesse et de la guerre dont la fête représentait symboliquement selon Proclus « le bon ordre qui descend de l'Intellect dans le Cosmos et la séparation qui empêche les opposés cosmiques de se mêler jamais. »<sup>474</sup>. Lors du premier jour de cette rencontre, absent du dialogue, le sujet établi par Socrate est la constitution de la cité idéale. Le deuxième jour comme le veut la coutume, Socrate laisse sa place aux invités de la cité mais garde cependant la place du maître, comme celui qui a introduit le sujet de la discussion et donnera au commencement de ce dialogue l'impulsion nécessaire pour le démarrage de la discussion. Socrate commence donc cette deuxième journée par un bref rappel de ce qui a été dit la veille sur les principes de la cité idéale. La force motrice pour le démarrage du dialogue est l'envie de Socrate de voir cette cité en chaire et en os, constituée de vraies personnes. L'envie de voir cette cité en acte lors d'une guerre, de voir les lois mises en place prendre vie. Il demande à ces interlocuteurs de donner de la vie, du

---

<sup>473</sup> Πλάτωνας (1995), *Τιμαίος*, εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια Κάλφας Β., Αθήνα : Πόλις.

<sup>474</sup> Hadot P. (1983), « Physique et poésie dans le *Timée* de Platon », in *Revue de théologie et de Philosophie*, 117.

mouvement à sa théorie de la constitution de la cité parfaite. De passer de la théorie à l'acte, de vivifier sa construction théorique, de lui donner une place dans la réalité et dans l'histoire.

Ces interlocuteurs ne sont pas choisis au hasard, ils sont les représentants d'un mariage unique entre philosophie et politique. Critias<sup>475</sup>, personnage très connu à Athènes, dont la famille avait des liens de parenté avec Solon le Sage, connu pour être très présent dans la vie politique, prend la parole à la suite de Socrate pour dire que la cité idéale décrite par Socrate a réellement existée. Cette cité était Athènes, mais une Athènes primitive, qui a existé très longtemps avant le jour de cette rencontre, et dont les Athéniens n'ont aucun souvenir à cause des catastrophes naturelles qui ont obligé les survivants à la reconstruire de nouveau à chaque fois. Les sources de Critias remontent à Solon le Sage. Critias raconte ce que Solon a découvert lors de son voyage en Egypte et de sa rencontre avec un prêtre Egyptien. Ce récit est le fameux mythe de la défaite de l'Atlantide par l'Athènes primitive « une guerre (...) (qui) correspond à l'opposition fondamentale entre l'Intellect et la Nécessité, la Nécessité étant l'explication dernière du trouble et du désordre produit dans l'Ame par la sensation »<sup>476</sup>. Une Athènes dont les lois étaient parfaites, l'organisation des classes sociales également, et qui pouvait servir comme exemple à imiter pour les autres cités vu son héroïsme<sup>477</sup>. C'est Critias qui présentera aussi l'organisation du dialogue, donnant une mission à chacun des interlocuteurs « Il nous a paru que Timée, celui d'entre nous qui est le meilleur astronome et qui s'est donné le plus de travail pour pénétrer la nature de l'Univers, devait prendre la parole le premier et, partant de la naissance du Monde, terminer par la naissance (*physis*) de l'homme. Et moi, Critias, après lui, comme si j'avais reçu de lui les hommes nés de son discours et de toi, Socrate, quelques-uns d'entre eux spécialement instruits, je les ferai comparaître selon la pensée et la loi de Solon devant vous comme devant des juges et j'en ferai des citoyens de cette cité, comme étant des Athéniens d'autrefois, ces aïeux invisibles que nous révéla la tradition des écrits sacrés. Et pour le reste, je ferai mon discours en les considérant comme de vrais citoyens et Athéniens de

---

<sup>475</sup> Πλάτωνας (1995), 18-19.

<sup>476</sup> Hadot P. (1983), 118.

<sup>477</sup> Ibid. 116.

maintenant. »<sup>478</sup>

Timée, fils d'une famille de classe social supérieure avec des connaissances constitutionnelles, philosophiques, cosmologiques et astronomiques, et une activité politique réussie, prend alors la parole. Son rôle est la création de l'humain en chaire et en os au service de l'incarnation de la théorie de Socrate. Il va commencer par la création du monde et « transmettra » ensuite l'être humain dans les mains de Critias qui prendra le relais. Timée arrivera à l'achèvement de sa mission mais le dialogue s'arrêtera subitement sur une phrase de Critias<sup>479</sup>. Et puisque le sujet établi par Socrate est la cité parfaite et sa constitution, le discours de Timée est inclus dans un cadre prédéfini dont l'objectif est l'étude de l'humain et de ses liens avec le Cosmos. Cette unification se fait par analogie et isomorphisme. L'analogie entre le Cosmos et l'homme permet d'établir le fil conducteur de l'accomplissement de l'homme en tant qu'être éthique, en tant qu'être politique. Et cet être présenté par Timée est capable de créer des lois à la hauteur d'une cité parfaite même s'il ne nage pas dans le monde des Idées. Une seule condition est requise : avoir comme seul objectif, comme seul projet de vie, la mise en concordance, en équation, de son âme avec l'âme du monde.

Dès le début de son discours, Timée prend soin de la mise en place de ces principes métaphysiques, de l'établissement des fondements de son édifice spéculatif. Ces principes sont au nombre de trois<sup>480</sup>. Premièrement le monde est séparé en deux : a) au monde des Idées, de ce qui est éternellement et qui n'est pas sujet au devenir, de ce qui est objet de la connaissance rationnelle, qui est toujours le même et b) au monde du sensible, de ce qui se transforme sans cesse, qui naît et périt sans avoir une existence authentique, ce qui tombe sous la prise des sens irrationnels, et ne produit qu'une opinion. Deuxièmement le monde est perçu comme une œuvre d'art, comme un produit de création authentique qui présuppose un créateur, le dieu démiurge, la matière première et un model. Le model est intelligible et le monde est l'image de ce model

---

<sup>478</sup> Platon, *Timée* 27a-b, Le problème de la non attribution de mission au troisième personnage, Hermocrate, ne sera pas discuté ici. Traduction par Hadot P. in *Physique et poésie dans le Timée de Platon* », in *Revue de théologie et de Philosophie*, 117.

<sup>479</sup> Si l'hypothèse de la trilogie est bonne, on peut imaginer que le dialogue suivant serait nommé Critias, et le dernier Hermocrate.

<sup>480</sup> Platon, *Timée*, 27d-29d.

intelligible. Troisièmement la vérité du discours (λόγος) est liée à la vérité de son objet. Il y a symétrie entre la certitude de la connaissance du signifiant et la qualité ontologique du signifié. L'être est au devenir ce que la vérité est à l'opinion.<sup>481</sup> Timée ne revendique pas la vérité absolue dans sa présentation de la création du Monde.

Le Monde doit son existence à l'activité d'un dieu, d'un démiurge. La cause première de l'existence du Monde est ainsi son démiurge, l'artisan dont on ne connaît pas grand chose. On sait qu'il est bienveillant et son objectif ultime est le bien, l'harmonie et la beauté. Personne ne le connaît et même si quelqu'un arrive à le connaître il sera incapable de le présenter aux autres. Le monde est-il né? Oui, car il est visible et il a une forme. Selon quel *paradigme* a-t-il été créé? (Corruptible (produit de l'opinion) opposé à l'incorruptible (produit de la vérité)?) Si l'on juge de son démiurge, nous dit Platon il est évident que le *paradigme* utilisé est celui de l'éternité (incorruptible). Ce monde est ainsi l'image d'un autre. La création de ce monde a une cause et une nécessité.

Lors de son discours, Timée met l'accent sur l'importance des mathématiques et l'usage de plusieurs éléments mathématiques y prend place. Pour la création de l'âme du monde Platon utilise la division harmonique (1 2 3 4 9 8 27 >> 1, 2x1, 3x1, 2x2, 3x3, 2x4, 3x9, >>1+2+3+4+9+8= 27).<sup>482</sup> La sphère (parfaite et lisse) est la forme de l'univers car seule la sphère peut inclure le tout en son sein, nous dit Platon. Le corps du monde est constitué de quatre éléments: feu, eau, terre, air, qui se trouvent entre eux en rapport de proportion. La constitution des éléments est géométrique. Les éléments sont des corps tridimensionnels et leurs côtés sont des triangles de deux types: isocèle ou rectangle scalène. Platon crée ainsi quatre polyèdres parfaits différents les uns des autres (en sorte qu'ils soient capables (ceux qui ont comme surface le triangle rectangle scalène) de se produire (ou se détruire) l'un de l'autre.): Feu: Tétraèdre, Air: Octaèdre, Eau: Icosaèdre, Terre: Hexaèdre (cube). Il faut souligner ici que sur le plan astronomique platonicien les planètes sont considérées comme des dieux et non pas comme des corps célestes. En ce qui concerne le temps, Platon nous dit qu'alors que le démiurge voulait introduire dans son œuvre la nature de l'éternité elle-même, il s'est rendu compte de

---

<sup>481</sup> Ibid. 29c. « ὅτι περὶ πρὸς γένεσιν οὐσία, τοῦτο πρὸς πίστιν ἀλήθεια ».

<sup>482</sup> Pour une analyse détaillée de cette division voir Platon (1985), *Timée/Critias*, établi et traduit par Albert Rivaud, Paris: Les Belles Lettres, Notices & dans Platon (1992), *Timée/Critias*, traduction de Luc Brisson, Paris: GF Flammarion, Annexe 2.

l'impossibilité de cette entreprise et il a décidé de créer une image mobile de l'éternité. Cette image mobile est ce que l'on appelle le temps créé simultanément avec l'Univers. L'espace dans le cadre de la réflexion platonicienne n'est pas un simple réceptacle, mais un lieu d'accueil du devenir. Dans ce cadre de réflexion on trouve l'idée qu'une réalité mathématique se cache derrière la réalité sensible.

Après cette brève présentation du cadre physique et de l'usage des mathématiques, *Timée* semble être une œuvre mathématique qui étudie les phénomènes célestes et terrestres. Toujours est-il que l'usage des mathématiques dans ce contexte est très différent de celui que l'on trouve chez Galilée. « Le *Timée* et *La nature des choses* (de Lucrèce) sont tous les deux composés par l'inspiration immédiate des poètes-philosophes Présocratiques. Ils sont des « Hymnes de l'Univers » plutôt qu'un répertoire aride des phénomènes. Guidée par quelques grandes idées, leur rhétorique majestueuse balaye le domaine de la connaissance dans son intégralité, de l'origine du monde aux maladies du corps humain. Les deux examinent la nature dans un esprit heureux d'émerveillement et d'admiration. Les deux vibrent de la beauté du cosmos, la gloire de la somme des choses qui se reflètent dans une intensité soutenue de rythme, de diction et d'images vivantes. Rien n'est vu dans la déconnexion, sans vie et inerte. Partout il y a un sentiment d'immensité et de plénitude, et nous sommes conscients que la nature est liée, mobile et vivante dans toutes ses parties et tous ses processus. »<sup>483</sup>

Platon rappelle à ses auditeurs qu'en tant qu'êtres humains nous pouvons seulement nous offrir une fable vraisemblable de la création de l'Univers et que nous ne pouvons

---

<sup>483</sup> Shorey P. (1901), « Plato, Lucretius and Empiricus », in *Harvard Studies in Classical Philology*, 11, 206. Trad. pers. :

« The *Timaeus* and the *De Rerum Natura* were both composed under the immediate inspiration of the Pre-Socratic poet-philosophers. They are « Hymns of the Universe » rather than dry inventories of phenomena. Guided by a few great thoughts, their majestic rhetoric sweeps across the entire field of knowledge from the origins of the world to the diseases of the human body. Both approach the investigation of nature in a spirit of glad wonder and awe. Both thrill with a sense of the beauty of the cosmos, the glory of the sum of things, that reflects itself in a sustained intensity of rhythm, diction, and vivid imagery. Nothing is viewed in disconnection, lifeless and inert. Everywhere there is a sense of largeness and wholeness, and we are aware of nature related, moving, and alive in all her parts and processes. »

pas aller plus loin<sup>484</sup>. « (...) tout processus naturel est un processus divin, comme le dit *Sophiste* : « La nature engendre les êtres vivants avec une raison et une science divines qui proviennent de Dieu. « Seuls les Dieux peuvent donc connaître le secret de cette opération mystérieuse. C'est pourquoi la production par l'homme de processus naturels est totalement impossible. Une expérimentation véritable est donc irréalisable. (...) »<sup>485</sup> Quand on veut contrôler un phénomène par l'expérience, on méconnaît « la différence de l'humaine et de la divine nature, car un Dieu sait bien comment on peut mêler en un tout, pour les dissocier ensuite, les éléments divers et seul aussi il est capable de le faire. Mais nul homme n'est actuellement capable de faire ni l'un ni l'autre ni sans doute ne le sera jamais à l'avenir. »<sup>486</sup> « L'objet naturel est le produit d'un secret de fabrication inaccessible à l'homme. »<sup>487</sup>

Nous allons à présent retrouver Galilée et les grandes lignes communes et différentes des deux textes. Dans le *Dialogue* galiléen il s'agit effectivement d'un dialogue à l'image des dialogues platoniciens. Les personnages galiléens sont comme les personnages platoniciens en référence à des personnes ayant réellement existé. Galilée, sans dévoiler son identité, à travers la bouche de Sagredo (tout comme Socrate dans *Timée*), garde la place du maître dans son dialogue, et c'est lui qui exerce une sorte de maïeutique pour faire émerger la connaissance de la bouche de Simplicio. La première journée, à l'image de *Timée*, est la deuxième rencontre de trois personnages du *Dialogue*. L'objectif du *Dialogue* est la mise en examen des arguments physiques en faveur du système géocentrique. Cet objectif seul, montre combien Galilée s'éloigne de celui de *Timée* : la constitution de la cité idéale. La force motrice de Galilée est la démonstration de la vérité du système copernicien et non pas l'étude de la possibilité de la cité idéale. L'ordre du cosmos néanmoins semble être le sujet partagé entre les deux auteurs. Galilée compare deux systèmes explicatifs du monde, et Platon présente la création d'un monde unique. Le contexte des deux ouvrages est cependant très éloigné. L'objectif de la description de la création du monde par Platon est l'arrivée de l'homme. L'homme et son rapport avec soi et avec l'autre (homme ou le cosmos) est le sujet central de cette œuvre qui imagine la communauté humaine dans une société en ordre et harmonie à l'image du cosmos. La

---

<sup>484</sup> Platon, *Timée*, 29b-d.

<sup>485</sup> Hadot P. (1983), 123-124.

<sup>486</sup> Platon, *Timée*, 68c-d.

<sup>487</sup> Hadot P. (1983), 124.

question de la vérité de la création ne se pose pas chez Platon, car ce n'est pas son sujet. Le discours est de l'ordre de la vraisemblance. Galilée, même s'il prétend être dans l'hypothèse de la description du cosmos, ne cesse de s'exprimer pour la vérité du système copernicien. Le discours de Galilée n'a rien en commun avec le discours platonicien en ce qui concerne son genre. L'usage des mathématiques chez Platon n'occupe pas la place de la preuve de son raisonnement. Il fait partie de la création de la fable cosmique. Chez Galilée la preuve géométrique occupe la place majeure de son œuvre. C'est l'homme qui ne trouve plus sa place dans le *Dialogue*, il se réduit à un simple observateur des phénomènes sans rapport avec le cosmos. L'objectif ici n'est plus la description du monde comme une image idéale qui permettra l'étude de l'homme. Le monde galiléen n'est ni parfait ni idéal, il est imparfait dans sa totalité (sublunaire et supra lunaire) et c'est là sa perfection.

Le monde pour Galilée semble aussi séparé en deux au sens platonicien du terme. Mais cette fois-ci le monde des Idées est le monde de Dieu, de la géométrie. Le monde des Idées dans ce cadre représente la vérité divine. Le monde (dans sa totalité) est aussi la création d'un Démonstrateur, du Dieu chrétien. Galilée n'est pas à la recherche du paradigme utilisé par Dieu pour sa création comme Platon, il part du principe que Dieu est géomètre et qu'il a ainsi tout créé géométriquement. La géométrie étant le langage commun entre Dieu et l'homme, on peut par réminiscence retrouver la vérité de la création divine. Il adhère à l'idée platonicienne qu'une réalité mathématique se cache derrière la réalité sensible, l'interprétant littéralement. Afin que cette réminiscence se mette à l'œuvre, l'observation des phénomènes devient une nécessité. C'est par l'observation des phénomènes que les vérités géométriques se révéleront à nous. C'est dans ce sens que Galilée utilise l'observation. Le mouvement pendulaire correspond ainsi au mouvement circulaire géométriquement représenté. Il est isochrone dans son aspect géométrique et non pas dans son aspect réel et observationnel. Platon néanmoins est conscient de l'incapacité humaine d'accéder à la vérité de la création divine. C'est à ce titre que *Timée* est caractérisé comme une fable, c'est dans ce cadre que les mathématiques sont utilisées. Galilée au contraire croit aux preuves et à la vérité assurée offertes par la certitude géométrique. Cette vérité néanmoins exclut la notion du devenir, du processus naturel. Pour Platon ce qui se meut vit, ce qui vit est nécessairement doté d'une âme et ce qui se meut possède sans doute une âme. On peut



dire ainsi que la nature et ses phénomènes sous l'emprise de la géométrisation se dénaturent. Mais Galilée n'est pas seulement un géomètre, c'est aussi un astronome. Et en Astronomie les observations précises avec des moyens de mesure sont nécessaires.

##### 5. Galileo Galilei, le *mesureur* du temps

Nous avons constaté jusqu'ici que Galilée s'intéressait au pendule (comme instrument de mesure du temps de grande précision) principalement autour de la question du perfectionnement des observations astronomiques à l'aide d'instruments simples et suffisamment précis. La remarque d'Alexandre Koyré sur le non-usage général du pendule dans les théories scientifiques galiléennes reste toujours d'actualité. Nous n'avons rencontré, jusqu'ici, l'usage de la précision dans la mesure du temps que lors des observations astronomiques. Une autre activité galiléenne relative à l'astronomie nous dévoile l'intérêt tardif de Galilée pour l'usage d'un instrument de mesure précis du temps dans la solution du problème de la détermination des longitudes. Néanmoins il ne faut pas considérer qu'il s'agit de l'application du pendule à l'Horloge. Il s'agit tout simplement de l'usage du pendule et de ses propriétés comme chronomètre de durées d'observations. Pour Galilée, il n'était pas question - comme pour Christian Huygens plus tard, de proposer le pendule comme une horloge de grande précision afin de mesurer le temps d'un voyage d'un point de départ à un point de destination dans le but de déterminer les longitudes en mer. Sa pensée est liée une fois de plus au perfectionnement des observations astronomiques. Ce qui intéresse Galilée, c'est d'imaginer un instrument de précision pour la mesure du temps, un chronomètre, capable de mesurer une durée, l'intervalle de temps entre une observation astronomique et l'aube du soleil, ou entre le couché du soleil et l'observation astronomique désirée, ou encore, du début et de la fin d'une éclipse.

En 1635 Galilée évoque dans une lettre destinée à Giovanni di Beaugrand<sup>488</sup> la nécessité d'une *horloge de justesse* afin de déterminer les longitudes sur terre et sur mer. Dans cette lettre, Galilée se livre à une longue critique envers la solution du problème des longitudes proposée peu de temps avant par Jean Baptiste Morin, mathématicien et

---

<sup>488</sup> Galilei G. (1905), *Le Opere di Galileo Galilei*, Firenze : G. Barbèra, Vol. 16, 340-344.

astrologue, grand défenseur du géocentrisme. Cette solution consistait à une variante de la méthode des distances lunaires qui semblait mathématiquement correcte mais pratiquement impossible. C'est cette impossibilité que Galilée souligne dans cette lettre. Pour que cette solution soit efficace en pratique, il faut pouvoir dresser des tables des distances lunaires du méridien choisi, il faut un instrument de précision permettant de déterminer la distance angulaire de la lune à une étoile fixe, une personne très habile avec ce genre d'opérations, et enfin, dernier point mais pas le moindre, une horloge de grande justesse. À la fin de sa lettre, Galilée dit avoir trouvé lui-même une méthode certaine pour déterminer les longitudes sans avoir besoin d'utiliser aucun instrument astronomique quel qu'il soit, et sans nullement devoir se livrer à de laborieux calculs. Les seuls éléments nécessaires à la réalisation de cette méthode, dite certaine, sont la vue et une horloge de grande justesse. La fabrication d'une telle horloge, nous dit Galilée, est très facile et très simple. Ici Galilée se réfère très probablement au pendule qu'il présentera en 1637 dans son ouvrage *Operations Astronomiques*. La justesse de l'horloge en question soutenue par l'auteur est telle qu'elle n'est pas susceptible d'erreur ni pour la durée d'une minute, ni durant une heure, ni durant une journée entière, ni même durant un mois ! Galilée nous dit que sa méthode arrive à une exactitude telle que même si on avait des éclipses lunaires tous les soirs, on n'arriverait pas à la dépasser<sup>489</sup>.

Deux ans plus tard dans sa lettre du 5 Juin 1637<sup>490</sup> destinée à Laurens Reael, au cours de ses négociations avec les États Généraux de Hollande au sujet de la détermination des longitudes en mer, Galilée propose un pendule hors du commun qui montre une fois de plus l'ingéniosité de son créateur. L'objectif de cette lettre est de donner des solutions aux divers problèmes que l'on peut rencontrer quand on effectue des observations astronomiques sur un navire. Après avoir répondu aux questions concernant la stabilité du télescope et de l'observateur, il décrit un instrument solide de mesure du temps. Cet instrument Galilée l'appelle « mesureur de temps ». Il s'agit d'un pendule manuel solide. Les points d'importance majeure pour Galilée lors d'une réalisation du pendule étaient

---

<sup>489</sup> Ibid. 344 « a me, dico, il quale pretendo d'haverne uno tanto facile e sicuro, che senza bisogno nè di strumenti nè di caccoli astronomici, con la sola vista e con un giusto orologio (la fabrica del quale ho io facile e semplice, e così giusta che non ammetterà errore d'un solo minuto, non solamente in un'hora, ma nè in un giorno nè in un mese), ci darà sopra tutta la terra e il mare la longitudine più essata che se ogni notre havessimo in qualsivoglia orizzonte una eclisse lunare. »

<sup>490</sup> Galilei G. (1906), Vol. 17, 96- 105.

d'éviter autant que possible les frictions produites entre les pièces qui le constituent, de minimiser les effets du ralentissement du pendule dus à la résistance de l'air et d'assurer un mouvement oscillatoire qui se produira toujours dans le même plan. Mais laissons Galilée nous le présenter lui-même.

« Je viens maintenant au deuxième artefact qui est fait pour augmenter énormément la précision des observations astronomiques. Je parle de mon mesureur de temps, dont la précision est telle qu'il ne donne pas seulement la quantité exacte des heures, des minutes et des secondes mais encore des troisièmes, si l'on pouvait énumérer leur fréquence. Et la précision est telle qu'en fabriquant deux, quatre ou six instruments, ils fonctionneraient avec une telle correspondance l'un à l'autre en sorte qu'ils ne diffèrent pas entre eux, même lors d'un seul pouls de poignet, non seulement durant une heure, mais un jour et même un mois. (...) De ce vrai et stable principe (l'isochronisme) je déduis la structure de mon mesureur du temps utilisant non pas un corps grave suspendu par un fil mais un pendule de matière solide et lourde, comme par exemple du laiton ou du cuivre. Je donne à ce pendule la forme d'un secteur de cercle de douze ou quinze degrés, dont le demi-diamètre est de deux ou trois palmes ; plus il est large, plus il est facile à utiliser. Je fais la partie du secteur le long du demi-diamètre grosse au milieu et mince vers les extrémités, qui finit avec une ligne très tranchante en sorte d'éviter autant que possible la résistance de l'air qui le freine. Cette section est perforée au centre, et traversée par une petite barre de fer qui a la même forme que celle des balances romaines. La petite barre finit avec un angle posé sur deux supports de bronze en sorte qu'elle ne dépense pas trop à cause du mouvement fréquent du secteur. Afin de le faire fonctionner pour le temps nécessaire, il est aussi convenable que la personne qui travaille avec ce pendule donne une impulsion forte au secteur en sorte que ces oscillations soient grandes. Et quand les oscillations seront comptées avec patience durant une journée naturelle, mesurant la journée par le moyen de la révolution d'une étoile fixe, on pourra avoir le nombre d'oscillations pour une heure, une minute et pour les parties mineures également. Une fois que la première expérience sera faite avec un pendule de longueur quelconque, on pourra le raccourcir ou l'allonger, en sorte que chaque oscillation corresponde à une seconde. Par la suite, afin d'éviter l'ennui de la personne qui doit compter les oscillations de manière continue, il y a une solution très confortable, qui est la suivante : si l'on fabrique le secteur de telle manière que du milieu

de la circonférence du secteur ressorte un stylet petit et mince, qui dans son mouvement frappe un poil à une de ses extrémités et que le poil touche les dents d'une roue, qui est aussi légère que du papier, placée sur un plan horizontal proche du pendule ; et si la roue a des dents faites comme celles d'une scie, c'est-à-dire, avec l'un des deux côtés perpendiculaire au plan de la roue et l'autre côté obliquement incliné (...) ceci marchera de telle manière que le poil frappera contre le côté perpendiculaire de la dent, il le mouvra et puis le même poil reviendra et caressera le côté oblique de la dent sans le mouvoir et il tombera sur le point le plus bas de la prochaine dent. De cette manière, à chaque passage du pendule la roue se meut d'un espace correspondant à l'espace de l'intervalle d'une de ses dents et quand le pendule revient, la roue ne se meut pas. Le mouvement de la roue par conséquent sera toujours circulaire dans une seule direction et, si les dents sont marquées avec des chiffres, on peut observer le nombre de dents passées, et par conséquent le nombre d'oscillations et d'intervalles de temps passés. Vous pouvez adapter encore autour du centre de cette première roue une autre roue avec un petit nombre de dents qui en touche une autre avec un bien plus grand nombre de dents. Par le mouvement de laquelle nous pouvons apprendre le nombre de révolutions en sorte que quand par exemple la deuxième roue aura tourné une fois (aura fait une révolution entière) la première aura tourné 20, 30, ou 40 ou autant de fois que vous voulez.»<sup>491</sup>

---

<sup>491</sup> Galilei G. (1906), Vol. 17, 100- 105. Traduction personnelle basée principalement sur la traduction anglaise parue dans Valleriani M. (2010), *Galileo Engineer*, Netherlands : Springer:

«Vengo ora al secondo artificio per accrescere in immenso le puntualissime osservazioni astronomiche. parlo del moi misuratore del tempo, la precisione del quale è tanta e tale, che non solamente ci darà la quantità esatta delle ore e minuti primi e secondi ed anco terzi, se la frequenza loro fusse da noi numerabile ; e la giustezza è tale, che fabbricati due, quattro o sei di tali strumento, cammineranno tra di loro tanto giustamente, che l'uno non differirà dall'altro, non solamente in un'ora, ma in un giorno nè in un mese di tempo, pure d'una pulsazione di polso. (...) Da questo verissimo e stabile principio traggio io la struttura del mio numeratore del tempo, servedomi non d'un peso pendente da un filo, ma di un pendolo di materia solida e grave, qual sarebbe ottone o rame; il qual pendolo fo in forma di settore di cerchio di dodici o quindici gradi, il cui semidiametro sia due o tre palmi; e quanto maggiore sarà, con minor tedio se gli potrà assistere. Questo tal settore fo più grosso nel semidiametro di mezzo, andandolo assottigliando verso i lati estremi, dove fo che termini in una linea assai tagliente, per evitare quanto si possa l'impedimento dell'aria, che sola lo va ritardando. Questo è perforato nel centro, pel quale passa un ferretto in forma di quelli sopra i quali si voltano le stadere; il qual ferretto, terminando nella parte di sotto in un angolo, e posando sopra due sostegni di bronzo, acciò meno consumino pel lungo muovergli il settore, rimosso

On trouve cette lettre et l'instrument en question mentionnés souvent dans l'historiographie<sup>492</sup>. Peu d'articles ont cependant traité de cet instrument et sans toute l'attention que la description d'un tel instrument mérite. Nous avons effectué une étude

---

esso settore per molti gradi dallo stato perpendicolare (quando sia bene bilicato), prima che fermi anderà reciprocando di qua e di là numero grandissimo di vibrazioni ; le quali per poter andare constinuando secondo il bisogno, converrà che chi gli assiste gli dia a tempo un impulso gagliardo, riducendolo alle vibrazioni ample : e fatta, per una volta tanto, con pazienza la numerazione delle vibrazioni che si fanno in un giorno naturale, misurato colla rivoluzione d'una stella fissa, s'averà il numero delle vibazioni d'un'ora, d'un minuto e altra minor parte. Portassi ancora, fatta questa prima esperienza col pendulo di qualsivoglia lunghezza, crescerlo o diminuirlo, sicchè ciascheduna vibrazione importi il tempo di un minuto secondo ; imperocchè le lunghezze di tali penduli mantengono fra di loro duplicata proporqione di quella de i tempi, come per essemplio : Posto che un pendulo di lunghezza di quattro palmi faccia in un dato tempo mille vibrazioni, quando noi volessimo la lunghezza d'un altro pendulo che nell'istesso tempo facesse duplicato numero di vibrazioni, bisogna che la lunghezza del pendolo sia la quarta parte della lunghezza dell'altro ; ed in somma, come si può vedere coll'esperienza, la moltitudine delle vibrazioni de i pendolo di lunghezze diseguali è sudduplicata di esse lunghezze.

Per evitar poi il tedio di chi dovesse perpetuamente assistere a numerare le vibrazioni, ci è un assai comodo provvedimento, in questo modo : cioè facedo che dal mezzo della circonferenza del settore sporga in fuori un piccolissimo e sottilissimo stiletto, il quale nel passare percuota in una setola fissa in una delle sue estremità, la qual setola pesi sopra i denti d'una ruota leggerissima quanto una carta, la quale sia posta in piano orizzontale vicina al pendolo, ed avendo intorno denti a guisa di quelli d'una sega ; cioè con uno de i lati posto a squadra sopra il piano della ruota, e l'altro inclinato obliquamente, presti questo officio, che nell'urtare la setoletta nel lato perpendicolare del dente, lo muova, ma nel ritorno poi la medesima setola nel lato obliquo del dente non lo muova altrimenti, ma lo vadia strisciando e vadia ricadendo a piè del dente susseguente : e così nel passaggio del pendolo si muoverà la ruota per lo spazio d'uno de'suoi denti, ma nel ritorno del pendolo essa ruota non si muoverà punto ; onde il suo moto ne riuscirà circolare sempre per l'istesso verso, ed avendo contrassegnati con numeri i denti, si vedrà ad arbitramento la moltitudine de i denti passati, ed in conseguenza il numero delle vibrazioni e delle particelle del tempo decorse. Si può ancora intorno al centro di questa ruota adattarne un'altra di piccolo numero di denti, la quale tocchi un'altra maggior ruota dentata, dal moto della quale potremo apprendere il numero dell'interè rivoluzioni della prima ruota, compartendo la moltitudine de i denti in modo che, per esemplo, quando la seconda ruota avrà dato una conversione, la prima ne abbia date 20,30 o 40 o quante più ne piacesse. »

<sup>492</sup> Voir à titre d'exemple : Ariotti P.E. (1972) « Aspects of the Conception and Development of the Pendulum in the 17th century », in *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 8, 368, Vanpaemel G. (1989), « Science Disdained: Galileo and the Problem of Longitude », in *Italian Scientists in the Low Countries in the XVIIth and XVIIIth Centuries*, Maffeoli C. S. & Palm L. C. (eds.), Amsterdam: Rodopi, 123, Bedini S. (1991), *The pulse of Time*, Firenze : L. S. Olschki, 19-21 & 23, etc.

détaillée de ce pendule que nous allons présenter ci-dessous. Nous allons discuter dans un premier temps deux interprétations de la forme du pendule dans la littérature avant de présenter la nôtre.

En 1985, dans l'article de Dobson R.D. intitulé *Galileo Galilei and Christiaan Huygens*<sup>493</sup>, il est question de cet instrument. L'objectif principal de cet article est la discussion de la priorité de l'application du pendule à l'Horloge comme régulateur de son mouvement entre Huygens et Galilée. Dans ce cadre le premier mesureur du temps proposé par Galilée est discuté et dessiné. L'auteur attire notre attention sur certains aspects de l'instrument galiléen. Le premier est que ce pendule ne peut pas conserver un mouvement perpétuel, il a ainsi besoin qu'on lui donne des impulsions régulièrement afin qu'il puisse continuer sa marche. Et le second est que ce pendule est destiné à mesurer la durée du temps d'une observation, ou le moment de la fin de l'observation céleste jusqu'à l'aube du soleil. Il ne peut pas ainsi être considéré comme une Horloge de précision mais comme un chronomètre précis. Les deux points se trouvent en accord avec la description et les intentions de Galilée. On ne trouve pas néanmoins d'analyse détaillée de l'instrument en question, Dobson partant du principe qu'un dessin vaut mieux que des mots, et il n'a pas tort. Il essaye de suivre la description de Galilée à la lettre à un détail près. En ce qui concerne les roues dentées, ou le système de comptage des vibrations, Galilée propose trois roues et Dobson n'en dessine qu'une, la première. Voici le dessin du mesureur galiléen vu par l'auteur de cet article :

---

<sup>493</sup> Dobson R.D. (1985), « Galileo Galilei and Christiaan Huygens », in *Antiquarian Horology*, 15, 261-270.

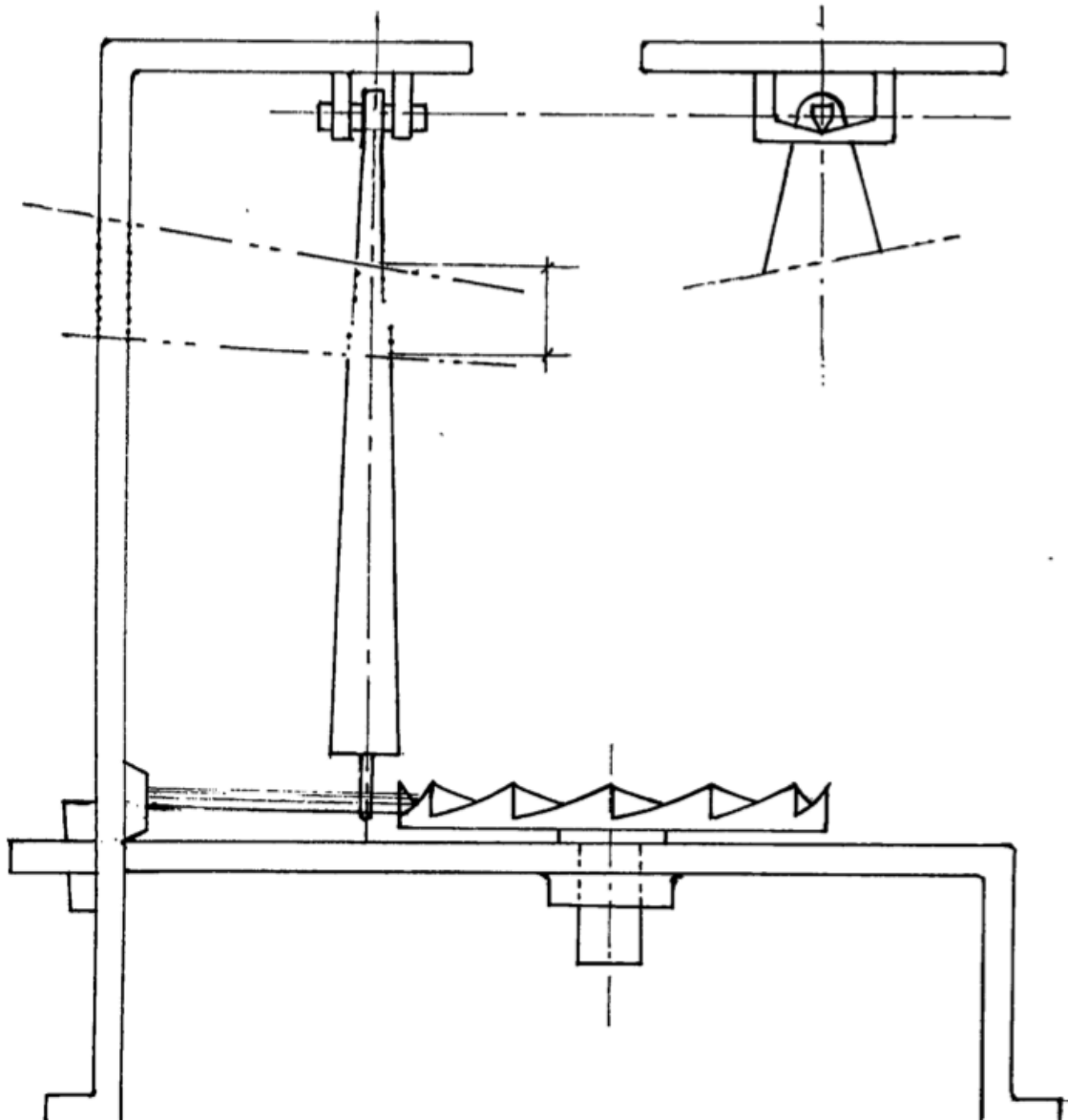


Fig. 5.5. « L'horloge comme suggérée par Galileo Galilei aux Etats Généraux de Hollande en Mars 1636 comme conçue par l'auteur de cet article. »<sup>494</sup>

Nous trouvons une courte description du pendule galiléen dans l'article de Westfall<sup>495</sup> que nous avons étudié dans le premier chapitre et que nous avons simplement mentionnée à ce moment-là. Westfall reprend la description galiléenne et reste fidèle à

<sup>494</sup> Dobson R.D. (1985), 262. Trad. pers. : « The clock as suggested to the States General of Holland by Galileo Galilei in March 1636 as conceived by the writer of this article. » L'auteur se réfère visiblement à la lettre de Galilée destinée à Laurens Reael du mois de juin 1637. Nous n'avons pas trouvé de lettre destinée aux Etats Généraux d'Hollande en mars 1636 dans la correspondance de Galilée, comme restituée par les Éditeurs des Œuvres Complètes.

<sup>495</sup> Westfall R.S. (1990), 68-69.

quelques exceptions près. Il nous dit que le pendule est fait de bronze, alors que Galilée nous propose soit du laiton soit du cuivre. Concernant la taille du pendule, l'auteur fait la conversion de palmes en pieds anglais, et il nous dit que deux ou trois palmes représentent environ deux ou trois pieds (60,96cm ou 91,44cm). Westfall souligne comme Dobson, qu'il ne s'agit pas d'un mesureur du temps absolument exact et que son mouvement n'est pas perpétuel. Il faut donner des impulsions régulières afin d'assurer la marche continue du pendule. Et voici l'interprétation du pendule galiléen comme imaginé par l'auteur :



Fig. 5.6.

Le paragraphe de Westfall consacré au mesureur de Galilée se clôt avec la phrase suivante :

« Je ne suis pas au courant qu'on l'ait jamais construit. Je veux bien le décrire néanmoins comme la première horloge de précision. »<sup>496</sup> À ce titre nous allons étudier ce pendule de près, proposer une interprétation différente et analyser les difficultés de sa réalisation.

Dans la lettre destinée aux États Généraux de Hollande mentionnée plus haut, c'est la première fois que Galilée parle d'un instrument de mesure du temps précis lié à la

---

<sup>496</sup> Ibid. Trad. pers. : « I am not aware that one was ever constructed. I am willing nevertheless to describe it as the first precision clock. »



détermination des longitudes. Nous avons vu que Galilée commence très tardivement, en 1637, à considérer le pendule comme un instrument de grande précision au sujet de la mesure du temps, mais toujours en tant que chronomètre au service des observations astronomiques. Dans sa lettre de 1639 destinée à Baliani, malgré le fait qu'il lui explique comment trouver la longueur d'un pendule à secondes ( $T=1\text{sec}$ ), à la fin il souligne que si Baliani veut une grande précision dans la mesure du temps de la chute d'un corps il vaut mieux utiliser les balances et comparer les quantités d'eau coulée. Ici il présente le pendule comme un instrument précis de la mesure du temps, le pendule en question n'est donc plus un pendule simple. C'est un chronomètre à utiliser lors des observations astronomiques des satellites de Jupiter pour la détermination des longitudes sur un navire. Un pendule simple ne serait pas capable de conserver son mouvement oscillatoire à bord d'un navire à cause des perturbations provoquées par ce dernier. Rien qu'avec les petits sauts du corps attaché au fil, la longueur du pendule serait d'une grande variabilité. Le choix d'un corps solide offrait une grande stabilité pour une telle opération, tant pour la conservation d'une longueur stable, que pour celle d'un même plan d'oscillation. La matière proposée par l'auteur est le laiton ou le cuivre. Galilée ne nous donne aucune information sur le poids de ce secteur mais il demande à ce qu'il soit lourd. La forme de ce pendule solide est celle d'un secteur de cercle de 12 ou 15 degrés. Pour sa longueur Galilée nous propose 2 ou 3 palmes. Ici on se trouve dans le même bouleversement que le Père Mersenne devant la valeur du *braccio* florentin. Pour déterminer cette valeur nous avons des indices donnés par Galilée et Mersenne. Galilée dans son ouvrage *Operations Astronomiques* décrivant son pendule à secondes ( $T=1\text{sec}$ ) nous propose une longueur de un *palmo* ou un demie *braccio*. De là on peut déduire la relation entre *palmo* et *braccio*,  $1 \text{ palmo} = \frac{1}{2} \text{ braccio}$ . Pour la valeur d'un *braccio* nous avons d'un côté la valeur déterminée par Mersenne égale à 0,27 m, et la lettre de Baliani où il dessine sur la marge la ligne *ED* de 0,223 m. Ces longueurs représentent la longueur du pendule qui bat la seconde, de  $T=1\text{sec}$ . Les résultats, vu les difficultés de calibration du pendule par le mouvement des étoiles, sont vraiment admirables. Nous savons que, si l'on utilise la valeur acceptée aujourd'hui de l'accélération de la gravité, pour une période égale à 1sec la longueur du pendule simple est égale à 0,249m pour des petites oscillations. Galilée nous dit que pour construire un pendule à secondes ( $T=1\text{sec}$ ) sa longueur doit être d'1 *palmo* =  $\frac{1}{2} \text{ braccio}$ . Si l'on considère les difficultés du calibrage du

pendule et les erreurs que cette opération peut entraîner, plus les erreurs éventuelles lors de la procédure d'énumération du nombre d'oscillations, on peut dire qu'idéalement une palme est égale à environ 0,25 m ; suivant notre raisonnement la valeur proposée par Westfall ne semble pas adéquate. Afin de réaliser le secteur de cercle en question, il nous faut ainsi un cercle de rayon soit de deux palmes=0,5m soit trois palmes=0,75m.

Une autre information sur la forme du pendule est la différence d'épaisseur entre le milieu et les extrémités du secteur. Galilée pour éviter au maximum la résistance de l'air, propose de limer les deux côtés extrêmes/extrémités du secteur. Le résultat doit être celui d'un objet très tranchant comme un couteau. L'épaisseur du secteur ne nous est pas donnée par Galilée. La matière de la partie supérieure du secteur diminuera ainsi obligatoirement par le limage. Cette information est très importante pour la suite de la description du pendule. Ce secteur, nous dit Galilée, est perforé au centre. La notion du centre n'est pas clarifiée par l'auteur, ce qui est aussi un indice d'évidence pour lui. Nous pouvons établir plusieurs hypothèses ; le centre pourrait signifier soit le centre du cercle initial à partir duquel on a découpé le secteur (comme Dobson et Westfall l'ont supposé sans justification), soit peut-être la moitié du rayon du cercle. Nous ne pouvons pas considérer comme centre celui du cercle initial pour deux raisons physiques ; la partie supérieure n'a pas suffisamment de matière pour qu'on puisse la perforer, nous sommes ainsi obligés soit d'en couper une partie, comme le fait Dobson dans son interprétation (ou de perforer plus bas que le centre du cercle) soit de rajouter de la matière comme dans l'interprétation de Westfall. Même si on arrive à perforer la partie supérieure du secteur nous ne pouvons alors plus garantir le même plan d'oscillations. La deuxième proposition sera celle que l'on utilisera, mais alors, pour quelle raison Galilée ne nous aurait-il pas dit directement qu'il s'agissait du milieu du rayon ou du quart du diamètre du cercle ? Il nous faut clarifier ce point. Si l'on considère le secteur comme un triangle, ce que l'on peut faire en raison de sa faible ouverture de 12 à 15 degrés, qui revient à assimiler l'arc à la corde, quatre centres géométriques différents peuvent être considérés :

- l'intersection des médiatrices, le centre du cercle circonscrit.

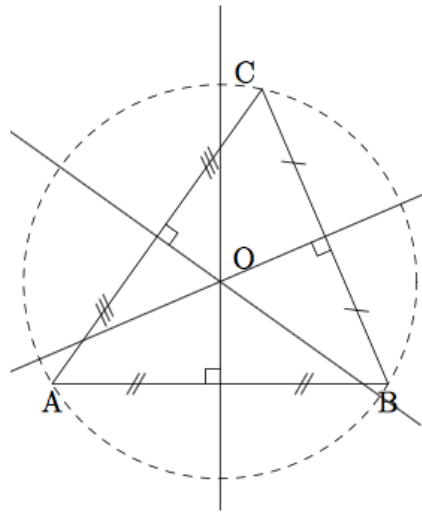


Fig. 5.7.

- l'intersection des bissectrices, le centre du cercle inscrit.

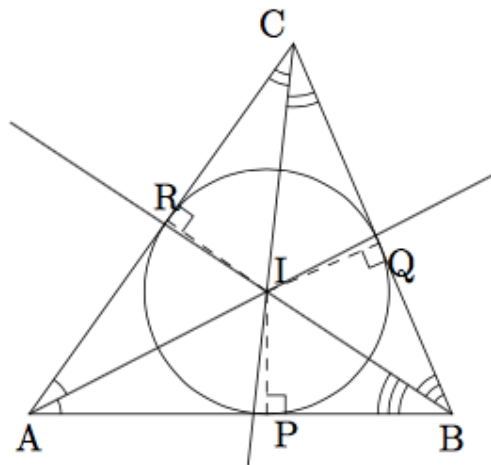


Fig. 5.8.

- l'intersection des hauteurs, l'orthocentre.

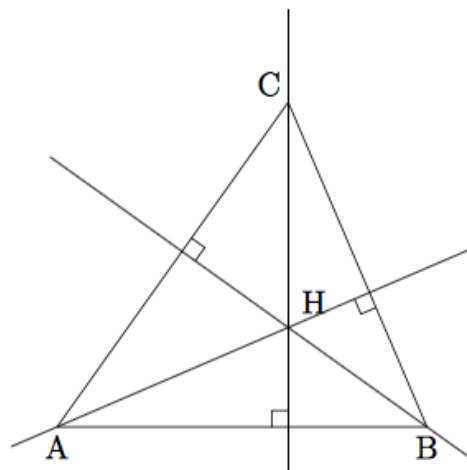


Fig. 5.9.

- ou l'intersection des médianes, le centre de gravité.

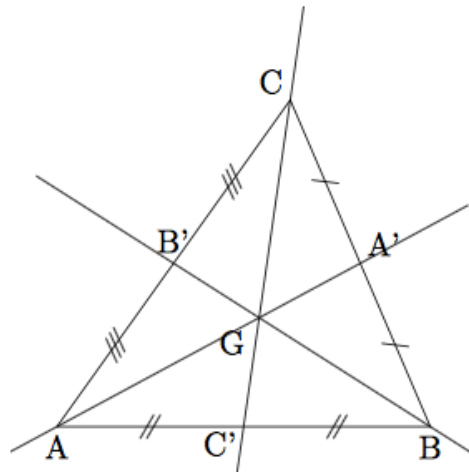


Fig. 5.10.

Le centre de gravité doit être rejeté car il ne se produit pas d'oscillations d'un pendule solide autour d'un axe passant par ce point. L'orthocentre doit être rejeté également car sur l'exemple d'un secteur assimilé à un triangle isocèle d'angle au sommet 12 ou 15 degrés, il se situerait en-dessous du centre de gravité et entraînerait donc un basculement du pendule de 180 degrés. Il en serait de même avec le centre du cercle inscrit. Quant au centre du cercle circonscrit, il coïncide avec une très bonne approximation avec un point situé au milieu de l'axe de symétrie du triangle. Nous pouvons donc prendre  $R/2$  en première approximation. Galilée par la suite nous dit que par l'ouverture passe une barre de fer. Cette barre est comme celles que l'on trouve sur les balances romaines. La forme de cette barre semble être cylindrique, mais il existe également des barres liées à cet instrument avec trois côtés. Galilée ne nous donne pas d'information précise sur la taille de cette barre, mais il nous dit que la barre en question finit en angle. Il y a deux interprétations possibles. Soit l'on considère la forme « barre à trois côtés », comme le font Dobson et Westfall et nous obtenons ainsi un petit triangle aux extrémités, dont l'un des angles se trouve posé sur un support en bronze ; soit l'on considère que les extrémités de la barre sont de forme différente, celle d'un cône. Si l'on considère que la première interprétation est la bonne, c'est comme si Galilée nous donnait à nouveau la même information, comme s'il se répétait. La deuxième interprétation nous paraît être la bonne, parce que nous pensons que Galilée ne se répète pas mais complète l'information. Si Galilée se réfère aux balances romaines pour

la forme de la barre dans son intégralité, c'est parce qu'il considère que tout le monde sait à quoi ressemble une balance romaine.

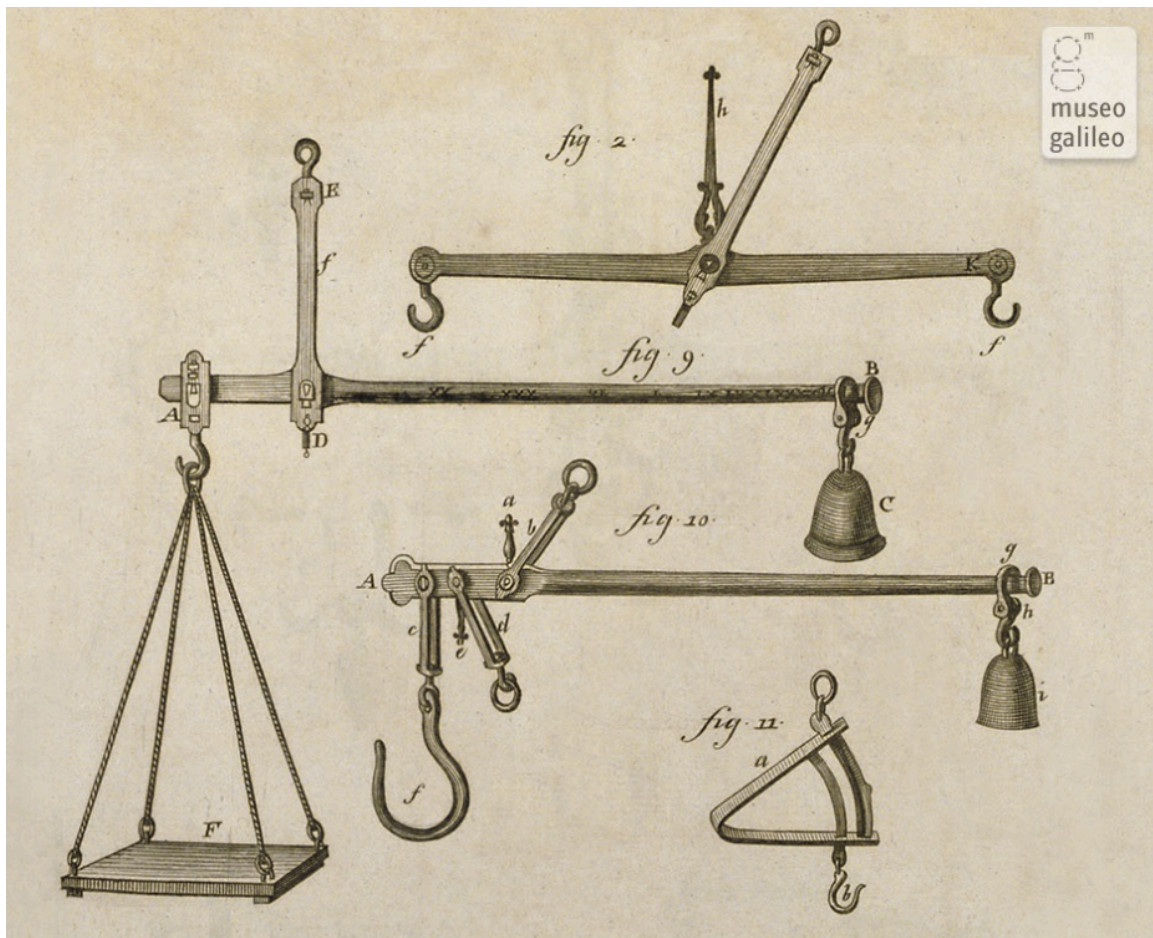


Fig. 5.11. Nous avons trouvé le dessin des balances dites d'invention romaines dans le catalogue du site officiel du Museo Galileo de Florence<sup>497</sup>.

L'information sur la forme des extrémités de cette barre doit être une information supplémentaire et non pas une phrase d'appui. De plus cette barre est posée sur deux supports en bronze afin d'éviter au maximum les frictions tout au long de la marche du pendule. Westfall a évité la mise en image du posage de cette barre, mais Dobson a livré une interprétation. Suivant cette dernière les extrémités de la barre sont en forme de triangle et l'une des pointes de ce triangle est posée sur un support. La proposition de Dobson crée plus des problèmes qu'elle n'en résout. Le pendule en question est destiné aux voyages à bord d'un navire. Lors de ces voyages si la barre reste posée ainsi, le

<sup>497</sup> <https://catalogue.museogalileo.it/gallery/Steelyard.html>

pendule risque de se déplacer à la verticale, à l'horizontale et même en diagonale. Ce déplacement ajoute des frictions au mouvement du pendule.

Galilée ensuite nous invite à donner de grandes impulsions au pendule afin d'avoir un plus grand nombre d'oscillations. Ce conseil découle du principe d'isochronisme du pendule indépendamment de l'amplitude d'oscillation considéré comme vrai par l'auteur. Pour sa calibration, l'auteur nous propose le processus commun de comptage du nombre d'oscillations par rapport aux étoiles fixes et nous invite à régler la longueur du pendule en sorte qu'il bat l'unité temporelle désirée. L'auteur est conscient des difficultés et des efforts que demande le comptage des oscillations pendulaires. Il propose ainsi dans un deuxième temps un système d'engrenage qui nous dévoilera facilement le nombre d'oscillations. Ce système suppose un stylet à la partie inférieure du pendule, un poil de porc, et contient trois roues dans son ensemble. La première roue est assez particulière. Elle est très légère et dentée. Ses dents sont fabriquées de sorte qu'elles offrent une surface verticale d'un côté et une surface oblique de l'autre. Le stylet du secteur frappera le poil à chaque passage et le poil à son tour fera tourner la roue dentée. Mais il ne la fera tourner que lors d'un passage sur deux. Car au deuxième passage le poil ne fera que caresser le côté oblique de la dent.

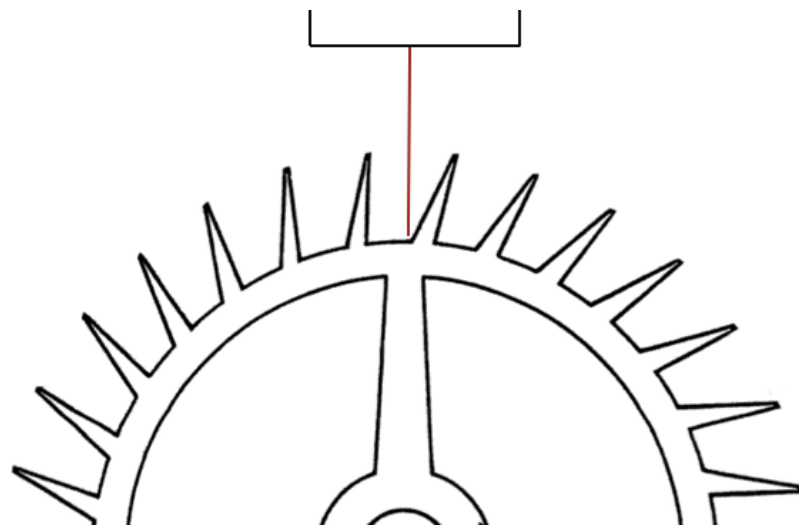


Fig. 5.12.

Connaissant le rapport entre le nombre de dents et les révolutions des roues, nous pouvons construire un système de telle manière qu'on puisse facilement compter le

nombre de révolutions des roues et ainsi le nombre d'oscillations pendulaires<sup>498</sup>. Ce système ressemblera à la figure suivante où  $C$  est la première roue qu'on appelle en Horlogerie la roue du centre,  $c$  est la deuxième petite roue qu'on appelle le pignon de la roue du centre et  $M$  est la troisième qu'on appelle la roue moyenne. Ce système est la base de toute horlogerie mécanique.

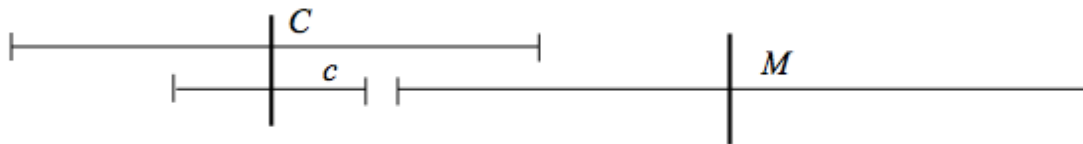


Fig. 5.13.

Il est vrai que la description de Galilée est difficile à déchiffrer, et son auteur ne vient pas à notre aide. Il est vrai également que si l'on oublie la fonction première de ce pendule (comme chronomètre au service des observations astronomiques pour la détermination des longitudes en mer) et que l'on ne pense pas à sa réalisation, on peut tomber dans des pièges interprétatifs assez facilement. Il n'y a pas une seule interprétation qui soit la bonne de l'instrument décrit par Galilée. Nous avons pensé qu'en réalisant ce pendule, on allait peut-être réussir à concrétiser la description de l'auteur. Cela a été rendu possible grâce aux techniciens du service MUTA de l'Observatoire de Paris. À l'époque de sa construction, nous avons utilisé la valeur de la palme donnée par les proportions humaines étudiées par Leonardo Da Vinci. Nous avons considéré qu'une palme était égale à environ 12,4cm. Notre secteur est de la taille de deux palmes (24,8cm) et d'angle 15 degrés. Nous avons abandonné l'idée de perforer le secteur dans sa partie supérieure pour les raisons exposées plus haut. Nous avons choisi comme centre d'oscillation le centre du cercle circonscrit. Le choix de ce centre était fait par rapport à sa distance du centre de gravité avec un avantage supplémentaire considérable. Puisque les observateurs devaient relancer le pendule régulièrement, pour assurer une continuité à son mouvement, avec la partie supérieure du secteur exposée, ils pouvaient le relancer très facilement. La non perforation du secteur au centre du cercle, facilite la régularité

<sup>498</sup> Si l'on considère  $N_1$  le nombre de tours de la première roue et  $N_2$  le nombre de tours de la deuxième roue,  $Z_1$  le nombre de dents de la première roue et  $Z_2$  le nombre de dents de la deuxième roue nous avons le rapport :  $\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$ .

de sa marche assurée manuellement. Nous avons créé une barre cylindrique en acier inox dont les extrémités sont en forme de cônes et nous l'avons fixée au secteur en force. Notre système de posage est inspiré par l'art de l'horlogerie afin qu'on puisse offrir une stabilité au mouvement du secteur. Nous avons fabriqué des supports en laiton et pour le posage des extrémités de la barre nous avons fabriqué des paliers en bronze. Notre système nous permet de limiter les frictions et en rajoutant des goujons nous pouvons régler le serrage de la barre d'acier. Les figures suivantes montrent bien l'idée que l'on se fait du pendule de Galilée. Les deux premières images qui suivent représentent notre interprétation du système galiléen dans son ensemble. Nous n'avons réalisé néanmoins que la première partie de ce système. La partie comportant les engrenages présente de multiples difficultés pour sa réalisation et nous sommes toujours en train de réfléchir à la bonne interprétation du texte afin que le résultat soit opérationnel.

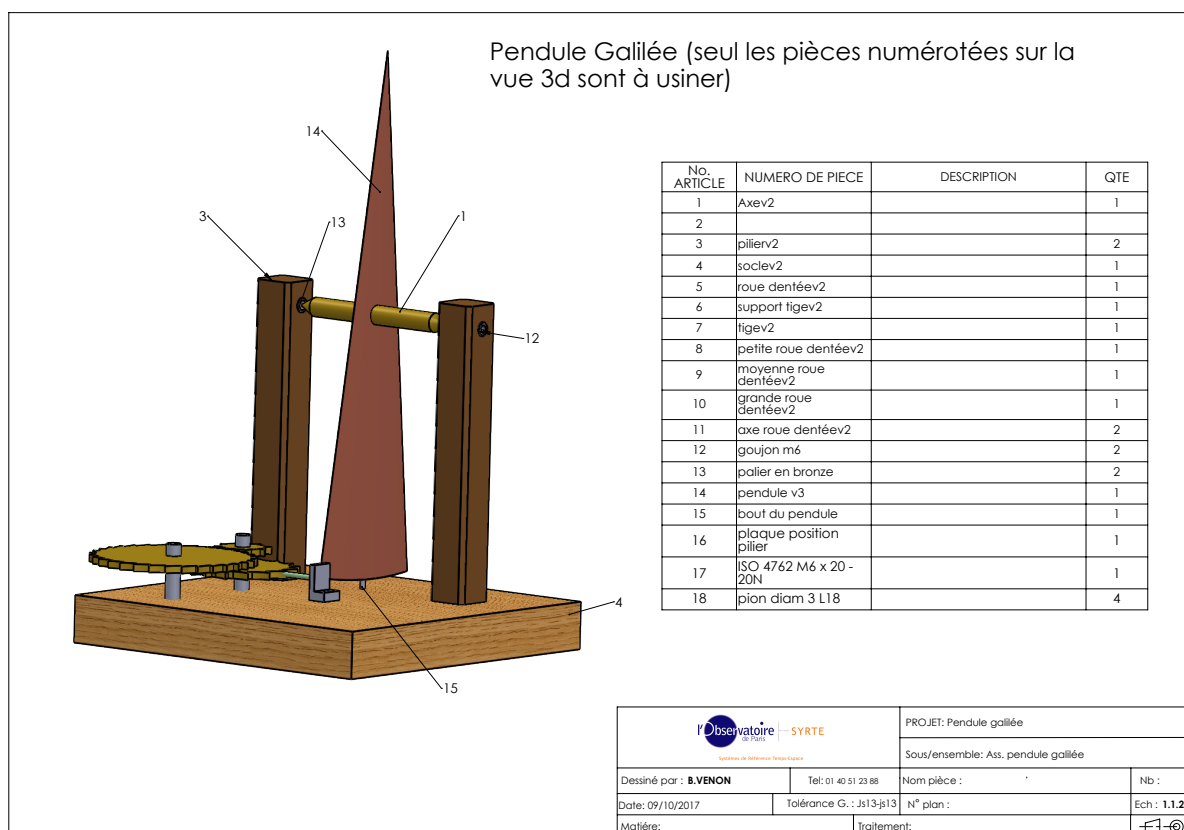


Fig. 5.14.



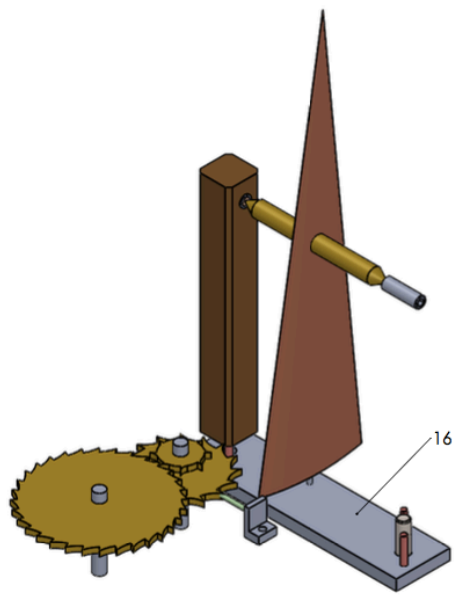


Fig. 5.15.

Les figures suivantes présentent chaque pièce que nous avons utilisée pour la réalisation du pendule avec une indication de la taille réelle de chaque partie constitutive de notre système. Ce détail est important car entre la conception théorique et la réalisation du pendule, sa taille a subi des transformations. Comme par exemple la taille initiale du secteur a diminué après le limage. La taille réelle du secteur ne correspond pas ainsi au 24,8cm de notre hypothèse théorique mais à 22,11cm.

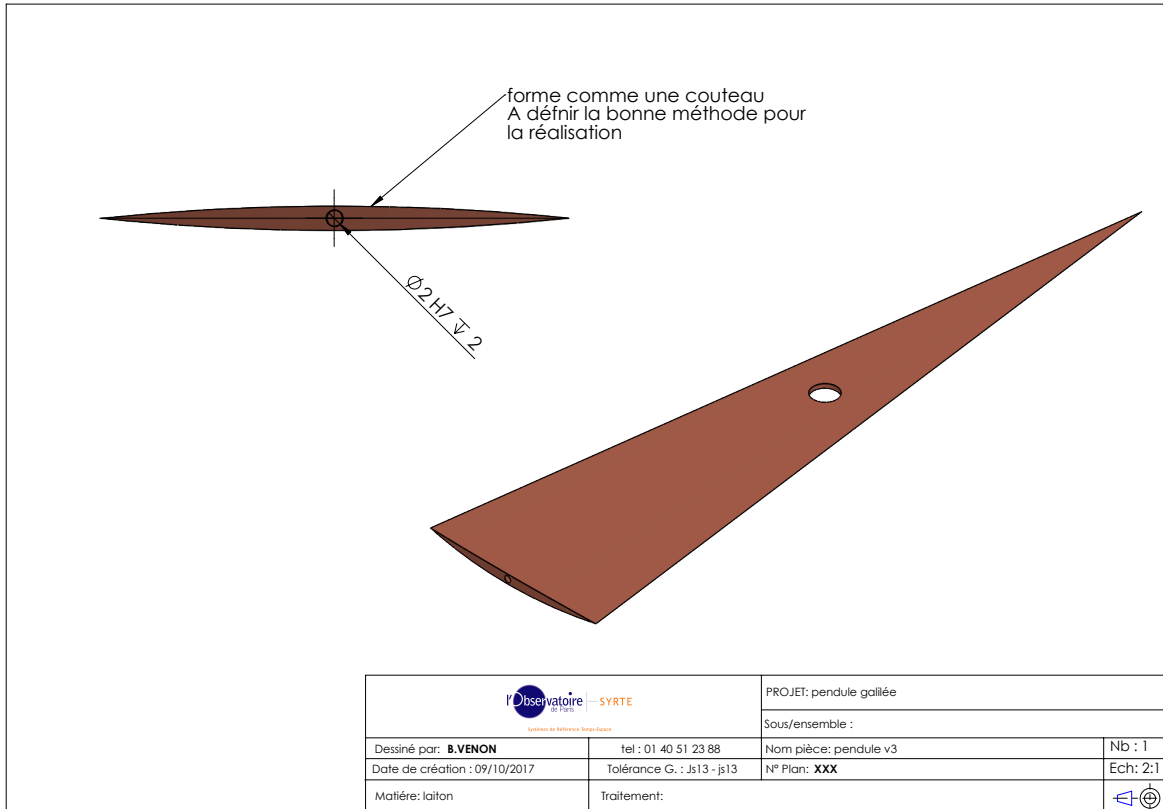


Fig. 5.16.

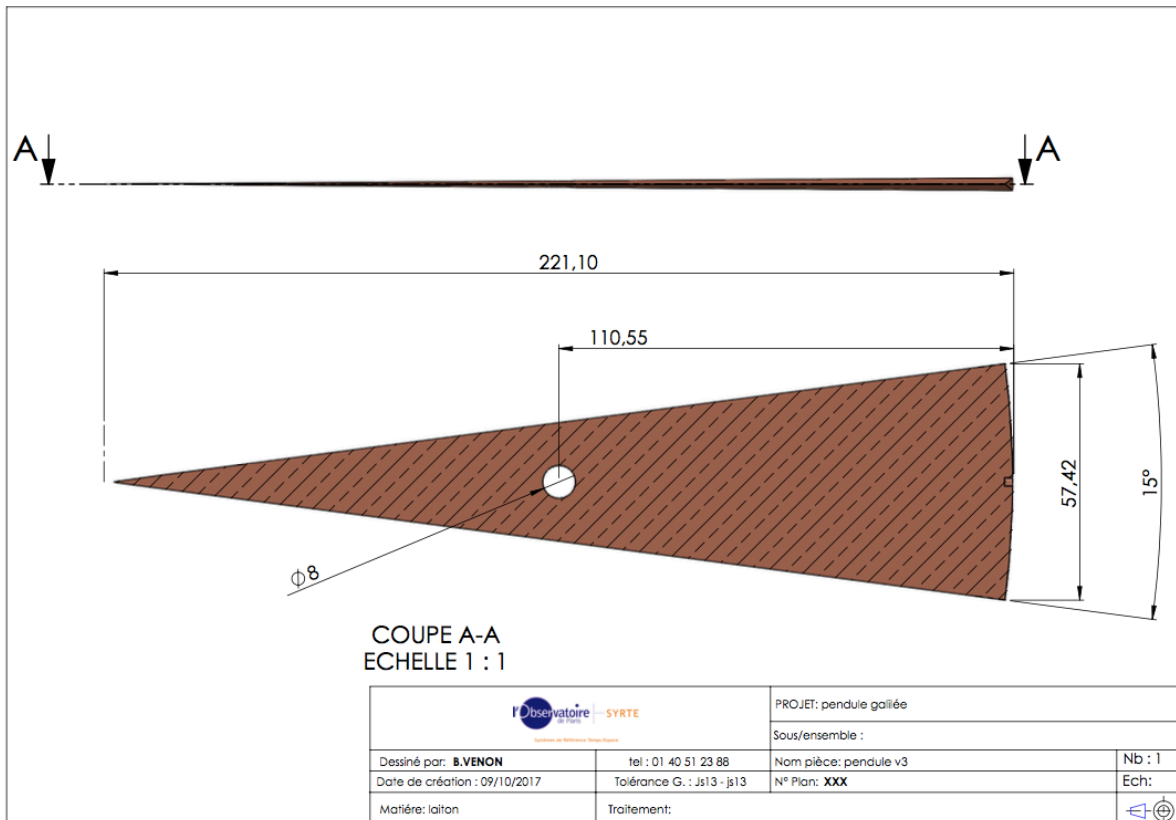


Fig. 5.17.

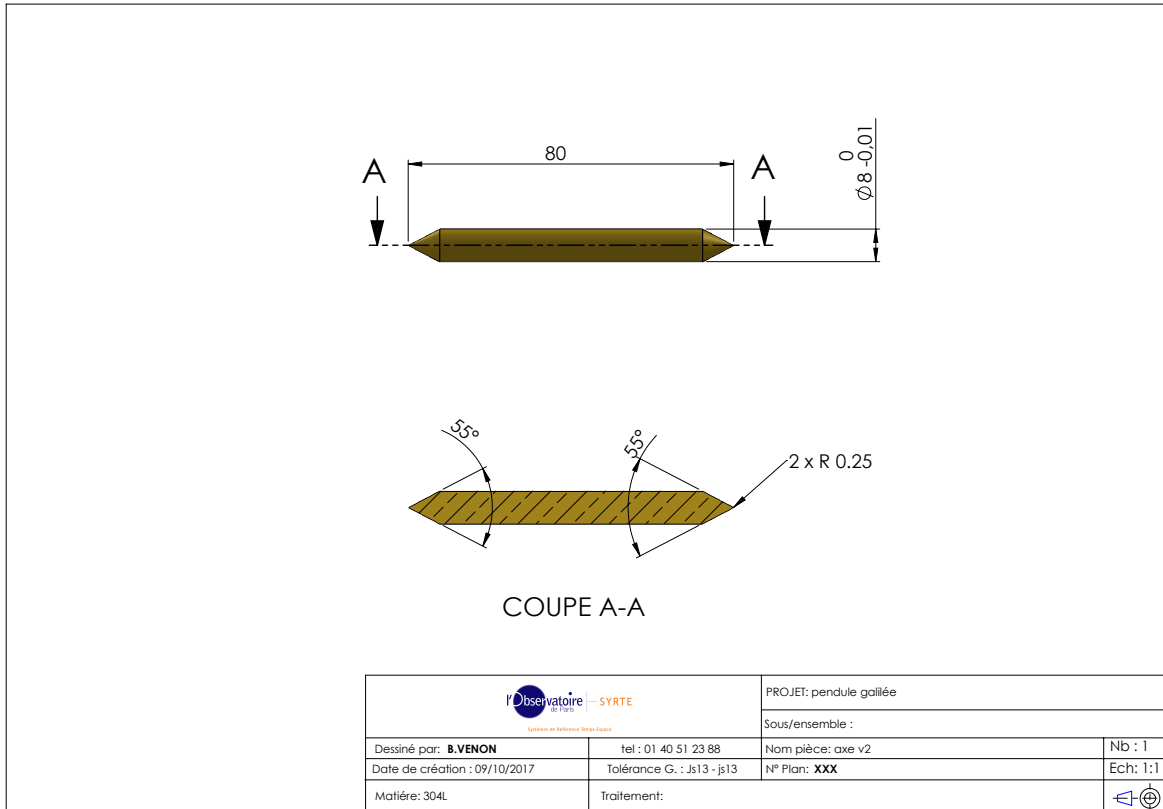


Fig. 5.18.

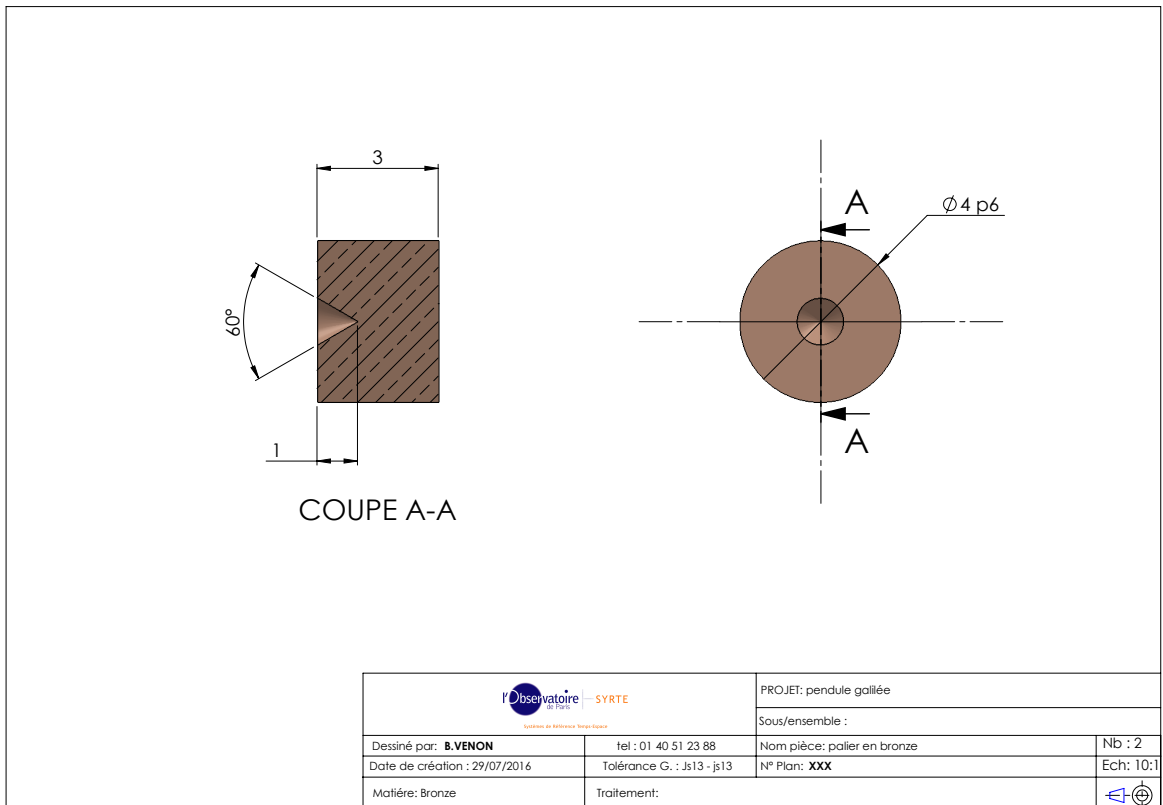


Fig. 5.19.

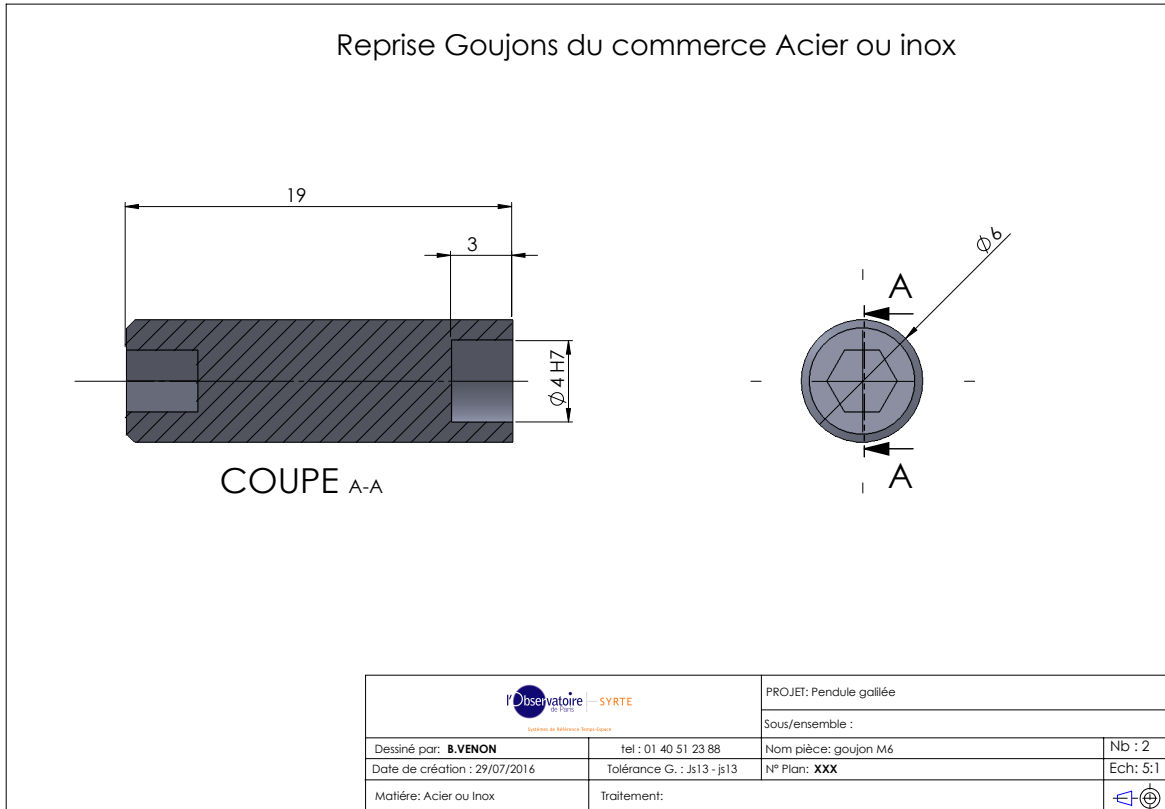


Fig. 5.20.

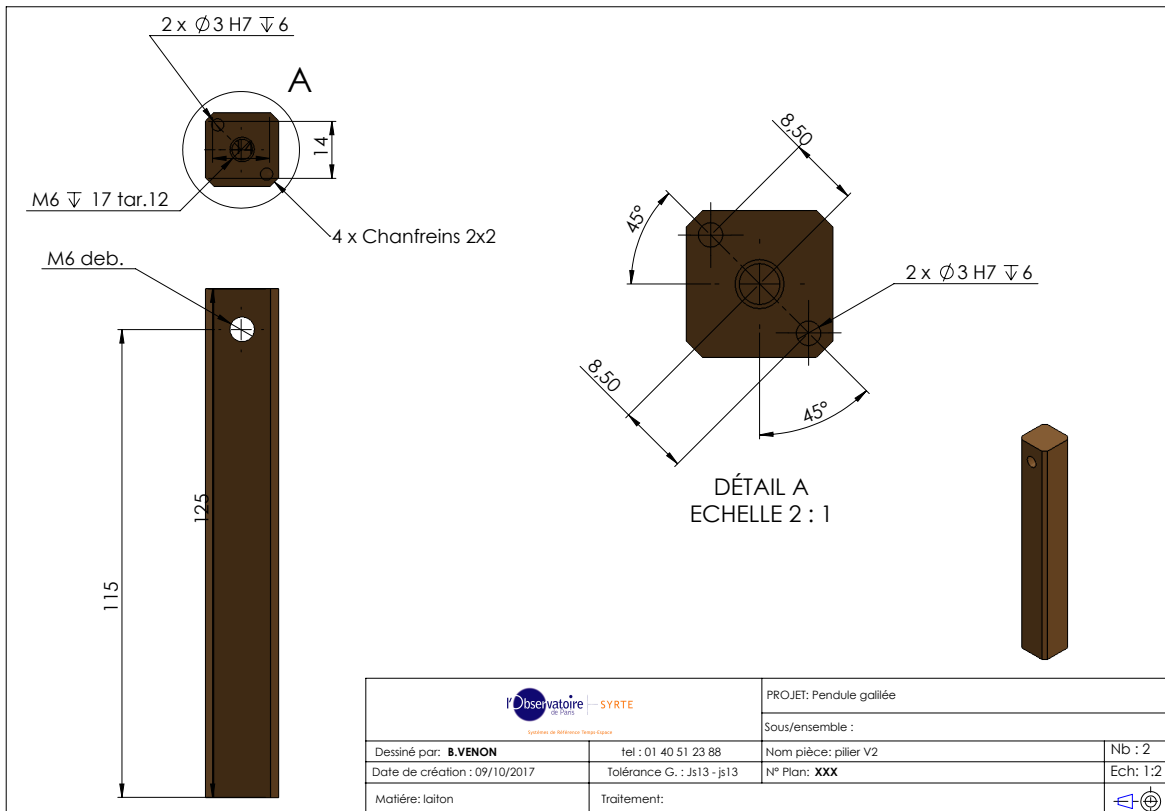


Fig. 5.21.

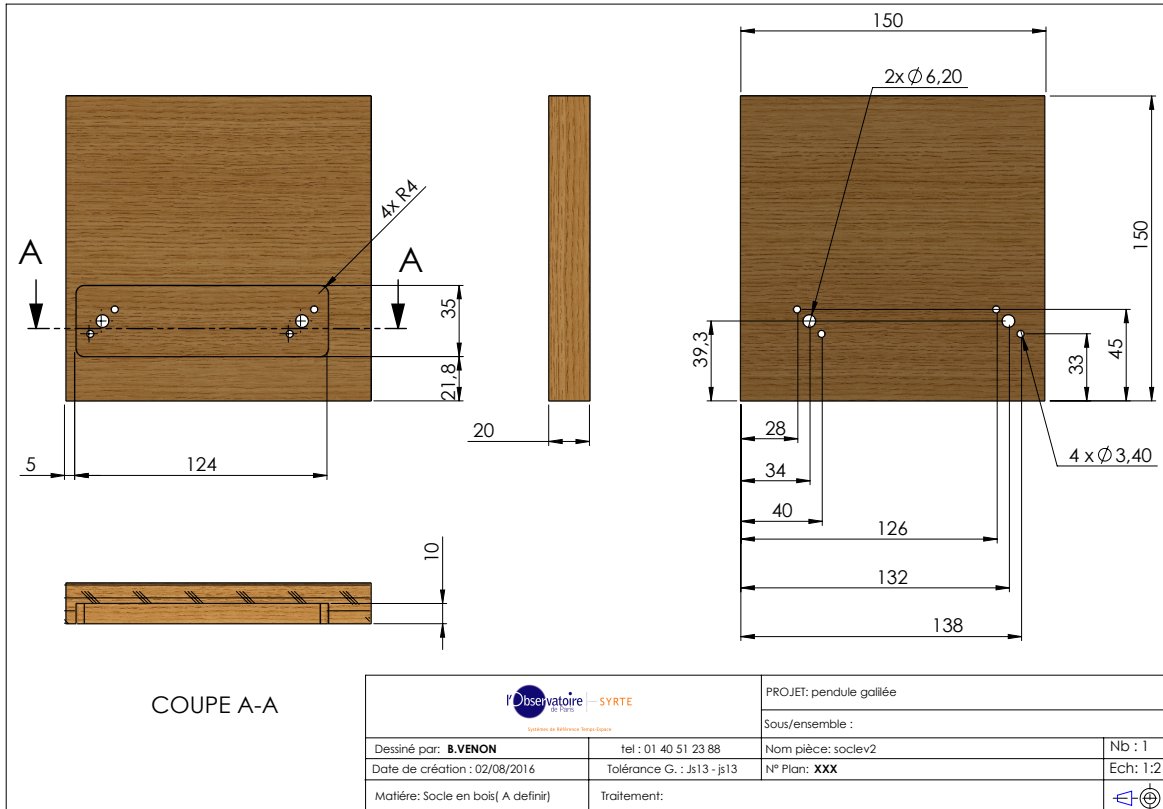


Fig. 5.22.

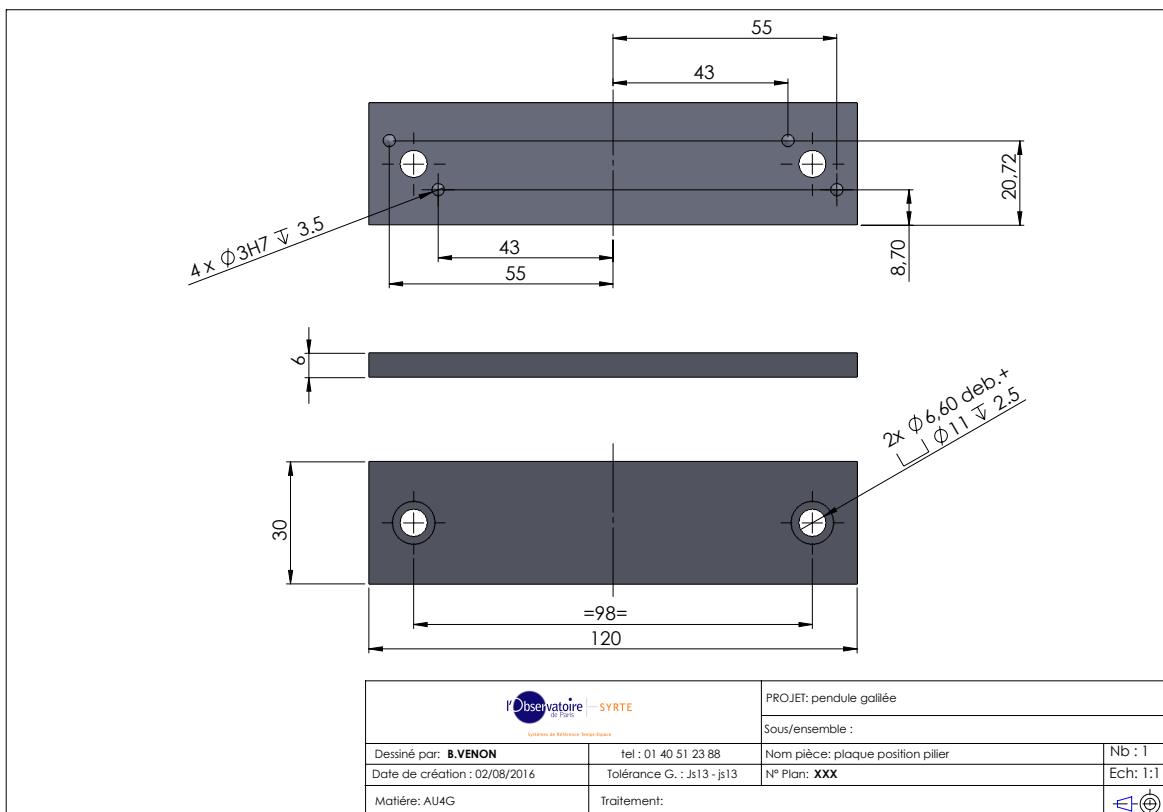


Fig. 5.23.

Pour sa fabrication nous avons procédé comme suit : nous avons utilisé une plaque de laiton de 3 millimètres d'épaisseur. Nous avons dessiné le centre, et nous avons tracé la forme du secteur d'angle égal à 15 degrés avec un compas. Nous avons découpé dans un premier temps à la scie. Nous avons percé deux trous, le premier correspond à celui du centre d'oscillation et le deuxième est un trou que nous avons utilisé afin de pouvoir stabiliser le secteur au moment de l'usinage. Nous sommes passés ensuite sur un étau. Nous avons poli la surface du secteur. Dans un premier temps avec une disqueuse afin de donner la forme arrondie du secteur tranché sur les extrémités. Ensuite nous avons procédé à un limage manuel nécessitant environ cinq heures environ de travail. Et la finition du polissage a été effectuée avec une presseuse avec du feutre et des pates pour polir. Nous avons rempli le deuxième trou, qui servait à la stabilité du secteur lors de son limage, avec la même matière et nous avons repoli la surface afin d'être homogène. Le reste des pièces est fabriqué en machine : le stylet et la barre de fer (que nous avons fixée sur le secteur en force), les piliers en laiton et les paliers en bronze. L'objectif des paliers en bronze étant d'avoir les points de contact entre les cônes de la barre de fer et les piliers. Sur les piliers nous avons fait des trous pour introduire des goujons qui ont d'un côté la forme d'une clé quelconque, afin de pouvoir régler le serrage, et puis de l'autre côté nous avons introduit un pallier en bronze pour chaque pilier pour le point de contact avec la barre de fer. Avec le bronze, comme Galilée nous le propose, nous avons un point de contact plus gras qui minimise un maximum le frottement. La base est faite arbitrairement avec des pions pour assurer la stabilité et l'orientation exacte des piliers et avec un poids qui permet de stabiliser la base pour éviter l'absorption de l'énergie du pendule. Le résultat final est présenté par les images suivantes.



Fig. 5.24. Photographie prise par Daniel Touati dans la salle Cassini de l'Observatoire de Paris.

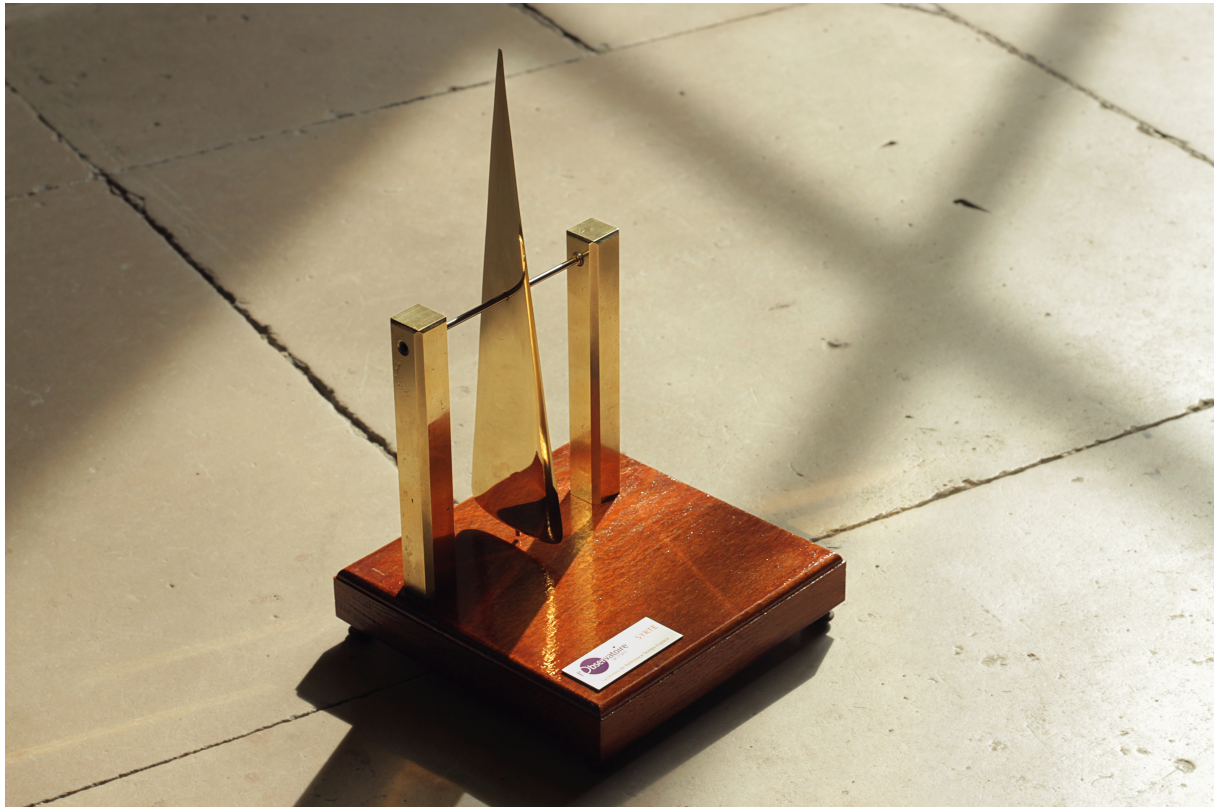


Fig. 5.25. Photographie prise par Daniel Touati dans la salle Cassini de l'Observatoire de Paris.

À la suite de la fabrication du secteur nous avons procédé à des expériences dans l'objectif de mesurer la durée totale des oscillations pendulaires, jusqu'au repos et de déterminer sa période. Nous avons effectué des expériences avec un angle d'amplitude initiale d'oscillation égale à 90 degrés et à 180 degrés. Nous avons trouvé la période du pendule égale à 0,65 secondes et la durée du mouvement pendulaire avec une amplitude de 90 degrés égale à 2'40'' et pour 180, égale à 2'50''. Le calcul théorique (négligeant tout type de frottements) montre qu'un tel pendule se comporte, vis-à-vis des petites oscillations, comme un pendule simple de longueur  $R/2$ , soit de période égale à 0,66s en très bon accord avec notre mesure. Galilée nous invite à donner des impulsions fortes afin que notre pendule puisse osciller le plus longtemps possible. Le résultat d'expérience néanmoins nous montre que la différence des durées du mouvement pendulaire avec un angle d'amplitude initiale de 90 et de 180 degrés est seulement de 10'' de temps. Nous avons constaté que, même si l'on donne au secteur une plus grande énergie au départ de son mouvement, il l'a dépense plus rapidement. Au moment où l'on va adjoindre le système d'engrenage, des nouvelles frictions seront ajoutées au risque de diminuer la durée maximale du mouvement pendulaire. Si l'on considère maintenant la valeur de la palme déduite de notre analyse, soit environ 50 cm pour 2 palmes, la période théorique des petites oscillations sera de 1,00 seconde. Les diagrammes qui suivent représentent la diminution de l'amplitude des oscillations du secteur au cours de son mouvement, premièrement jusqu'à la 15<sup>e</sup> seconde de temps et ensuite jusqu'à l'arrêt du pendule.

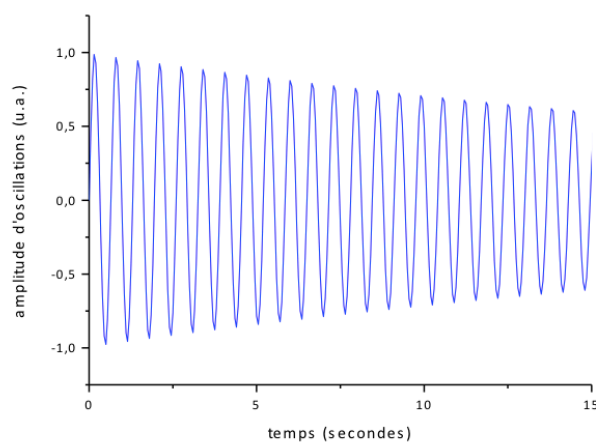


Fig. 5.26.



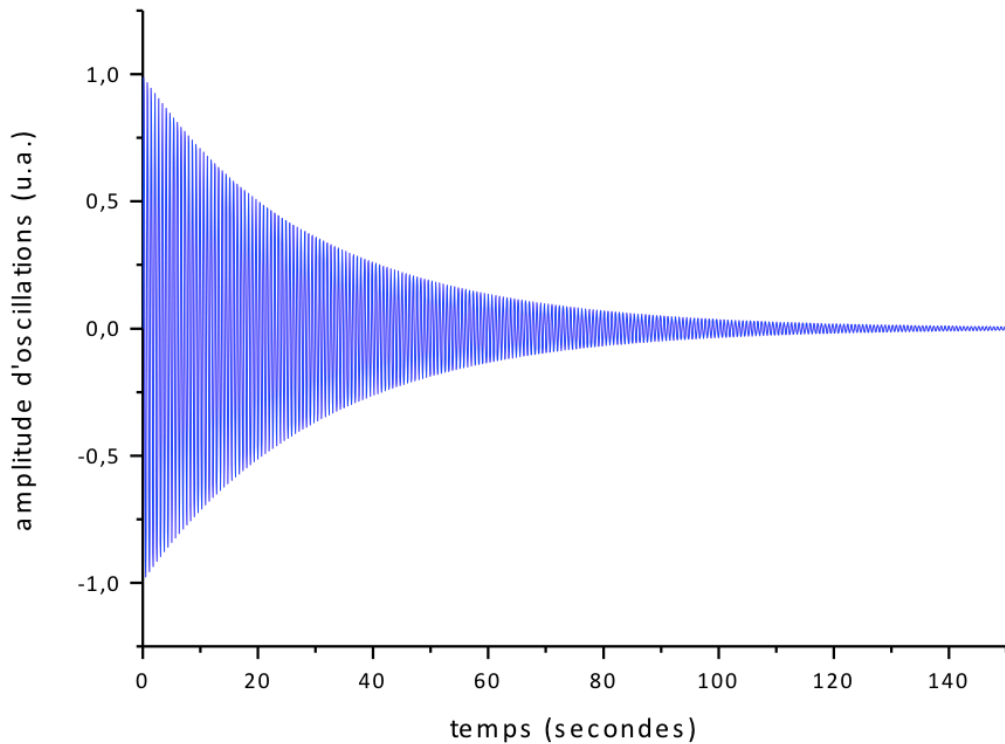


Fig. 5.27.

Le secteur de Galilée est un instrument auquel la grande précision - tant promise par son auteur- fait défaut. Ce chronomètre qui était censé accompagner les observations astronomiques, vu la petite durée de son mouvement, nous pouvons faire l'hypothèse qu'il était destiné à mesurer la durée d'une observation. Pour une durée qui dépasserait une heure le nombre des impulsions qu'il faudrait lui donner pour continuer sa marche est considérable. Pour mesurer la durée de la fin d'une observation jusqu'à l'aube, ou, du couché du soleil jusqu'au début de l'observation, ce dispositif ne serait pas suffisant à notre avis.

Christian Huygens plus tard s'est retrouvé dans la même situation que Galilée. Il a fait face aux mêmes difficultés et à d'autres encore étrangères à Galilée ; Huygens n'a pas considéré l'isochronisme pendulaire comme vraie. Il a dû trouver des solutions pour résoudre ce problème. Il a dû trouver aussi des solutions au problème du mouvement perpétuel d'un pendule. Il a amélioré le système d'engrenages proposé ici par Galilée. Et il s'est appliqué afin d'assurer la marche perpétuelle de son Horloge (car chez Huygens il s'agit des Horloges à pendules et non pas des pendules simples, ni des secteurs) à bord d'un navire pour la solution du problème des longitudes. La mesure du temps chez

Huygens occupe la place centrale à propos des Longitudes. Il ne s'agit plus du temps mesuré des observations, mais de la détermination du décalage horaire entre deux lieux de position longitudinale différente. Nous allons nous pencher sur tout cela dans le chapitre suivant.

## VI. CHRISTIAN HUYGENS, « 15 PIEDS 1 POUCE ET $1\frac{4}{3}$ LIGNES DANS UNE SECONDE »

À la fin de la Proposition IV Théorème IV des *Principia*, que nous avons étudiée plus haut, Newton fait référence à Christian Huygens et cite deux de ses principaux résultats. Le premier est la longueur du pendule qui bâte la seconde à la latitude de Paris, et le second la distance parcourue par un corps en chute libre partant du repos dans une seconde de temps. Ils figurent dans l'ouvrage majeur de Huygens *l'Horloge à Pendule* (*Horologium Oscillatorium*) paru pour la première fois en 1673. Dans cet ouvrage, on trouve la description d'une horloge de précision, comme celle publiée en 1658 sous le titre *Horloge* (*Horologium*), mais surtout et avant tout, ce traité est un travail en profondeur sur la chute libre des corps qui utilise l'Horloge<sup>499</sup>. Les résultats de Huygens cités par Newton sont d'un côté issus de mesures et de l'autre issus de démonstrations géométriques. Si l'on suit la réflexion de l'auteur depuis 1658 nous constatons que ces résultats sont annoncés dans son ouvrage en 1673, et qu'il les avait déjà établis sous une forme primitive dès 1659. La chute des corps et la détermination de la longueur du pendule qui bâte la seconde sont quasi complémentaires.

Nous allons étudier ici les deux facettes de la curiosité scientifique de Huygens, d'un côté pratique et de l'autre théorique, pour voir comment ses résultats ont vu la lumière tout en mettant l'accent sur l'influence que des savants comme Galileo Galilei, Marin Mersenne et Giovanni Battista Riccioli ont exercé sur sa réflexion. On pourra ainsi définir le cadre intellectuel dans lequel ils émergent. Ces résultats sont-ils le fruit d'une réflexion dont la finalité est la mesure précise du temps comme définie dans cette thèse? On verra par la suite que dans l'œuvre du savant Hollandais, ils sont déjà annoncés lors de l'étude de la force centrifuge et de son rapport géométrique à la force de la gravité. Huygens établit le rapport géométrique entre les deux forces par le biais du mouvement circulaire uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré. Ces deux mouvements représentent les deux forces. La représentation de la gravité se fait alors par la chute libre d'un corps grave sans vitesse initiale. Et lorsqu'il est sujet de chute, il

---

<sup>499</sup> Yoder J.D. ([1988] 1990), *Unrolling Time : Christiaan Huygens and the mathematization of nature*, Cambridge, New York, Melbourne : Cambridge University Press, 3.

est sujet de mesure du temps également avec toutes les difficultés que représente cette opération, déjà mentionnées dans les Chapitres précédents.

Le travail de Huygens dans son intégralité avait un impact majeur sur la réflexion savante de son époque. Huygens a influencé le courant scientifique européen non seulement par le biais de sa correspondance avec des savants distingués et par les publications de ses œuvres, mais aussi par son implication active dans les Institutions nouvellement créées en France et en Angleterre. Huygens devient membre (*Fellow*) de la Royal Society à Londres en 1663 et est l'un des premiers membres fondateurs de l'Académie Royale des Sciences de Paris en 1666. Il joue ainsi un rôle clé dans l'orientation des projets scientifiques nationaux et internationaux. La curiosité scientifique du jeune homme prend avec le temps une ampleur internationale. La précision dans la mesure du temps représente une partie majeure de son œuvre. Ce sujet apparaît dans toutes les branches de la pensée du savant Hollandais ; au sein de ces recherches abstraites, purement mathématiques, et dans celles plus pratiques, dans l'objectif du développement instrumental à la disposition des savants afin de faciliter et d'améliorer leurs travaux.

Le sujet de la mesure du temps, au sein de l'étude de la chute des corps, était dans le centre de recherches de Huygens depuis son jeune âge. Dès l'année 1646, à l'âge de 17 ans, Huygens semble avoir adopté la loi galiléenne de l'accélération uniforme. On voit à cette période ses premières réflexions sur la chute des corps. Une démonstration de la chute des corps centrée sur la question de la vitesse initiale du corps en question, sous l'influence de l'œuvre galiléenne et pourtant très originale, se trouve dans les premières lettres échangées entre Christiaan et Marin Mersenne. Cette correspondance qui a débuté par l'intermédiaire de son père Constantijn Huygens<sup>500</sup> a continué jusqu'à la disparition du Minime en Septembre 1648. Mersenne le 19 Novembre 1646 ayant reçu et étudié la démonstration de Christiaan sur la chute des corps lui répond d'un ton plein de « bonne affection »<sup>501</sup> comme un maître à son élève qui reconnaît son enthousiasme mathématique et qui veut stimuler son esprit critique:

---

<sup>500</sup> Huygens C. (1888), Œuvres Complètes, La Haye : Nijhoff M. Tome I (Correspondance 1638-1656), 24-28.

<sup>501</sup> Ibid. 24.

« Le vous assure que i'ay si fort admiré la gentillesse de vostre demonstration des cheutes, que ie croy que Galilée eust esté ravi de vous avoir pour garand de son opinion. »<sup>502</sup>

L'attachement de Huygens à la théorie de la chute libre établie par Galilée peut être expliqué par la connaissance de Huygens de l'ouvrage de Riccioli intitulé *Almagestum Novum* où l'on trouve des expériences qui confirment cette théorie<sup>503</sup>. Huygens, contrairement à Newton, n'attache pas une importance majeure au résultat annoncé par Galilée dans les *Dialogues* de la chute d'un corps de 100 *braccia* de distance en 5 secondes de temps<sup>504</sup>. Une raison probable est que Riccioli lui même critique ce résultat comparé aux résultats de ses propres expériences. Huygens utilise le résultat de la chute des corps donné par Riccioli dans son ouvrage à la place de celui donné par Galilée dans les *Dialogues*. Jusqu'au 21 Octobre 1659, l'auteur utilise pour ses propres observations, ce qu'il croit être la valeur donnée par Riccioli de la distance parcourue par un corps lors de sa chute partant du repos en une seconde de temps. Riccioli dans son ouvrage précédemment mentionné donne une valeur de 15 « pedes Romani »<sup>505</sup>, et Huygens considère à son tour une distance de 15 pieds rhénans<sup>506</sup>.

#### 1. Giovanni Battista Riccioli, Père Marin Mersenne, une observation soignée.

Riccioli, astronome jésuite italien, partisan du géocentrisme, dans son ouvrage *Almagestum Novum* nous donne la description des cinq expériences mises en place au sujet de la chute libre, et surtout du processus suivi pour arriver au résultat mentionné plus haut. Dans son ouvrage volumineux, dont seul le premier Tome a été publié<sup>507</sup>, de 1504 pages, l'auteur traite d'une grande variété de sujets. Ces expériences sont réalisées

---

<sup>502</sup> Ibid. 30-31.

<sup>503</sup> Riccioli, G. B. (1651), *Almagestum novum astronomiam veterem novamque complectens observationibus aliorum, et propriis novisque theorematibus, problematibus, ac tabulis promotam, in tres tomos distributam*, Bologne : Haeredis Victorii Benati.

<sup>504</sup> Résultat critiqué par Marin Mersenne lors de sa lettre à Nicolas Fabri de Peiresc, le 15 Janvier 1635. P. Marin Mersenne (1959), *Correspondance*, De Waard C. (eds), Paris : CNRS, Tome V, 24-25.

<sup>505</sup> Riccioli, G. B. (1651), 384-386.

<sup>506</sup> Huygens C. (1932), *Oeuvres complètes*. Tome XVII, 277, Note 6. (pied rhénan =  $24 \times 326,596 / 25 = 313,532$  mm ; soit une hauteur de chute de 4,7m en 1 seconde. Comme  $g=2h$ , cela donne  $9,4m.s^{-2}$ ).

<sup>507</sup> Koyré A. (1953), Note No 39, 229.

en faisant confiance aux sens et en s'appuyant sur une argumentation tantôt mythique, tantôt poétique, tantôt scientifique. Ces expériences ont très probablement influencées le jeune Huygens. À ce titre nous allons les présenter ici brièvement<sup>508</sup>. Pour ce faire nous allons reprendre et suivre la présentation de Christopher M. Graney<sup>509</sup> tout en consultant la version latine du texte publié en 1651. Il s'agit d'un groupe d'expériences sur le mouvement inégal des corps graves qui descendent de plus en plus vite dans l'air, pour se rapprocher à la fin de leur lieu naturel au sens aristotélicien du terme.

Dans sa première expérience, il utilise le son de l'impact final de la chute libre des corps (de bois, d'os ou métal) de hauteurs différentes, de 10 et 20 pieds. Riccioli remarque que plus la hauteur de la chute est grande plus le son est fort. De cette remarque il conclut que les corps en chute libre de 20 pieds acquièrent un plus grand impetus (*plus impetûs acquisiuit*) et une plus grande vitesse. Pour soutenir cette thèse il propose même une expérience domestique qui consiste à renverser de l'eau d'un récipient dans une louche de hauteurs différentes et de comparer le son de l'impact. Il fait aussi référence à Cicero et à son texte *Songe de Scipion* où il est dit que les personnes proches des cataractes du Nil ont été assourdies en raison de l'écoulement de l'eau qui tombe d'une hauteur considérable.

Dans sa deuxième expérience il utilise le sens du toucher. Il nous invite à répéter la même expérience que celle mentionnée plus haut avec la différence que l'impact du corps grave se fait dans notre main. De cette manière on peut facilement sentir le mal augmenter quand on passe d'une chute de 10 à 50 pieds de hauteur. L'auteur pour soutenir sa thèse se réfère à la légende de la mort d'Eschyle, le plus ancien des trois grands tragiques grecs. Il est dit que lors de sa deuxième visite en Sicile, il a trouvé la mort par la chute d'une tortue de la bouche d'un aigle qu'il voulait la casser pour ensuite

---

<sup>508</sup> Riccioli G. B. (1651), Vol. II, Chapitre XVI, Livre IX, Section IV, 384-387.

<sup>509</sup> Graney C. M. (2015), *Setting aside all authority: Giovanni Battista Riccioli and the science against Copernicus in the age of Galileo.*, Notre Dame Indiana : University of Notre Dame Press.

la manger. Il se réfère également à l'ouvrage d'Ovide *Tristes*<sup>510</sup> et à la chute d'Elpénor, l'un des compagnons d'Ulysse,

« celui qui tombe en marchant sur une route unie (ce qui arrive assez rarement) se relève bientôt sans avoir presque touché la terre ; mais le malheureux Elpénor, tombé du faite d'un palais, apparut ensuite ombre légère aux regards de son roi. »

Dans la troisième expérience le sens à l'honneur est la vue. Riccioli nous propose de lâcher une boule d'argile en chute libre de hauteurs différentes. Il nous dit que si on la laisse tomber d'une petite hauteur la boule ne se casse pas, et elle ne peut pas non plus casser la coquille d'un œuf, elle ne peut même pas plonger à une grande profondeur dans l'eau etc. Alors que si elle est lâchée d'une plus grande hauteur elle peut faire tout ce qui précède. Il est ainsi évident qu'un corps grave tombant d'une hauteur supérieure acquiert toujours plus d'impulsion à la fin de son mouvement.

La quatrième expérience consiste en l'observation des phénomènes de rebondissement. Pour ce faire Riccioli utilise un ballon assez dur, fait de cuir et de la taille d'un jaune d'œuf. Il relâche son ballon de hauteur de 37 pieds qui tombe sur un sol de pierre et rebondit de 7 pieds et demi. Il répète l'expérience cette fois de hauteur différente, 73 pieds et il observe un rebondissement de 11 pieds  $\frac{1}{4}$ . Il reprend la même expérience avec un ballon plus grand et le lâche des mêmes hauteurs, le résultat de rebondissement est de 6 et 7pieds et demi respectivement pour chacune. De cette expérience, que l'auteur lui même caractérise comme un jeu, et non pas comme une expérience fiable, il conclut au mouvement uniformément accéléré de la chute libre.

Riccioli procède par la suite à une expérience communément réalisée de chute libre, celle de la détermination de la distance de la chute dans un temps donné, ou durant des intervalles de temps égaux. Pour commencer il fait référence à une expérience effectuée par le Père Niccolò Cabeo en 1634 d'une chute libre d'un corps grave de hauteur d'environ 100 pieds qui correspond à la hauteur de l'église de la ville dont il est question

---

<sup>510</sup> Ovide (1806-1888), « Tristes », avec la traduction en français, publiées sous la direction Nisard de M., in *Oeuvres Complètes*, Paris : Dubochet J.-J. & Compagnie, Livre III, élégie IV.

et il souligne son problème : l'instrument de mesure du temps, censé indiquer les mêmes durées temporelles n'était pas calibré. Autrement dit le pendule utilisé par Père Cabeo ne battait pas la seconde ou une de ses subdivisions puisqu'il n'avait pas été réglé selon le mouvement apparent des astres. Riccioli, afin de réaliser sa propre expérience a pris soin de calibrer son pendule à Bologne, en 1640. Il ne choisit pas un pendule qui bat la seconde ( $T= 2\text{sec}$ ), mais un pendule qui bat le  $\frac{1}{6}$ e de seconde ( $T=\frac{1}{3}\text{sec}$ ). La longueur de son pendule, du bout du fil au centre de la boule attachée à ce fil, était égale à un et cinquante centième de la douzième partie du vieux pied Romain (*unciae unius, & adhuc quindecim centesimas particulas unciae pedis Romani antiqui*). La détermination de la longueur du pendule à Bologne, est présentée en détails par l'auteur, dans le Livre 1 Chapitre 21. Le choix de ce pendule n'est pas un hasard. Riccioli nous dit que ce battement pendulaire correspond à peu près à la notation des notes de la musique semi-chromatique, dans le cas où le chef de cœur dirige sa chorale selon la mesure habituelle. Les oscillations du pendule en question sont très fréquentes et très rapides, on peut dire que c'est une sorte de *métronome*. Afin d'éviter les erreurs sur le nombre d'oscillations compté, Riccioli a utilisé une méthode habituelle, comme il l'appelle, de comptage (*numerationem*) de un à dix, en utilisant la dénomination des chiffres issus du dialecte bolonais (*un, du, tri, quatr, cinq, sei, sett, ott, nov, dies*). Le dialecte bolonais a été choisi sciemment car la prononciation des nombres dans ce dialecte coïncide très bien avec le rythme indiqué par le pendule. Le compte à partir de un se répétait sans cesse, et chaque dizaine de coups pendulaires était marqué par le poing de la main levée. Ce compte répété s'identifie au battement musical régulier de la musique semi-chromatique, selon l'auteur. Ainsi en comptant, Riccioli, Frs. Francesco Maria Grimaldi<sup>511</sup> et Giorgio Cassiani (Pères jésuites), se rapprochaient au plus près possible du temps marqué par un seul coup du Pendule. Le deux Pères étaient postés sur la base des Tours et Riccioli au sommet ou à une fenêtre des Tours différentes (les différents lieux et les différentes Tours sont nommés et les différentes hauteurs sont données par l'auteur). Ils utilisèrent deux pendules identiques et les Pères notaient chacun de leur côté le nombre d'oscillations effectuées lors d'une chute. Après plusieurs essais, ils comparaient leurs résultats et trouvaient une différence de l'ordre d'une oscillation entre eux. Les corps en chute libre étaient de forme sphérique faits d'argile et pesaient huit livres (*uncias*)

---

<sup>511</sup> Le Père Francesco Maria Grimaldi, qui à l'époque de l'expérience était assistant de Riccioli, est celui qui a découvert la diffraction de la lumière.



chaque. L'objectif de ses expériences nous dit l'auteur était de déterminer si les corps graves tombaient avec un mouvement uniforme, ou avec un mouvement uniformément accéléré, ou bien avec un mouvement uniformément décéléré. On verra plus loin, dans la partie concernant les expériences effectuées par Mersenne, que le Minime était préoccupé par la même question, à savoir : quel est le genre du mouvement d'une chute libre ?

Riccioli discute par la suite plusieurs éléments au sujet de la chute libre des corps qui figurent dans le Dialogue de Galilée. Il s'agit ici plus précisément a) de la proportion de l'augmentation de la vitesse lors d'une chute libre d'un corps grave sans vitesse initiale dans des intervalles de temps successifs, déterminée par Galilée (cette augmentation, selon Galilée, suit la suite des nombres impairs à partir de l'unité : 1, 3, 5, 7, 9, 11, etc.), b) du résultat de chute de 100 *braccia* dans 5 secondes et c) de l'isochronisme des pendules. Riccioli nous dit avoir remarqué par les observations sur le mouvement des pendules, que toutes les oscillations du même pendule sont mutuellement égales dans le temps, ou synchrones.<sup>512</sup> L'auteur semble confirmer l'isochronisme pendulaire soutenu par Galilée mais il met en doute son résultat de chute. Il se demande dans un premier temps pourquoi Galilée ne mentionne pas la Tour par laquelle il a lâché le corps grave. Puis il compare ces résultats à ses propres expériences et trouve que la différence entre les deux est considérable. À cause de ce résultat suspect, Riccioli n'a pas adhéré de suite à la proportion de l'augmentation de la vitesse de chute donnée par Galilée. Par les expériences mentionnées plus haut Riccioli trouve néanmoins que cette proportion est correcte. Il reconsidère ainsi le résultat de chute donné par Galilée et attribue la grande différence trouvée au fait que Galilée n'a probablement pas calibré correctement son pendule par rapport aux étoiles.

Un certain nombre de résultats d'expériences effectuées par Riccioli figurent sur la table suivante dressée par l'auteur lui-même. Si l'on suit la logique de cette table de gauche à droite on trouve l'ordre des expériences effectuées, notées par I, II et III. Par la suite les coups du pendule utilisé, à côté (toujours de gauche à droite) la correspondance des

---

<sup>512</sup> À ce point une étude ultérieure de l'œuvre de Riccioli est nécessaire afin de voir quelle est l'amplitude d'oscillation pendulaire qui a permis à l'auteur de confirmer l'isochronisme du mouvement oscillatoire du pendule soutenu par Galilée.

coups en secondes de temps, plus à droite le carré du nombre des coups, puis la distance parcourue par les corps sphériques en pieds Romains, juste à côté la distance parcourue dans chaque intervalle de temps en pieds Romains et tout à droite dans la dernière colonne, la proportion de l'augmentation de la vitesse de la chute libre des corps graves dans l'air<sup>513</sup>.

Ordo experimentorum	Vibrationes Simplicis Peripédiculi altitudinis $1 \frac{15}{8}$		Tempus primi Mobilis respondens Vibrationibus.		Numeri Quadrati Vibrationum.	Spacia confecta à Globo argillaceo Vinciarū 8. in fine temporū.	Spacia seorsim confecta singulis temporibus.	Proportio Incrementi Velocitatis Grauium in Aëre nostrate.
	Vibr. Simpl.	Secūda	Tertia	Quadrata				
I.	5	0''	50'''	25	10	10	1	
	10	1	40	100	40	30	3	
	15	2	30	225	90	50	5	
	20	3	20	400	160	70	7	
	25	4	10	625	250	90	9	
II.	6	1	0	36	15	15	1	
	12	2	0	144	60	45	3	
	18	3	0	324	135	75	5	
	24	4	0	576	240	105	7	
	26	4	20	676	280	40	$8 \frac{1}{2}$	
III.	$6 \frac{1}{2}$	1	5	42	18	18	1	
	13 0	2	10	169	72	54	3	
	$19 \frac{1}{2}$	3	15	381	162	90	5	
	26 0	4	20	676	280	118	$6 \frac{7}{18}$	

Fig. 6.1. Photographie du tableau de l'édition utilisée du texte de Riccioli.

Les expériences présentées par Riccioli sont aussi bien qualitatives que quantitatives. L'auteur procède à son argumentation en respectant la tradition mais il met en valeur également les données expérimentales en les considérant comme des arguments également fiables. Ces expériences servent de tests de validation à d'autres expériences. L'auteur n'utilise pas ces résultats au titre d'éléments de validation d'une théorie quelconque. Il n'utilise pas ce résultat pour mettre en doute (dans ce passage étudié et en ce qui concerne la mesure du temps lors d'une chute libre), le système du monde comme présenté par Galilée. Il le fait ailleurs et autrement en mettant en doute la vision du cosmos, à la fois de Kepler et de Galilée, en considérant des trajectoires en spirale des planètes dans le système héliocentrique par exemple. Par contre, il met en doute le

<sup>513</sup> Si l'on considère un pied Romain de Riccioli égal à environ 0,296 mètres, on déduit de la table dressée une valeur de  $g$  qui est à environ 9% près de la valeur acceptée aujourd'hui qui. Cette valeur se trouve à-peu-près en accord avec celle présentée par Westfall dans le Chapitre II. 3 de cette thèse.

résultat d'expérience annoncé par Galilée de cent *braccia* à 5 secondes. De toute manière il est certain que sa façon de procéder aux observations décrites avec tant de soin a convaincu Huygens de la fiabilité de son résultat. Les expériences d'un autre savant ont contribué également à la pensée de Huygens au sujet de la mesure du temps lors d'une chute : Marin Mersenne.

Le Père Marin Mersenne, étant une personnalité qui joue un rôle majeur dans la question de la précision dans la mesure du temps au XVIIe siècle, il mérite d'être étudié de plus près. Avant d'arriver à l'observation clé du Minime, celle qui a tant inspirée le jeune Huygens, nous allons présenter brièvement l'intérêt que Mersenne a montré au sujet de la chute des corps. Une source qui est très éclairante à ce sujet est sa correspondance, surtout celle des années 1630. On trouve dans sa correspondance avec Robert Cornier les questions que le Père se posait au sujet de la gravité. Ce sont ces questions qui l'ont amené par la suite à une approche expérimentale de la chute libre. Cornier, dans sa réponse adressée au Minime le 16 Janvier 1626<sup>514</sup> dévoile l'intérêt premier de ce dernier. La pensée du Père au sujet de la gravité portait sur la question de savoir si la gravité est une tendance qui se trouve dans les corps, à l'exemple de la philosophie aristotélicienne, ou une tendance, une attraction exercée par le centre de la Terre sur les corps graves.

La gravité, en tant qu'attraction était-elle inversement proportionnelle à la distance du centre de la Terre ? Le poids d'un corps change-t-il par rapport à sa distance au centre de la Terre ? Cornier et Mersenne n'adhéraient pas à cette idée soutenue par plusieurs savants qui leur étaient contemporains. Mersenne pensait que « la gravité semble découler de l'appétit qui porte le grave vers sa propre conservation »<sup>515</sup>. Galilée partageait la même idée également. Néanmoins il y avait un nombre de savants qui avaient un avis autre sur le sujet. Par exemple, Guidobaldo del Monte qui pensait qu'un « corps pèse d'autant moins qu'il se trouve plus éloigné du centre de la Terre »<sup>516</sup> et Kepler qui soutenait de son côté qu'au sujet de la gravité « il fallait plutôt parler d'une attraction exercée par la Terre sur le corps que d'une tendance du corps vers la

---

<sup>514</sup> Mersenne (1988), *Correspondance*, Bequieu A. & Waard de C. (eds.), Paris : Centre national de la recherche scientifique, Vol I, 328.

<sup>515</sup> Ibid., 332.

<sup>516</sup> Ibid., 333.

Terre. »<sup>517</sup> Ou encore Bacon et son *Novum Organum*. Afin de vérifier laquelle des deux propositions au sujet de la gravité est la bonne (tendance des corps graves ou attraction terrestre), il propose un test expérimental :

« Les corps graves tendent vers le centre de la terre : ou par un effet de leur nature, en conséquence de leur constitution ; ou parce que la masse du globe terrestre les attire, et qu'ils tendent à s'y réunir, en vertu de la loi d'agglomération des semblables. Si cette dernière hypothèse est la vraie, il s'ensuit que, plus les graves sont proches de la terre, plus le mouvement qui les entraîne vers elle doit être impétueux ; que plus ils en sont éloignés, plus l'effet de l'attraction s'affaiblit, comme on le voit, pour l'influence de l'aimant ; enfin que l'attraction, à une certaine distance, devient nulle, et que, soustraits par l'éloignement à l'action du globe terrestre, les corps pesants doivent demeurer en équilibre dans l'espace, sans faire de chute, comme demeure la terre elle-même.

Pour ce sujet, voici quel serait un *fait de la croix* (*experimentum crucis*). Prenez deux horloges, l'une qui soit mue par des poids de plomb, l'autre par un ressort ; comparez-les, assurez-vous que leur marche est parfaitement égale ; portez ensuite au sommet de quelque édifice, le plus haut possible, l'horloge mue par le plomb, en laissant l'autre au pied du mouvement ; observez soigneusement si le mouvement de l'horloge transportée à cette hauteur est ou n'est pas ralenti, à cause évidemment de la diminution de la pesanteur. Faites ensuite l'expérience inverse ; que l'horloge soit descendue au plus profond des mines et qu'alors vous sachiez si le mouvement est accéléré par l'accroissement de la pesanteur. L'observation prouve-t-elle que la pesanteur est moindre sur les hauteurs, plus forte dans les profondeurs, alors on peut tenir pour certain que la cause de la pesanteur est l'attraction exercée par la masse du globe terrestre. »<sup>518</sup>

Le cœur de ce test expérimental est ainsi la vitesse des corps graves lors d'une chute libre. Si l'hypothèse de la gravité comme attraction terrestre est la bonne, cela veut dire que les corps graves proches de la Terre tombent en comparaison avec une plus grande vitesse. Si les corps graves se trouvent suffisamment loin de la terre, ils risquent de ne plus tomber du tout car l'effet de l'attraction terrestre s'affaiblit avec la distance. Bacon

---

<sup>517</sup> Ibid.

<sup>518</sup> Bacon Fr. ([1620] 1857), *Novum Organum*, traduit par Lorquet A., Paris : L. Hachette, Livre II, 144.

nous propose d'utiliser les Horloges<sup>519</sup> afin de tester l'hypothèse de l'attraction. Si l'on observe une accélération au mouvement des Horloges du sommet d'un édifice vers les profondeurs de la terre, on peut conclure à la validité de cette hypothèse. On voit ici que l'idée de la détermination de la gravité à des altitudes différentes par les instruments de mesure du temps, est déjà présente dans les esprits sous une forme embryonnaire.

Mais revenons à Mersenne. Comme le montre très bien Roberto Vergara Caffarelli<sup>520</sup> dans une étude récente, que nous reprenons ici, le *Minime* traite à plusieurs reprises la question de la vitesse de chute libre dans sa correspondance avec Isaac Beeckman. Mersenne pensait que la vitesse d'un corps grave lors de sa chute verticale avec vitesse initiale nulle n'augmentait pas mais au contraire, qu'elle diminuait. Beeckman a écrit à Mersenne qu'il était possible de déterminer à quel moment du mouvement rectiligne de chute la vitesse d'un corps grave atteignait une vitesse constante qu'il conserve jusqu'à la fin de son mouvement. On peut imaginer qu'il s'agit de la chute dans l'air, qui tend effectivement vers une vitesse limite, du fait des frottements exercés par l'air sur le corps, frottements dont Galilée se soustrait par la pensée en envisageant la chute libre dans le vide. Caffarelli reconstitue la correspondance entre les deux hommes en étudiant directement le journal de Beeckman<sup>521</sup>. Le 20 Août 1629 Beeckman note dans son journal le trouble que Mersenne a à visualiser la chute d'un corps grave comme un mouvement uniformément accéléré. Le *Minime* est persuadé du contraire mais sans pour autant pouvoir le démontrer. Quelque temps plus tard Mersenne adhère à l'idée de son correspondant mais pas dans les termes de ce dernier. L'idée de la vitesse constante est extrapolée par Mersenne à la totalité du mouvement. L'auteur présente clairement son opinion sur le sujet dans sa lettre du 1<sup>er</sup> Septembre 1631 adressée à Jean Rey<sup>522</sup>. Ce

---

<sup>519</sup> À ce niveau de notre recherche nous n'avons malheureusement pas plus d'informations sur les Horloges en question. Aujourd'hui les horloges du laboratoire SYRTE de l'Observatoire de Paris permettent de tester cette prédiction avec beaucoup de précision.

<sup>520</sup> Caffarelli R.V. (2009), *Galileo Galilei and Motion : A Reconstruction of 50 years of Experiments and Discoveries*, Berlin Heidelberg, New York : Springer, 246-264.

<sup>521</sup> Ibid.

<sup>522</sup> P. Mersenne M. (1988), *Correspondance*, Bequieu A. & Waard de C. (eds.), Paris : Centre national de la recherche scientifique, Tome III, 185.

dernier avait envoyé ses *Essais*<sup>523</sup> au Minime pour solliciter son avis. Le Minime après une lecture très attentive de ces *Essais*, envoie sa critique :

« Vous supposez, au Chapitre V que le mouvement des choses graves est plus viste vers la fin qu'au commencement. L'expérience me fait voir le contraire : car un boulet de canon descend aussi viste vers les vingt-cinq premiers pieds de roi que les vingt-cinq derniers. »

Rey n'hésite pas à répondre à cette remarque<sup>524</sup> :

« Pour la descente du boulet à canon, il est difficile de juger à l'œil s'il va plus viste les vingt-cinq pieds derniers, que les vingt-cinq premiers. Mais on s'en peut resoudre, le laissant cheoir une fois de vingt-cinq pieds de haut sur quelque terre tendre, laquelle il enfoncera quelque peu, mais non pas tant que lorsqu'il tombera de cinquante. Or cette plus grande enfonceure vient, ou de la plus grande pesanteur, ou de la plus grande vistesse ; non de celle-là, puisque c'est la mesme boulet, doncques de celle-cy quoiqu'on en puisse dire. »

C'est grâce à Rey, d'une certaine manière, que le Minime va se mettre à l'observation des chutes libres des corps de grandes hauteurs. Rey invite le Minime à effectuer des observations de chute d'un même corps grave de distances différentes et à observer l'empreinte que le corps laissera au sol. Lors de la chute du corps de cinquante pieds de hauteur on observe, nous dit Rey, une empreinte au sol plus considérable due non pas à son poids mais à la vitesse croissante qu'acquiert le corps lors de sa chute. Le Père s'y met immédiatement. Mais comme Koyré l'a très bien souligné, dans l'article que nous avons analysé à la suite de l'introduction de cette thèse, on voit quelque chose lorsqu'on sait qu'il y a quelque chose à voir. Le Minime a effectué des observations de chute mais non pas du même corps de hauteurs différents, mais de corps de même volume et de matière différente, et de la même hauteur. Il a ainsi démontré que les deux corps tombent aussi vite, contrairement à ce que croyait Aristote, et que la vitesse de chute est constante. Jusqu'ici il semblerait que l'intérêt du Minime à la chute des corps était centré

---

<sup>523</sup> Rey J. (1630), *Essays de Jean Rey, docteur en médecine, sur la recherche de la cause pour laquelle l'estain et le plomb augmentent de poids quand on les calcine...*, Bazas : Guillaume Millanges.

<sup>524</sup> P. Mersenne M. (1969), Tome III, 239.

sur la détermination du genre de mouvement que suit le corps lors de sa chute. Pour ce faire il fallait déterminer la nature de la vitesse du corps lors de sa chute : elle est constante, s'accroissant ou bien diminuant ? L'objectif majeur était la recherche de la définition de la gravité : quelle tendance est-elle ? Où réside-t-elle ? Dans les corps graves ou bien dans la terre ?

En 1632 le *Dialogue* de Galilée fait son apparition. On peut imaginer la stupéfaction du Minime devant cet œuvre, qui lui apprend non seulement que la chute verticale des corps graves est un mouvement uniformément accéléré mais qu'elle augmente selon la suite des nombres impairs, quand on considère le passage du corps à des positions successives séparées par la même durée de chute. De plus, tout cela est accompagné par un résultat précis de la mesure de la distance parcourue par un corps grave dans sa chute libre verticale sans vitesse initiale: 100 *braccia* en cinq secondes. Ayant déjà discuté la réaction du Père Mersenne à ce résultat annoncé par Galilée nous passons par la suite directement à l'observation décisive qui a tant influencé Huygens dans la mise en place de ces premières expériences, tant citée dans l'historiographie, et que nous reprenons ici<sup>525</sup>.

L'élément crucial utilisé dans cette observation est la simultanéité du son. Mersenne met en relation un pendule à secondes ( $T=2\text{sec}$  et de longueur 3 pieds) et un corps grave en chute libre. Son objectif est de trouver la distance parcourue par un corps grave lors de sa chute libre sans vitesse initiale dans une demie seconde de temps. Il suspend ainsi son pendule à secondes de sorte qu'à chaque demie oscillation, le corps attaché au fil du pendule frappe le mur. Afin de déterminer la distance parcourue par un corps en chute libre dans une demie seconde, il faut que le corps en chute libre arrive au sol de manière à ce que le bruit qu'il fait en frappant le sol coïncide avec le bruit que fait le corps attaché au fil contre le mur, tous deux ayant été lâchés simultanément. Ainsi la distance parcourue par le corps grave correspond à celle d'une demie seconde de temps. L'amplitude de l'oscillation du pendule à secondes choisie par Mersenne est celle d'un quart de cercle. Mersenne annonce un résultat surprenant. Il dit avoir observé une simultanéité sonore non seulement pour une chute libre de 3 pieds (équivalent au

---

<sup>525</sup> Cette expérience est citée par Westfall dans l'article étudié dans cette thèse, par Yoder J.G. (1988), elle a été étudiée de près par Koyré A. (1953) etc. Il s'agit ici de Mersenne M. (1647), *Novarum observationum physico-mathematicarum F. Marini Mersenni minimi tomus III : quibus accessit Aristarchus Samius de mundi systemate*, 152-159.

rapport établi par Galilée) mais pour toute chute entre 3 et 6 pieds de hauteur. La valeur qu'il adopte est celle de 3 pieds de hauteur dans une demie seconde. Cette observation lui permet la mise en place du rapport entre le mouvement circulaire uniforme et le mouvement rectiligne uniformément accéléré. La distance parcourue par un corps grave lors de sa chute libre est égale à la longueur du pendule à secondes qui décrit l'arc d'un quart de cercle en une demi-seconde. Autrement dit la distance de la chute libre parcourue par un corps dans une demie seconde est égale au rayon du cercle. Afin d'arriver à cette conclusion Mersenne est obligé de poser comme principe que l'isochronisme est indépendant de l'amplitude d'oscillation.

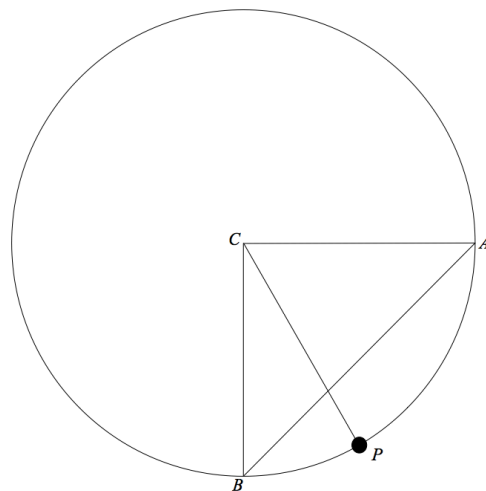


Fig. 6.2. D'après la figure présentée dans Joder J. (1988).

Pour reprendre la présentation de Yoder J.,<sup>526</sup> cette expérience conduit à un résultat assez problématique. Mersenne en conclut tout d'abord que l'arc  $AB$  décrit par un corps en mouvement circulaire uniforme et le rayon de cercle  $CB$  qui représente la distance parcourue par un corps en chute libre sont décrits dans le même temps. Cependant, pour Mersenne, dans le temps que met un corps pour décrire un quart de cercle, un corps grave en chute libre doit pouvoir décrire une distance égale ou même plus grande (entre 3 et 6 pieds) que la longueur de l'arc décrit, puisque le mouvement vertical est plus rapide que le mouvement sur un cercle. En considérant la longueur du Pendule à secondes égale à trois pieds de Paris, il considère pour la distance parcourue lors d'une chute libre dans une demi-seconde la valeur de 5 pieds. Ce résultat a été ensuite confirmé par les expériences effectuées par Mersenne. Le rapport donné par Galilée lors

<sup>526</sup> G. Yoder (1988), 11-14.



de ses expériences sur des plans inclinés et les chutes verticales de longueur égale n'est pas en accord avec le rapport établi par Mersenne. Galilée nous dit que le temps d'une chute sur un plan incliné de longueur  $AB$  est au temps d'une chute libre de distance parcourue  $CB$  comme la diagonale d'un carré est au quarré de son côté. Prenant en compte ce rapport il remet en question son expérience mais sans pour autant effectuer de nouvelles observations. Mersenne met de côté ce problème sans y retourner. Cette expérience cependant a marqué l'esprit de Huygens non pas par son exactitude mais par l'idée d'utiliser la simultanéité des deux bruits, celui produit par le pendule lors de sa rencontre avec le mur et celui produit par le corps grave à la fin de sa chute lors de sa rencontre avec le sol.

## 2. L'année 1659.

Le 21 Octobre 1659 est la date qui marque le début de la mise en place des expériences de Huygens dans l'objectif de déterminer la chute d'un corps. Le dessein de ses observations, semble être la mesure de la distance verticale parcourue en un temps donné par un corps qui tombe librement avec une vitesse initiale nulle. Les deux premières expériences celle du 21 et celle du 23 et Octobre 1659<sup>527</sup> (Fig. 6.3. à gauche) lui donnent respectivement les valeurs de 14 pieds rhénans et de 13 pieds  $7\frac{1}{2}$  onces pour la distance parcourue par un corps en chute libre dans une seconde de temps.

L'expérience du 15 Novembre 1659 (Fig. 6.3. à droite) est légèrement différente et améliorée avec un résultat qu'on jugerait rétrospectivement plus précis. En ce qui concerne le pendule, tout reste identique: le fil, la boule, et le nombre de vibrations en une demi-seconde. Mais le point délicat de l'expérience étant de déterminer la simultanéité des deux lâchers (du pendule et du corps en chute libre), Huygens se propose de couper le fil qui unit la boule du pendule et la boule qui tombera verticalement pour s'assurer de la simultanéité du commencement des deux mouvements.

---

<sup>527</sup> Huygens C. (1932), Vol. XVII, 278.

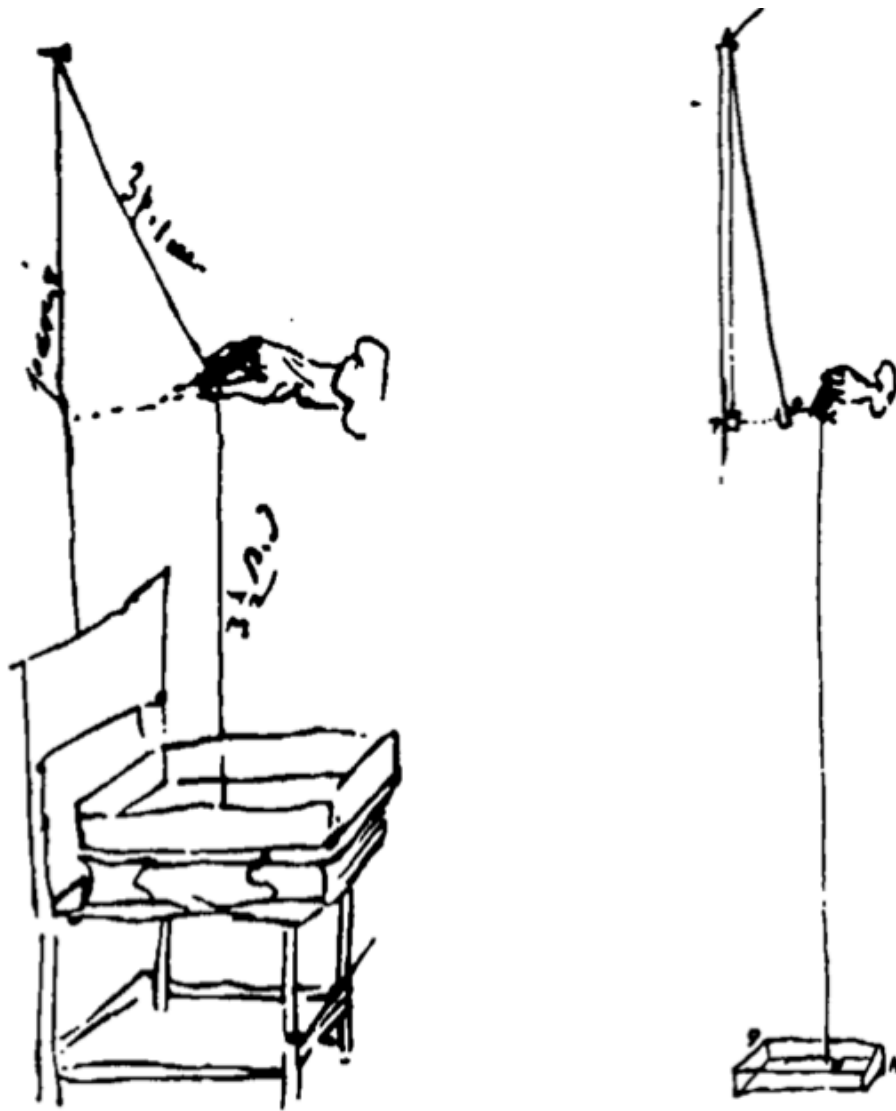


Fig. 6.3. Photographie d'un dessin de Huygens présenté dans les Œuvres Complètes. À gauche l'expérience des 21 & 23 Octobre et à droite celle du 15 Novembre.

À cette même époque, l'année 1659, on trouve la nécessité de la détermination du temps d'une chute, comme pour Newton, dans l'étude de la force centrifuge, dans les écrits de jeunesse de Huygens rassemblés sous l'intitulé *De vi Centrifuge*. À l'âge de 25 ans Huygens s'interroge sur la force centrifuge, et met en place tous les rapports géométriques et les lois qu'il connaît concernant la force de la gravité établies par Galilée et confirmées par Riccioli :

« les espaces parcourus en des temps différents par des corps partant du repos sont entre eux comme les carrés des temps. »<sup>528</sup>

« D'ailleurs pour la démonstration des théorèmes que nous traiterons ici, il suffit que pour des espaces arbitrairement petits l'accélération à partir du point de repos croisse suivant les nombres impairs 1, 3, 5, 7, comme Galilée l'a établi. »<sup>529</sup>

Il essaye par la suite de déterminer les rapports géométriques entre la force de la gravité et la force centrifuge. Afin d'établir des proportions entre les deux forces Huygens construit plusieurs Propositions successives. Dans la Proposition I, il considère deux corps égaux ( $B$  &  $C$ ), en mouvement circulaire. Huygens ne précise pas le genre de mouvements envisagé, mais de son analyse on peut déduire qu'il s'agit de mouvements circulaires uniformes. Ces deux corps ( $B$  &  $C$ ) parcourent dans le même temps des circonférences de taille différentes, la première ( $BDB$ ) étant plus grande que la seconde ( $CEC$ ).

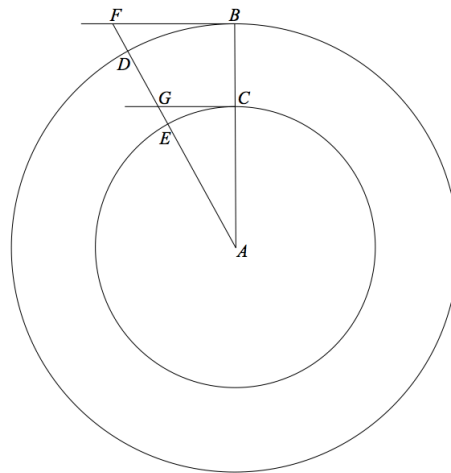


Fig. 6.4.

Son objectif dans cette proposition est d'établir le lien entre la force centrifuge, la circonférence et le diamètre du cercle. De sa démonstration, Huygens conclut que les forces centrifuges qui correspondent au corps  $B$  &  $C$  sont entre elles dans le même rapport que les circonférences, et les diamètres des cercles. Pour ce faire il considère que les arcs parcourus par les corps  $BD$  et  $CE$ , sont égaux aux tangentes  $BF$  et  $CG$ .

<sup>528</sup> Huygens C. (1929), *Œuvres Complètes*, Vol. XVI, 254

<sup>529</sup> Ibid., 256.

On a ainsi

$$\frac{F_B}{F_C} \text{ comme } \frac{BDB}{CEC} \text{ comme } \frac{2AB}{2AC}.$$

Dans la Proposition II Huygens fait l'hypothèse de deux corps en mouvement circulaire uniforme qui parcourent la même circonférence mais avec des vitesses différentes. Il démontre que la force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. « 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. C'est-à-dire si les fils par lesquels les mobiles sont retenus passent de haut en bas par le centre de la roue et qu'ils portent des poids par lesquels la force centrifuge des mobiles est tenue en échec et exactement équilibrée, ces poids seront entre eux comme les carrés des vitesses. »<sup>530</sup>

Dans la Proposition III, il considère deux corps égaux, de vitesses égales, qui se meuvent uniformément décrivant des circonférences différentes. Dans cette démonstration Huygens démontre que la force centrifuge du corps qui décrit la plus petite circonférence est plus grande que celle du corps qui décrit la grande circonférence. Lors d'un mouvement circulaire uniforme ainsi la force centrifuge est inversement proportionnelle à la distance du centre. À la Proposition IV Huygens établit la relation entre le temps de révolution et le diamètre du cercle. Il considère deux corps égaux, de forces centrifuges égales, qui se meuvent uniformément décrivant des circonférences différentes. Le rapport entre les temps de révolution, de la plus grande circonférence à la plus petite, est « en rapport égal à la racine carrée des diamètres » de la plus grande circonférence à la plus petite. Après tout ce travail préparatoire de mises en rapport entre force centrifuge, temps, distance, circonférence et diamètre d'un cercle Huygens passe à l'étape suivante, qui consiste en la mise en rapport de la force centrifuge à la force de la gravité. L'intitulé de la Proposition V est comme suit :

« Lorsqu'un mobile décrit une circonférence de cercle avec la vitesse qu'il acquiert en tombant d'une hauteur égale à la quatrième partie du diamètre, il aura une tendance à

---

<sup>530</sup> Ibid., 268.

s'éloigner du centre égale à sa gravité, c'est-à-dire il tirera le fil par lequel il est retenu avec la même force que lorsqu'il y est suspendu. »

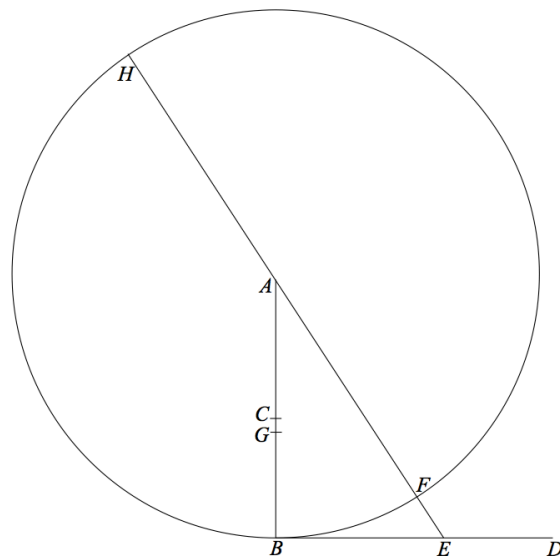


Fig. 6.5.

Dans un premier temps Huygens considère un corps qui se meut en mouvement circulaire uniforme avec une vitesse égale à celle acquise par un corps lors de sa chute libre partant du repos d'une hauteur égale à  $\frac{1}{4}$  du diamètre du cercle. Dans ce cas, nous dit l'auteur la force centrifuge sera égale à la force de la gravité. Huygens, comme Newton, afin de déterminer la force centrifuge par une force connue, la gravité, les met en rapport. Pour ce faire il considère deux mouvements, le mouvement circulaire uniforme, qui représente la force centrifuge, et le mouvement rectiligne uniformément accéléré, qui représente la force de la gravité. Géométriquement, il met en rapport le cercle et la ligne droite. Quelle est le rapport géométrique idéal entre le cercle et la ligne, le mouvement circulaire uniforme et le mouvement rectiligne uniformément accéléré qui permet l'équilibre entre les deux forces ? L'objectif est ici d'établir le rapport de deux forces dans le cas de l'équilibre, c'est-à dire de leur égalité. Ainsi, tout autre cas sera aisément traitable. Mais quelle est la place du temps dans cette affaire ? Cette question nous amène aux Propositions VI et VII qui sont d'un grand intérêt pour nous.

L'objectif de la proposition VI est de mettre en relation géométrique le mouvement circulaire uniforme et le mouvement rectiligne uniformément accéléré dans un temps donné. La durée du mouvement est fixée à une seconde. Considérant la distance de chute verticale d'un corps grave pendant cette durée, Huygens recherche la circonférence du

cercle décrite par un corps en mouvement circulaire uniforme de sorte que les deux forces, centrifuge et gravité soient égales.

« Proposition VI.<sup>531</sup>

Étant donnée la distance qu'un mobile parcourt en un certain temps, par exemple en une seconde, en tombant verticalement en partant du repos; trouver un cercle tel que si le mobile parcourt sa circonférence horizontalement en accomplissant sa révolution également en une seconde, il ait une force centrifuge égale à sa gravité.

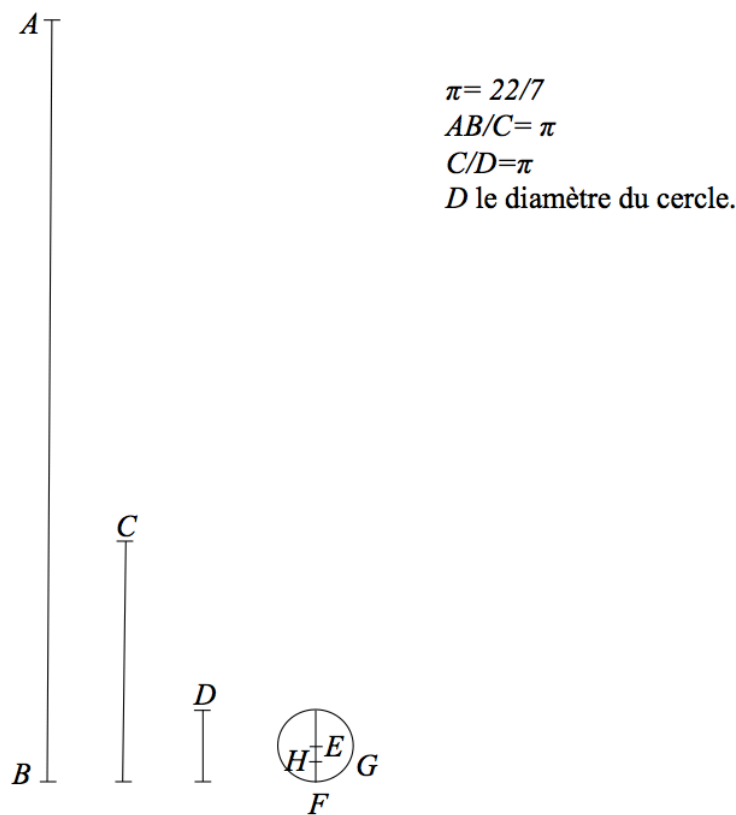


Fig. 6.6.

Soit donnée la hauteur *AB* qu'un mobile qui tombe en partant du repos parcourt p. e. dans le temps d'une seconde. Comme la circonférence d'un cercle est à son diamètre ainsi soit *AB* à la ligne *C*, et ainsi celle-ci à une troisième *D*. Décrivons alors une circonférence *FG* d'un diamètre égal à cette ligne *D*; je dis que c'est la circonférence cherchée. En effet, divisons le rayon *EF* en deux parties égales par le point *H*. Si le mobile décrit d'un mouvement uniforme la circonférence *FG* avec la vitesse qu'il acquiert en

<sup>531</sup> D'après la note 6 des O.C., Tome XVII, 281, cette proposition a été rédigée avant l'expérience du 15 Novembre 1659.

tombant de la hauteur  $HF$ , il aura une force centrifuge égale à sa gravité. Par conséquent dès que nous aurons démontré qu'avec la vitesse nommée la circonférence totale  $FG$  est parcourue dans le temps d'une seconde, il sera établi que le cercle  $EFG$  satisfait à la proposition. Il est certain que le mobile parcourra d'un mouvement uniforme et avec la vitesse qu'il a acquise à la fin de sa chute selon  $HF$  un espace double de cette même longueur  $HF$  dans le même temps pendant lequel il est tombé le long de  $HF$ ; lors donc qu'il décrira avec ladite vitesse acquise la circonférence  $FG$  d'un mouvement uniforme, le temps de sa révolution sera au temps de sa chute selon  $HF$ , comme la circonférence  $FG$  est au double de  $HF$ , en d'autres termes à  $EF$ . Et si nous prenons le double des termes conséquents, le temps du mouvement uniforme suivant la circonférence  $FG$  sera au double du temps de la chute selon  $HF$ , c'est-à-dire au temps de la chute selon  $D$  (car  $D$  est le quadruple de  $HF$ ) comme la circonférence  $FG$  est au double de  $FE$ , c'est-à-dire à  $D$ ; en d'autres termes, comme  $C$  est à  $D$  (car nécessairement  $C$  est égale à la circonférence  $FG$  elle-même), ou bien comme  $AB$  est à  $C$ . Mais comme  $AB$  est à  $C$ , ainsi est le temps de la chute selon  $AB$ , c'est-à-dire le temps d'une seconde, au temps de la chute selon  $D$ ; parce que, comme on sait, le rapport  $AB:D$  est le carré du rapport  $AB:C$ . Par conséquent la dite période du mouvement uniforme suivant la circonférence  $FG$  sera au temps de la chute selon  $D$ , comme l'espace d'une seconde est à ce même temps de la chute selon  $D$ . La dite période de révolution suivant la circonférence  $FG$  sera donc égale à l'espace d'une seconde; ce qu'il fallait démontrer. Comme le calcul fait voir que la distance  $AB$  qu'un mobile tombant verticalement en une seconde est de 15 pieds de Rhylande et de  $7\frac{1}{2}$  pouces; et comme  $AB$  est à  $C$  comme une circonférence est à son diamètre, c'est-à-dire comme 22 à 7, suivant Archimède, partant que le rapport de  $C$  à  $D$ , c'est-à-dire au diamètre de la circonférence  $FG$  a la même valeur, ce diamètre sera de 19 onces à peu près; dont la moitié est 9 onces 6 lignes. Par conséquent si un mobile quelconque accomplit dans l'espace d'une seconde chacune de ses révolutions suivant une circonférence dont le rayon est de  $9\frac{1}{2}$  onces, la force centrifuge sera égale à sa gravité. »

Afin de réussir sa démonstration l'auteur applique dans un premier temps le résultat de la Proposition V. Vers la fin de cette démonstration Huygens nous donne le résultat de la distance parcourue par un corps grave lors de sa chute partant du repos : « Comme le calcul fait voir que la distance  $AB$  qu'un mobile tombant verticalement en une seconde est de 15 pieds de Rhylande et de  $7\frac{1}{2}$  pouces ». Ici les éditeurs des Œuvres Complètes

attirent notre attention sur le terme « le calcul »<sup>532</sup>. Les éditeurs nous disent qu'au lieu de « calculus » l'auteur avait d'abord écrit « experientia ». On voit ainsi la grande difficulté que nous avons à donner priorité à la théorie par rapport à l'observation. Cette difficulté a été également soulevée par Pierre Costabel<sup>533</sup> dans son article *Isochronisme et accélération* et rediscutée par Christianne Vilain<sup>534</sup> :

« Huygens se trouve en effet en possession de la relation théorique entre le temps de chute approché sur un arc de cercle, qui sera le temps exact sur la cycloïde, et le temps de chute sur la verticale correspondante à partir du repos. Ce rapport est comme celui de la demie circonférence d'un cercle à  $\sqrt{2}$  fois son diamètre. La mesure de la période du pendule lui permet alors de calculer le temps de chute vertical, mais cela ne l'empêche pas de calculer et de continuer à mesurer ce dernier. Il ne sait alors dire s'il a obtenu par expérience ou par calcul (...) »

Le cas de Huygens nous montre comment cette relation est subtile. Huygens s'inspire des observations pour la représentation géométrique des problèmes qui le préoccupent et donne aussi des solutions aux problèmes pratiques en utilisant ses résultats géométriques. Cette une relation à double sens. En ce qui concerne le résultat du rapport entre la circonférence d'un cercle et son diamètre qui exprime le rapport des temps (sur un arc de cercle et lors d'une chute libre) on le trouve dans les manuscrits de Huygens de la période étudiée ici<sup>535</sup> entre le 1<sup>er</sup> et le 15 Décembre 1659.

Il semblerait que ce qu'on a appelé à la fin de notre introduction la précision dans la mesure du temps n'a pas lieu d'être dans l'étude du rapport entre la force centrifuge et la force de la gravité. Alors que l'étude de la chute libre est en jeu dans cette étude, la mesure du temps n'est pas un objectif par lui-même. Il est question dans cette étude de la détermination exacte de la longueur du pendule qui bat la seconde. Mais la finalité de cette détermination n'est pas la mesure précise du temps. La finalité de cette entreprise

---

<sup>532</sup> Huygens C. (1929), Note 1, 278.

<sup>533</sup> Costabel, P. (1978). « Isochronisme et accélération (1638-1687) » in *Archives Internationales d'Histoire des Sciences Oxford*, Vol. 28, 3-20.

<sup>534</sup> Vilain, C. (2000). *La mécanique de Christiaan Huygens. La relativité du mouvement au XVIIe siècle*, Paris : A. Blanchard, 155.

<sup>535</sup> Huygens C. (1929), 397.



est la mise en rapport géométrique entre les deux forces (centrifuge et gravité) entre deux mouvements, entre le cercle et la ligne. Le pendule à secondes est la représentation réelle d'une idée géométrique. La longueur du pendule représente le rayon du cercle, le corps attaché sur le fil représente le corps hypothétique qui décrit un arc de cercle dans une seconde, ou dans une demi-seconde. Afin d'étudier les deux forces, la mise en rapport des mouvements qui les représentent est nécessaire géométriquement parlant. C'est ce que font Newton et Huygens. Dans ce contexte la priorité entre la théorie et la pratique n'a pas de sens. Les deux coexistent, l'une comme la représentation de l'autre. On voit chez Huygens comme chez Newton que la priorité n'est pas la mesure précise du temps mais l'étude de deux forces par leur mise en rapport dont le temps participe de manière indirecte. Il est une durée prédéfinie, celle d'une seconde dans la plupart du temps, et il est représenté par le mouvement oscillatoire d'un pendule calibré de sorte à battre la seconde. La quête de la subdivision subtile de la seconde, déterminée par un instrument de mesure du temps de mouvement régulier et perpétuel, en tant que finalité ne trouve pas sa place ni son émergence ici.

### 3. L'Horloge oscillante 1673.

Arrivés au terme du voyage intellectuel dans la pensée de jeunesse de Huygens relatif à notre sujet, passons maintenant à l'étude de son œuvre majeure, *Horloge à Pendule* publiée en 1673. Cet ouvrage a influencé la rédaction des *Principia* de Newton à plusieurs niveaux. Principalement, en ce qui nous concerne ici, par la mesure du temps lors d'une chute et la détermination de la longueur du pendule à secondes ( $T=2\text{sec}$ ). Nous allons présenter ici brièvement les parties de ce travail et nous allons insister sur ce qui est d'importance majeure pour nous.

Cet ouvrage est une illustration fidèle de la pensée de l'auteur ; il marie l'abstraction géométrique et son application pratique au réel. Ainsi pour Huygens la relation entre théorie et pratique est à double sens. L'un trouve son inspiration et sa représentation dans l'autre. Il n'hésite pas néanmoins à donner la priorité à la géométrie. On en trouve les témoignages dans sa préface :

« Dans cette science que j'ai toujours beaucoup admirée et aimée, je me suis proposé

surtout, toutes les fois que je m'y adonnai, la considération de problèmes dont la solution serait utile soit pour la commodité de la vie soit pour la connaissance de la nature. »<sup>536</sup>

« (...) il s'agit (dans cet ouvrage) d'une part d'une invention mécanique, mais que de l'autre, et de beaucoup la plus importante, c'est une construction basée sur des principes géométriques, il faut savoir qu'en cette dernière qualité elle exigeait le recours nullement aisé aux artifices les plus abstraits de l'art, de sorte que parmi tous les sujets auxquels j'ai voué jusqu'ici une étude tant soit peu profonde, j'attribue sans hésiter la première place à cette spéculation-ci. »<sup>537</sup>

Les difficultés pratiques dans la réalisation d'un instrument (l'horloge) trouvent leurs solutions dans l'abstraction géométrique. La construction d'un instrument n'est pas seulement ici, vue par Huygens, comme l'incarnation de la théorie, comme le pense Koyré, mais il voit la géométrie comme source première de solutions pratiques. Ce double aspect est clairement exprimé par l'auteur dans la deuxième partie du titre de cet ouvrage : *L'horloge à pendule, Ou démonstrations géométriques sur le mouvement des pendules adapté aux horloges par Christian Huygens de Zuylichem, fils de Constantyn*. L'auteur, afin de montrer la complexité de la relation entre théorie et pratique, présente son ouvrage en cinq parties.

Dans la première partie Huygens présente son invention. Cette Horloge à Pendule a trouvé sa première forme quinze ans auparavant dans la pensée du savant Hollandais. Il s'agit ici d'un retour sur cette pensée, améliorée, augmentée et argumentée. Cet instrument de mesure du temps comme présenté dans le texte, garantit plusieurs aspects recherchés. Huygens propose dans un premier temps l'application du pendule comme régulateur de l'Horloge. Cette proposition, n'est pas une proposition nouvelle, selon Viviani, Galilée peu de temps avant sa mort avait la même idée. Mais l'idée de l'application du pendule à l'Horloge n'est pas suffisante pour la création d'un instrument précis de mesure du temps. Cette précision nécessite l'isochronisme assuré du mouvement oscillatoire du pendule. Il nécessite également la conservation du

---

<sup>536</sup> Huygens C. (1934), *Œuvres Complètes*, Tome XVIII, 74.

<sup>537</sup> Ibid., 76.

mouvement oscillatoire et la détermination exacte de la longueur du pendule en sorte qu'elle marque les secondes. Huygens était capable de résoudre tous ses problèmes. Partant du principe du non isochronisme des pendules simples à toute amplitude d'oscillation, il a trouvé la courbe dans laquelle cet isochronisme pouvait se réaliser dans le mouvement pendulaire. Cette courbe est la cycloïde. Les joues cycloïdales appliquées aux Horloges garantissaient son isochronisme.

La deuxième partie est intitulée *Deuxième partie de l'horloge à pendule. De la Chute des Corps pesants et de leur Mouvement cycloïdal*. Il s'agit ici d'une étude approfondie de la cycloïde dans tous ses aspects, liée à la chute des corps et au mouvement oscillatoire de pendules. Huygens commence par établir le cadre de ce travail en présentant trois *hypotheses*. Il s'agit du principe d'inertie, de la gravité comme force causale de la chute des corps et de la composition des mouvements. Dans la troisième partie l'auteur nous parle des développées géométriques des courbes. La quatrième partie est dédiée à l'étude des centres d'oscillation. À la fin de la quatrième partie, on trouve la Proposition XXVI<sup>538</sup> relative à notre sujet :

« Déterminer l'espace que les corps graves parcourent en tombant durant certain temps.

Tous ceux qui ont cherché jusqu'ici à mesurer cet espace ont jugé nécessaire d'en venir aux expériences, par lesquelles, de la manière qu'elles ont été instituées jusqu'à ce jour, on n'arrive pas aisément, à cause de la grande vitesse finale des corps tombants, à une détermination exacte. Mais d'après notre Prop. XXV de la Descente des Corps graves, nous pouvons, lorsque la longueur du pendule correspondant aux secondes est connue atteindre le but proposé sans expérience par une conséquence certaine. Nous rechercherons premièrement l'espace qu'un corps grave parcourt en une seconde, duquel on pourra ensuite tirer tous les autres. Comme la longueur du pendule à secondes est, comme nous l'avons dit, de trois pieds horaires et que le temps d'une fort petite oscillation est au temps d'une chute verticale d'une hauteur égale à la moitié du pendule comme la circonférence du cercle est à son diamètre, c.à.d. comme 355 est à

---

<sup>538</sup> Ibid., 354-359.

113<sup>539</sup> si l'on fait que comme le premier de ces nombres est au second, ainsi le temps d'une seconde ou de soixante tierces est à un autre temps, ce dernier sera de  $19 \frac{1}{10}$  : c'est là le temps d'une chute de la hauteur du demi-pendule laquelle est de 18 pouces un pied. Mais comme les carrés des temps sont entre eux, ainsi le sont aussi les espaces parcourus en ce temps, comme cela a été démontré dans la proposition précédente. Prenons donc une longueur telle que le carré de  $19 \frac{1}{10}$  soit au carré de 60, c.à.d. que 36481 soit 360000, comme 18 pouces sont à elle : on trouvera ainsi la longueur de 14 pieds, 9 pouces, 6 lignes pour l'espace parcouru en tombant en une seconde. Mais attendu que le pied horaire est au pied parisien comme 881 est à 864, la même hauteur, réduite à cette mesure, sera à peu près de 15 pieds et un pouce. Et ceci s'accorde très bien avec nos expériences très exactes, dans lesquelles le moment final de la chute n'est pas discerné par le jugement des oreilles ou des yeux, dont ni l'un ni l'autre est ici assez sûr, mais où l'espace parcouru pendant la chute est trouvé sans erreur suivant une autre méthode que nous tâcherons d'exposer ici.

La demi-oscillation d'un pendule suspendu à une paroi ou à une table dressée indique le temps de la chute. Pour que son globule soit lâché au même instant où on lâche le plomb qui doit exécuter la chute, les deux corps sont tenus reliés par un mince fil qui est rompu à l'aide d'une flamme. Mais avant cela on attache au plomb qui doit tomber un autre fil de longueur telle que lorsqu'il est tendu par la force du plomb tombant le pendule n'a pas encore atteint la paroi. L'autre extrémité de ce fil est attachée à une règle de papier, ou une mince membrane, glissant sur la paroi ou la table de telle manière qu'elle peut facilement suivre le poids tirant et descendre en ligne droite suivant sa longueur, en passant par l'endroit où le globe du pendule doit choquer la table. Toute la petite corde étant tendue, une partie de la règle est donc tirée en bas elle aussi par le plomb tombant, avant que le pendule a atteint la table. La grandeur de cette partie est indiquée par le globe qui est induit d'une légère couche de suie et met donc une marque sur la règle qui passe. En y ajoutant la longueur de la petite corde on a une mesure certaine de l'espace parcouru par le corps tombant.

Dans ces considérations nous négligeons la résistance de l'air pour que la mesure qui convient aux corps tombants s'accorde entièrement avec les expériences. Et, certes,

---

<sup>539</sup> Dans la proposition commentée avant il utilisait pour  $\pi$  le rapport  $22/7$  qui nous donne une précision relative sur  $\pi$  de  $4 \times 10^{-2}$  pour cent ; avec  $355/113$  il a une précision relative de  $8 \times 10^{-6}$  pour cent ; Il a ainsi conscience de la nécessité d'avoir la meilleure détermination possible de  $\pi$  pour ne pas introduire d'erreur dans ses calculs.

cette résistance n'est pas assez grande pour qu'elle puisse altérer sensiblement les résultats dans les hauteurs où l'on peut monter, pourvu que les corps soient supposés de métal ou bien de grandes dimensions s'ils consistent en une matière plus légère. En effet, la légèreté de la matière dans les corps qui traversent l'air en tombant est compensée de telle manière par la grandeur des corps qu'une sphère en bois ou même en liège va aussi vite qu'une sphère de plomb, lorsque les diamètres de ces sphères ont à ceux de la sphère de plomb le même rapport que la gravité spécifique du plomb à celle du bois ou du liège. En effet alors les gravités des sphères seront entre elles comme leurs surfaces. Toutefois, pour que les corps qui diffèrent beaucoup l'un de l'autre en gravité spécifique tombent sensiblement avec une même vitesse, il n'est nullement nécessaire que cette proportion des diamètres soit observée: les corps peuvent être égaux entre eux pourvu qu'ils soient l'un et l'autre assez grands ou qu'ils tombent d'une hauteur assez faible. Cependant il faut encore remarquer à ce propos que la hauteur peut être si grande ou bien (la hauteur étant faible) que la légèreté du corps projeté peut être telle qu'à cause de la résistance de l'air l'accélération du mouvement diffère énormément de celle que nous avons calculée plus haut. Car en général à chaque corps qui tombe à travers l'air ou un autre liquide correspond une vitesse déterminée, dépendant de son poids et de sa surface, qu'il ne peut jamais dépasser ou plutôt qu'il n'atteint jamais. C'est la vitesse que l'air, ou le liquide, devrait avoir vers le haut pour pouvoir soutenir le corps nageant dans lui. Mais nous aurons peut-être l'occasion de traiter ce sujet plus amplement en un autre endroit<sup>540</sup> »

Dans cette Proposition Huygens souligne la difficulté de cette entreprise. Mesurer le temps d'une chute, ou déterminer la distance parcourue par un corps lors de sa chute libre sans vitesse initiale dans une seconde. Dans les deux cas, il faut être capable de mesurer le temps avec précision. Le mouvement de chute, est un mouvement très rapide avec une vitesse finale très importante. Cette mesure nécessite un instrument de temps capable de mesurer les subdivisions du temps, plus petites que la seconde. Huygens nous dit, que tous ceux qui ont essayé de résoudre le problème de la chute libre des corps graves par le biais de l'observation ont échoué. Ici Huygens formule le sentiment de ces prédécesseurs, à savoir que la mesure de la valeur vraie d'un phénomène naturel

---

<sup>540</sup> Il s'agit ici des observations faites par Huygens au sujet du mouvement dans les milieux résistants.

n'est pas possible. Pour que cette mesure puisse être déterminée la solution est la géométrie. Si l'on veut résoudre ce problème il faut s'adresser à la géométrie. Comme souligné par l'auteur dans la préface de cette œuvre, la géométrie est la source des solutions des problèmes pratiques.

Le savant Hollandais nous explique par la suite comment s'y prendre. Afin de pouvoir résoudre ce problème géométriquement deux éléments sont nécessaires : la Proposition XXV de la Partie II de cet ouvrage et la détermination exacte de la longueur du pendule à secondes. Dans cette Proposition XXV l'auteur considère « une cycloïde à axe vertical et dont le sommet se trouve en bas ». Il suppose un mobile qui parcourt la cycloïde d'un point haut de cette courbe jusqu'au point le plus bas. Puis il suppose le même mobile en chute libre sans vitesse initiale qui parcourt une distance égale à l'axe vertical de cette cycloïde. L'auteur nous dit que le temps de descente sur la cycloïde à un rapport avec le temps de la chute est égal au rapport de la demie circonférence d'un cercle à son diamètre, c'est-à-dire égale à  $\frac{\pi}{2}$ .<sup>541</sup>

« le temps d'une fort petite oscillation est au temps d'une chute verticale d'une hauteur égale à la moitié du pendule comme la circonférence du cercle est à son diamètre »

#### 4. Christian Huygens, les tests des chronomètres marins.

Dans cette partie, nous allons étudier la précision dans la mesure du temps en relation avec les tests des Horloges marines dans l'œuvre de Christian Huygens. Nous avons vu comment dans son ouvrage *Horloge à Pendule* de 1673, il a établi la relation entre la chute libre et la longueur du pendule à secondes afin de pouvoir déterminer l'espace parcouru par un corps dans un temps donné. Nous avons vu dans les chapitres précédents que ce résultat a été utilisé par Newton lui-même lors de la construction de sa théorie de la gravitation universelle. Dans le cheminement intellectuel de Huygens dans l'étude de la chute des corps, nous avons aussi vu que Huygens considérait que les résultats d'expériences mises en place par lui-même étaient insuffisamment fiables pour

---

<sup>541</sup> Huygens C. (1934), 184-186.

donner une grande précision dans la mesure du temps de chute libre, et qu'il a donné la priorité à la Géométrie pour apporter de la précision dans la science.

Ceci se limite au cadre de la construction de sa propre théorie. À côté de cela, Huygens n'a cessé de mettre en place des expériences pour tester et améliorer ses Horloges à Pendules tant pour favoriser l'avancement et l'amélioration de l'Astronomie, que pour aider à la détermination des longitudes. Huygens, de par ses origines, baigne dans la problématique des longitudes. Ce problème n'était pas spécifiquement réservé aux préoccupations de son pays natal, les États Généraux de Hollande, mais il s'étendait à tous les pays européens de la même période qui envisageaient le développement des voyages maritimes d'un côté et la précision militaire de l'autre. Un grand développement de la cartographie maritime et terrestre voit le jour à la fin du XVIIe siècle. Christian Huygens y joue un rôle clé et contribue largement à cette entreprise. Dans la dernière partie de son Horloge à Pendule, Huygens prend le temps de nous exposer les tests de ses chronomètres marins sur mer. Il nous parle d'un grand nombre de voyages et de leurs résultats respectifs. Nous allons présenter ici un choix de lettres et de documents, non exhaustif, qui témoignent de la contribution de Huygens à la chronométrie marine tout en dévoilant les enjeux politiques, institutionnels et personnels de cette affaire.

Christian ou Christiaan Huygens<sup>542</sup> est un enfant issu d'une famille très distinguée, fils de Constantijn Huygens, qui a dédié sa vie à l'art de la diplomatie dès son plus jeune âge au service de la maison d'Orange-Nassau. Constantijn Huygens a fait ses études à Oxford, et avait reçu le titre de Chevalier Anglais en 1622. Il parlait français également, et possédait des facilités mathématiques et un côté artistique très développés<sup>543</sup>. Il entretenait une correspondance avec Descartes, un de ses amis très proches, ainsi qu'avec Marin Mersenne et Diodati, l'un des plus grands intermédiaires entre les savants de cette période (avec Galilée entre autres). Le père Huygens a joué un rôle actif dans l'éducation de ses enfants. Il était leur principale influence, tant par ses connaissances, que par son amour pour les arts et les sciences ; mais aussi grâce à ses amis savants,

---

<sup>542</sup> Huygens C. (2008), *Complete Dictionary of Scientific Biography*, New York : Charles Scribner's Sons, vol. 6, 597.

<sup>543</sup> Bell A.E. (1947), *Christian Huygens*, London : Edward Arnold & Co, 17.

artistes et diplomates qui fréquentaient sa demeure régulièrement. Les préoccupations scientifiques de son pays n'étaient ainsi pas un secret pour Christian.

Le 4 mars 1655, Huygens envoie une lettre aux États Généraux de Hollande au sujet de la détermination des longitudes<sup>544</sup> qui semble être une réaction à la proposition de J. Placentinus<sup>545</sup> d'une solution à ce problème. Huygens explique, dans sa lettre, qu'en comparant les heures locales de deux lieux différents, on peut déterminer leur différence longitudinale. Il prend ici comme exemple les villes de Londres et de Francfort-sur-le-Main au soir du 6 avril 1655. Quand il est 10 heures et 21 minutes à Londres, il est 9 heures et 7 minutes à Francfort. Le décalage horaire entre les deux villes étant d'une heure et 14 minutes si l'on prend en compte qu'une heure correspond à 15 degrés, Londres se trouve alors à 18 degrés et 30 minutes à l'ouest de Francfort. Le même mois Huygens écrit une lettre à Andres Kolff ou Clovius lui demandant de lui envoyer les manuscrits de Galilée concernant la détermination des longitudes et à la théorie des marées.<sup>546</sup>

---

<sup>544</sup> Huygens C. (1888), *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*, La Haye : Nijhoff M., Tome I, 318-319. « Te Londen wesende den 6 April deses jaers 1655, om afteemeten hoeveel dese stadt in Lenghde verscheelt van Francfort aende Oder, soo observeert hij voor eerst op wat ure de Maen te Londen inde meridiaen dat is recht in 't Zuijden sich sien laet, ende neemt bij exempel dat het zij's avondts ten 10 uren 21 minuten. wel te verstaen als het binnen Londen dese ure is. Voorts siende uijt sijn bereeckende taefelen dat de Maen op den selven avondt te Francfort inde meridiaen geweest is ten 9 uren 7 minuten. dat is als 't dese ure is te Francfort, soo treckt hij dan dese 9 uren 7 minuten vande voorschreven 10 uren 21 minuten, ende vindt het verschil 1 ure 14 minuten. Waer uijt hij besluit dat de maen dese 1 ure 14 minuten laeter aende meridiaen van Londen als van Francfort verschijnt (het welck sijn eerste en grootste misslagh is) en dat hierom Londen 18 graden 30 minuten westelijcker leght als Francfort, reeckende voor elck ure 15 graden; het welck noch een andere is. »

<sup>545</sup> Placentinus Joh. (1654), *Novum et accuratum Longitudinis locorum Scrutinium, Belgis, Gallis, Anglis, Hispanis, exoptatissimum, exhibens modum inveniendi longitudinem locorum, tam terrestrium, quam marinorum, singulis diurnis vel nocturnis temporibus, atque sic data loci latitudine et inventa ejusdem longitudine, determinandi situm navis ob tempestatem hinc inde sluctuantis atque errantis.*

<sup>546</sup> Huygens C. (1888), 322. « Expectabo invicem quae ad longitudinum scientiam pertinent manuscripta, et si quae alia Galilaei posthuma possides. », Selon la Note 2, il s'agit ici de l'échange des lettres entre Galilée et El. Diodati et de Hugo de Groot à Paris, de Mart. Hortensius, de Laureus Reael et de V. Als. Pollotto à Amsterdam, et de Constantyn Huygens, père, à la Haye.



« Avant d'écrire à Clovius, Huygens avait commencé à s'intéresser à la question des longitudes, dont son père s'était mêlé activement lors des négociations des Etats-Généraux d'Hollande avec Galilée de 1636-1640. »<sup>547</sup>

« On sait les immenses contributions de Huygens au perfectionnement des machines à mesurer le temps. Il réalisa l'emploi du pendule (1656) et du ressort spiral comme régulateurs des horloges et des montres. Il découvrit, parmi les curieuses propriétés de la cycloïde, celles du pendule cycloïdal et songea à faire sur mer l'application de ses découvertes. En 1664, il confia deux horloges, dont il eut l'idée en 1660, à un capitaine écossais de ses amis, le major Holmes, qui guerroyait alors sur la côte d'Afrique. Le moteur de ces instruments était un ressort spiral, le régulateur un pendule ; et elles étaient suspendues par une boule d'acier enfermée dans un cylindre de cuivre. On voit dans *l'Histoire de la Société Royale* de Birch qu'Holmes en fit divers essais. »<sup>548</sup>

Une lettre de Christiaan Huygens destinée à Fr. van Schooten le 12 janvier 1657<sup>549</sup>, confirme l'invention de l'Horloge à pendule et surtout l'idée de l'appliquer pour déterminer des longitudes en mer, avec l'espoir que cette horloge donne une réponse définitive au problème. Vers la fin de la même année, Huygens exprime dans sa correspondance avec Ismael Boulliau<sup>550</sup> le désir de savoir si des Horloges de son modèle, avec l'application du pendule comme régulateur, existent en France ou peut-être en Italie. Il annonce également la mise en marche et l'installation de son Horloge « au clocher du village qui est proche de la mer » (Schéveningue). Il s'agit ici d'un pendule de longueur de 21 pieds qui pèserait entre 40 ou 50 livres.

Sa correspondance avec Robert Moray, scientifique écossais, l'un de fondateurs et le tout premier président de la Société Royale, nous donne une vision encore plus précise de la mise en œuvre de l'idée d'une horloge, qui soit capable de fonctionner sur un navire

---

<sup>547</sup> Huygens C. (1932), *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*, La Haye : Nijhoff M., Tome XVII, 55, note 4.

<sup>548</sup> Marguet F. (1931), *Histoire générale de la Navigation du XVe au XXe siècle*. Paris : Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales. 132.

<sup>549</sup> Huygens C. (1889), « Lettre No 368, Christiaan Huygens à Fr. van Schooten, 12 janvier 1657 » in *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*, La Haye : Nijhoff M., Tome II (Correspondance 1657-1659), 4-5.

<sup>550</sup> Ibid. 109-110.

malgré les perturbations et qui puisse contribuer à calculer les longitudes. Les premiers échanges entre les deux acteurs concernant le pendule à secondes et la détermination de sa longueur abordent l'idée d'une mesure universelle. Cette question fut première lors de la séance de la Royal Society du 15 février 1662, et fut de nouveau soulevée par Christopher Wren. Dans ce groupe de lettres, on s'interroge sur l'utilisation d'une Horloge à pendule cycloïdale, ou celle d'un pendule simple à secondes ou à demie secondes, on se questionne aussi sur le type de fil à utiliser, sur la matière pour la boule attachée au fil etc. Huygens dresse aussi une table pour l'équation du temps.

Cinq années plus tard il présente cette idée à R. Morey :

« Je fais encore tous les jours des essais avec une horloge à petit pendule, et je trouve que son cours est assez juste estant en repos pour pouuoir servir aux Longitudes, et aussi qu'elle souffre sans s'arrester le mouvement que je luy donne en ma chambre ou elle est suspendue par des cordes de 5 pieds de long, mais je n'ay pas encore fait l'espreuve sur l'eau, pour la quelle il faudroit estre dans un vaisseau de raisonnable grandeur et dans la mer mesme qui fut agitée, a quoy je ne scay pas quand je pourray parvenir. Je n'ay pas grande opinion des promesses de vostre Indien si ce n'est qu'il ait trouvè des horloges sans pendule aussi exactes que celles qui en ont, car je croy fermement qu'il n'y a point d'autre methode practiquable pour les Longitudes que par des horloges justes. »<sup>551</sup>

Pour le moment Huygens se contente d'expériences réalisées chez lui afin de tester le bon fonctionnement de son Horloge, mais l'idée de tester son horloge à bord d'un navire lors d'un voyage en mer se présente clairement dans cette lettre comme une nécessité. Dans une lettre datée du 9 novembre 1662<sup>552</sup>, on trouve exprimé le désir de Huygens de tester son invention sur mer. Cette lettre est adressée à son frère Lodewijck Huygens. Christian lui écrit qu'un de ses amis, Alexander Bruce, un de premiers membres de la Royal Society, est parti en Ecosse, et qu'il compte réaliser des tests sur un chronomètre marin. Christian demande à son frère et à leur père leur totale discrétion en ce qui concerne cette entreprise, il veut d'abord s'assurer de la réussite du test de son

---

<sup>551</sup> Huygens C. (1891), « Lettre No 1022, Christiaan Huygens à R. Moray, 9 Juin 1662 » in *Oeuvres complètes*, La Haye : Nijhoff M., Tome IV (Correspondance 1662-1663), 151.

<sup>552</sup> Ibid., 256.

chronomètre sur mer. Le 1<sup>er</sup> décembre<sup>553</sup> de la même année, Huygens se précipite pour écrire à Moray. Il a appris par Bruce que le voyage dédié au test de son chronomètre a été déplacé de plusieurs mois. Il a aussi appris, très probablement par son frère Lodewijck, que le Président de la Royal Society était en train d'évaluer quatre propositions sur le problème des longitudes. Huygens semble inquiet, d'un côté le test de son invention est retardé et puis les propositions d'autres personnes au sujet des longitudes sont étudiées avant qu'il puisse s'assurer de la sienne. Et la situation empire<sup>554</sup>. Christian, après la dernière visite de Bruce chez lui à la Haye, se trouve en désaccord avec lui. Ce dernier revendique une partie de tout profit que Huygens dégagerait après la réussite du test du chronomètre. Bruce avait contribué à l'amélioration du chronomètre en ce qui concerne sa résistance aux perturbations du navire. Christian est très ennuyé par ce comportement. Et il a tellement honte de se disputer avec son ami et collaborateur avant même d'avoir les résultats du voyage qu'il demande encore une fois la discrétion de son frère à ce sujet. Bruce, en partant pour l'Ecosse, apporte avec lui deux horloges destinées à la détermination des longitudes. « Monsieur Brus estant parti cette apresdinée nous avons esté occupè tout le jour a bien ajuster ensemble ses deux horologes marins, et puis a les empacquer, parce qu'il les prend avec luy sur mer pour en faire l'essay. »<sup>555</sup> C'est ce que Huygens a écrit à son frère le 20 décembre 1662, mais Bruce n'a pas pu partir ce jour-là<sup>556</sup>. Son départ de la Haye a été retardé d'environ une semaine. Christian a eu un peu plus de temps pour continuer ses observations au sujet de la régularité des Horloges dans sa chambre. Les résultats n'étaient pas très optimistes. Malgré sa dispute avec Bruce, Huygens souhaite que son voyage se passe au mieux et il attend avec impatience les résultats<sup>557</sup>. Huygens compte communiquer ses résultats à Jean Chapelain, membre de l'Académie Française, et aux Etats Généraux de Hollande. Le voyage de Bruce eut lieu début janvier 1663, mais sans succès. Les deux Horloges connurent un destin malheureux : l'une est tombée, et l'autre s'est arrêtée<sup>558</sup>.

---

<sup>553</sup>Ibid., 274-276.

<sup>554</sup>Ibid., 278-280.

<sup>555</sup>Ibid., 284.

<sup>556</sup>Ibid., 284-285.

<sup>557</sup>Ibid., 280-282.

<sup>558</sup> Ibid., IV, 290-291.

Au même moment, Huygens fait une première tentative de rédaction d'un manuel d'instruction de quelques lignes, « au sujet de l'emploi des horloges pour trouver les longitudes orientales et occidentales. »<sup>559</sup> Le savant Hollandais ne se décourage pas, deux nouvelles Horloges sont construites et un nouveau voyage est envisagé. Le capitaine Major Holmes embarque les Horloges lors de son voyage à Lisbonne. Les résultats de ce voyage d'environ quatre mois sont positifs en ce qui concerne la marche des Horloges mais les longitudes n'ont pas pu être déterminées. Dès son retour en Angleterre, il repart en voyage en Guinée. Ce voyage était une bonne opportunité pour tester la régularité des Horloges et déterminer les longitudes à bord du navire.

À la même période, le 23 janvier 1665 Huygens achève de rédiger sa *Brève instruction au sujet de l'emploi des horloges pour trouver les Longitudes Orientales et Occidentales*. Il s'agit de douze instructions qui sont présentées avec un soin remarquable jusqu'au moindre détail. Ce texte mériterait une présentation détaillée et une étude approfondie vu l'intérêt qu'il présente sur la manière de déterminer les longitudes en mer à l'époque de Huygens. La détermination des longitudes en tant que telle n'étant pas au cœur de notre sujet nous allons nous contenter de la citation des quatre premières instructions à titre d'exemple et nous allons présenter brièvement la suite.

« **I.** On prendra dans le navire au moins deux des nouvelles horloges à pendule, afin que si l'une d'elles vient à s'arrêter par accident ou par suite d'une négligence, ou bien qu'étant devenue sale après beaucoup de temps elle doit être nettoyée, on en ait toujours une qui continue à marcher ; et si l'on voulait en prendre trois ou quatre, ce serait d'autant mieux.

**II.** Celui à qui le soin des horloges sera confié, se fera instruire par l'horloger au sujet des indications des heures, des minutes et des secondes, ainsi que du mécanisme intérieur des horloges, de la manière de les remonter, etc.

**III.** À bord du navire on suspendra les horloges en un lieu fermé, où elles ont le moins à empêcher qu'on ne leur donne des secousses en s'y heurtant. Et si l'on pouvait établir ce lieu au centre du navire près du grand mât ce serait d'autant mieux, puisqu'en cet endroit le mouvement est le plus faible.

---

<sup>559</sup> Huygens C. (1932), *Œuvres Complètes*, La Haye : Nijhoff M., Tome XVII, 236.

**IV.** Avant de porter les horloges à bord, on tâchera de les régler conformément à la véritable durée des jours, car alors l'usage en est le plus commode; or, il n'est pas difficile pour les horlogers de régler les autres horloges conformément à une seule qui a été bien réglée. Si toutefois on n'a pas eu le temps ou l'occasion de le faire, on pourra néanmoins s'en servir sur mer avec la même certitude, pourvu seulement qu'on ait observé ou qu'on sache combien elles avancent ou retardent en un jour et une nuit, comme nous l'enseignerons ci-après. »<sup>560</sup>

Plusieurs instruments sont ainsi nécessaires à bord du navire afin de s'assurer qu'au moins un d'eux continuera son mouvement tout au long du voyage. Avoir des Horloges à disposition n'est néanmoins pas suffisant. Les personnes responsables de ces Horloges à bord du navire doivent être formées. Formées à des choses qui pour nous paraissent évidentes, comme savoir lire les heures, les minutes et les secondes sur le cadran de l'Horloge, et puis formées aussi à connaître le fonctionnement de l'Horloge en question de manière à pouvoir les réparer si besoin. L'auteur suggère aussi le lieu d'installation de l'horloge afin de favoriser sa marche et de diminuer au maximum les effets des perturbations dues au mouvement du navire. Huygens par la suite prend le temps d'*enseigner* comment régler les Horloges sur les jours solaires moyens. Pour ce faire, l'auteur établit une table d'équation du temps. Ainsi, les navigateurs peuvent régler les Horloges et calculer le temps solaire vrai à tout moment. Huygens note les dates exactes où les jours sont de longueur moyenne, les dates où les jours commencent à se raccourcir, à se rallonger et ainsi de suite ; ces dates sont accompagnées par le retard et l'avancement observés de l'Horloge afin de faciliter les calculs des navigateurs. Il précise ensuite comment calibrer le pendule sur terre avant le départ du navire « On tracera une méridienne sur le sol, ce dont la méthode est suffisamment connue; or, il faut savoir que dans cette opération la dernière exactitude n'est pas nécessaire. Ensuite on suspendra deux fils avec un certain poids à leurs extrémités inférieures, l'un et l'autre précisément au-dessus de la méridienne, ou bien on tendra ces fils dans la direction verticale; les fils seront situés à quelques pieds l'un de l'autre; plus la distance sera grande, mieux cela vaudra. Et au moment où l'on voit le centre du soleil dans le plan des deux fils (auquel but on doit avoir un verre foncé ou légèrement noirci dans la flamme d'une chandelle) on mettra immédiatement les horloges non pas précisément à l'heure de midi mais à

---

<sup>560</sup> Ibid., 202-204.

l'heure qui s'obtient en en retranchant l'équation du jour d'après la Table qui suit. »<sup>561</sup>. Huygens présente cinq instructions qui constituent des manières différentes pour déterminer les longitudes à l'aide des Horloges. La détermination des longitudes sur mer se fait par les horloges, mais aussi par le lever et le coucher du soleil à l'aide des Horloges et par l'observation des étoiles. Deux instructions sont dédiées aux problèmes que les navigateurs peuvent avoir avec la marche des Horloges, si par exemple une des Horloges semble avancer ou retarder d'une minute ou d'une demi-minute « en ce cas le mieux sera de se régler sur celle qui prend l'avance, à moins qu'on n'aperçoive une cause évidente qui la fasse marcher trop vite; car sinon, il peut arriver plus aisément qu'une de ces pendules se met à retarder qu'au contraire elle se mettrait à avancer. Car le fil auquel le pendule est suspendu pourrait peut-être, par les fortes et fréquentes secousses auxquelles le navire est exposé, glisser ou s'étendre quelque peu, mais il ne peut guère devenir plus court. »<sup>562</sup> Ou s'il arrive que les deux horloges s'arrêtent en pleine mer, il faut les remettre en marche tout de suite, afin de mesurer le temps du trajet qui reste. Ces instructions sont proposées par Huygens lors de chaque voyage destiné à tester la marche de son Horloge et à déterminer les longitudes sur mer.

À la même date, le 23 janvier, Robert Moray traduit une partie du rapport reçu par le Major Holmes de son voyage en Guinée en français et l'envoie à Christiaan<sup>563</sup>.

« Enfin le Capitaine Holmes est arrivé, & la relation qu'il nous a faite de l'expérience des Pendules, nous met hors de doute qu'elles ne réussissent. Il partit de l'Isle de S. Thomas qui est sous la ligne, accompagné de quatre vaisseaux. Il fut obligé pour gagner le vent propre à son retour, de tirer vers l'Ouest & de faire six cens lieuës de chemin, sans changer de route: après quoy trouvant le vent favorable, il tira vers les costes d'Afrique, droit au Nord Nordest. Mais comme il eut fait sur ce Rhombe quatre à cinq cens lieuës, les Pilotes des trois navires qui estoient sous sa conduite, apprehendant de manquer d'eau, devant que d'arriver au lieu où ils pretendoient aller, luy proposerent d'aller faire equade aux Barbades. Sur cela ce Capitaine les ayant fait assembler, & fait apporter leur Journaux, ils se trouverent esloignez dans leur calcul de celuy de ce Capitaine, l'un de 80

---

<sup>561</sup> Ibid., 208.

<sup>562</sup> Ibid., 226-228.

<sup>563</sup> « Lettre No 1315 de R. Moray à Christiaan Huygens » in Huygens C. (1893), *Œuvres Complètes*, La Haye : Nijhoff M., Tome V (Correspondance 1664-1665), 204-206.

lieuës; l'autre de 100 & l'autre de 120. car ce Capitaine jugeoit par les Pendules, qu'il n'estoit plus gueres esloigné que de 30 lieuës de l'Isle del Fuego, qui est une de celles du Cap-vert, que ces Pilotes estimoient encore fort loin. Et parce qu'il avoit une entiere confiance en ces horloges, il soûtint qu'il falloit continuer la route, & le lendemain matin cette Isle parut comme il avoit jugé qu'il devoit arriver. »

Le même mois, le rapport paraît dans les *Philosophical Transactions*<sup>564</sup> en anglais accompagné par une lettre datée du 5 Février de Huygens à son ami Jean Chapelain, poète français. Dans cette lettre traduite en anglais il aborde les résultats en question. Les résultats du voyage du Major Holmes dévoilent non seulement la bonne marche des Horloges de Huygens sur mer, mais aussi apportent la preuve de l'utilité de ces derniers dans la navigation en général. Une décision capitale pour la survie de plusieurs navires a

---

<sup>564</sup> « A Narrative Concerning the Success of Pendulum-Watches at Sea for the Longitudes » in *Philosophical Transactions* 1665-1666, Vol. 1, 13-15, published 1 January 1665

« The Relation lately made by Major *Holmes*, concerning the succes of the *Pendulum-Watches* at Sea (two whereof were committed to his Care and Observation in his last voyage to *uiny* by some of our Eminent *Virtuosi*, and Grand Promoters of Navigation) is as followeth ;

The said *Major* having left that Coast, and being come to the Isle of *St. Thomas* under the *Line*, accompanied with four Vessels, having there adjusted his Watches, put to Sea, and sailed West Ward, seven or eight hundred Leagues, without changing his course; after which, finding the Wind favourable, he steered towards the Coast of *Afrik*, North-North-East. But having failed upon that *Line* a matter of two or three hundred Leagues, the Masters of the other Ships, under his Conduct, apprehending that they should want Water, before they could reach that Coast, did propose to him to steer their Course to the *Barbadoes*, to supply themselves with Water there. Whereupon the said Major, having called the Master and pilots together, and caused them to produce their Journals and Calculations, it was found, that those Pilots did differ in their reckonings from that of the Major, one of them eighty Leagues, another about an hundred, and the third more; but the Major judging by his *Pendulum-Watches*, that they were only some thirty Leagues distant from the Isle of *Fuego*, which is one of the Isles of *Cape Verde*, and that they might reach in the next day, and having a great confidence in the said Watches, resolved to steer their Course thither, and having given order so to do, they got the very next day about Noon a sight of the said Isle of *Fuego*, finding themselves to sail directly upon it, and so arrived at it that Afternoon, as he said. These Watches having been first Invented by the Excellent Monsieur *Christian Hugens* of *Zulichem*, and fitted to go at Sea, by the Right Honourable, the Earl of *Kincardin*, both Fellows of the *Royal Society*, are now brought by a New addition to a wonderful perfection. The said Monsieur *Hugens*, having been informed of the success of the Experiment, made by Major *Holmes*, wrought to a friend at *Paris* a Letter to this effect; » La suite de ce rapport présente la traduction anglaise de la lettre de Christian Huygens à R. Moray du 13 Janvier 1665.

été prise par rapport aux calculs de la distance effectués à l'aide des Horloges. Ce voyage très réussi par les navigateurs anglais ne fut malheureusement pas suivi par des succès similaires lors des voyages maritimes hollandais ou français. Huygens reste persuadé et le dit clairement dans son *Horologium*, que les problèmes rencontrés par les Horloges durant ces voyages étaient dus à « la négligence de ceux à qui les horloges avaient été confiées »<sup>565</sup>. Huygens, quand il écrit cette phrase, a très probablement en tête le voyage de Jean Richer en Acadie en 1670<sup>566</sup>, un voyage rempli de surprises tant au niveau de son organisation qu'à sa réalisation. Avant le départ de Richer pour l'Acadie les Horloges se sont cassées et il n'a pu les emporter avec lui.

L'aspect pratique de la précision dans la mesure du temps comme l'une des préoccupations importantes de Huygens est exprimé dans son œuvre à plusieurs reprises. Les tests marins des Horloges ne sont pas réalisés seulement pour le profit et la reconnaissance personnelle de Huygens, mais aussi dans son travail en tant que *chef de projet*, dirait-on aujourd'hui, au sein de l'Académie Royale des Sciences. On en trouve un exemple flagrant dans les *Programmes généraux et programmes de physique* (1666)<sup>567</sup>, constitués par l'auteur pour les assemblées des savants de l'Académie Royale des Sciences. Ses assemblées avaient lieu tout les mercredis et les samedis du mois. Les assemblées des mercredis étaient celles des Mathématiques (la Mécanique et l'Astronomie) et celles de Samedis de la Physique (L'histoire Naturelle dans tous ses aspects). Ces Programmes rédigés par Huygens concernaient les deux groupes d'assemblées. Ceux-là se séparent en cinq grandes parties. Dans la première, il s'agit de *Programmes généraux s'astronomie et de physique dans le sens restreint du mot* ; dans la deuxième de *l'astronomie mathématique* ; dans la troisième de *l'astronomie mathématique et physique*, et des *modèles des machines* et dans le quatrième et cinquième, il s'agit uniquement des *Programmes de physique* au sens large du terme cette fois-ci. Dans un premier temps, Huygens détermine une liste exhaustive des tâches

---

<sup>565</sup> Huygens C. (1934), *Œuvres Complètes*, La Haye : Nijhoff M., Tome XVIII, 116.

<sup>566</sup> Olmsted J.W. (1960), « The voyage of Jean Richer to Acadia in 1670 : A study in the relations of science and Navigation under Colbert. » in *Proceeding of the American Philosophical Society*, Vol 104.

<sup>567</sup> Huygens C. ([1666-1695] 1937), « Programmes généraux et programmes de physique », in *Œuvres complètes*. Tome XIX, 253-271.



adressée aux Académiciens, dont trois sont liées à la précision dans la mesure du temps de manière directe ou indirecte.

« 12. Envoyer des horloges à pendule sur mer avec les instructions nécessaires et une personne qui en aie soin, pour pratiquer l'invention des Longitudes, qui a desjà si bien réussi dans les expériences qu'on en a faites. (...) »

13. Mesurer les temps et proportions de la descente des corps pesants dans l'air. (...) »

15. Etablir pour jamais la mesure universelle des grandeurs par le moyen des pendules, et en suite aussi celle des poids. (...) »<sup>568</sup>

Dans la tâche No. 12, on trouve l'idée de l'application des Horloges à pendules pour la détermination des longitudes. Pour ce faire Huygens propose la réalisation de voyages lointains. De cette sorte les savants qui accompagnent les Horloges sur le navire effectueront des observations sur la stabilité et la régularité des Horloges. Par ces deux propriétés des Horloges, ils vont pouvoir aisément déterminer la position longitudinale des navires sur mer. Dans la tâche No. 13 s'exprime la relation intime entre géométrie et observation des phénomènes physiques. La proportion entre temps et espace lors d'une chute libre des corps graves sans vitesse initiale, qui a été mise en forme géométriquement par Galilée, doit s'examiner maintenant dans le monde réel, soigneusement, en prenant en compte les effets de la résistance du milieu, dans ce cas celle de l'air. La tâche No. 15 soulève un problème de grande utilité pour la communauté savante de cette époque : l'établissement d'un système de mesure universel. En ce qui concerne la mesure des longueurs, le phénomène qui se portait comme candidat idéal était le pendule. Plus précisément le pendule à secondes ( $T=2$  sec). Si l'on considère que la longueur du pendule à secondes reste identique partout sur terre, on peut l'utiliser comme unité de mesure de référence internationale. Cette idée circulait parmi les savants de l'Académie Royale des Sciences et de la Royal Society. En 1666, la découverte inattendue de Jean Richer (la longueur différente des pendules à secondes aux différentes latitudes terrestres) n'a pas encore eu lieu !

Dans la troisième partie des *Programmes*, l'idée de l'application des Horloges à pendule à la détermination des longitudes sur mer est reprise et développée :

---

<sup>568</sup>Ibid., 256.

« Parmi les diverses parties des Mathematiques celles qui doivent donner (ou *fournir*) plus d'occupations a nostre assemblee sont a mon avis celles qui ne consistent pas dans la seule theorie mais qui s'appliquent a la matiere et produisent des effects utiles. Non pas que la geometrie pure (ou *abstraite*) et l'arithmetique manquent de beautez qui au contraire y sont tres grandes, mais parce que de telles speculations ne sont pas une affaire d'assemblee, et ne servent au plus qu'a instruire ceux qui la composent, sans s'estendre plus avant. Outre qu'ayant par la faveur et liberalité du Roy-moyen d'executer des choses qui ne le pourroit [sic] estre par des particuliers, il est a propos de s'arrester principalement a celles là pour bien emploier ce bel avantage, et produire des effects qu'on ne peut attendre d'ailleurs. Dans cette vue l'on s'est proposé le restablissement de l'Astronomie comme un des plus dignes objects et il est certain qu'ayant des nouveaux moiens pour y travailler avec incomparablement plus d'exactitude que l'on n'a fait jusqu'icy qui consistent en (ou *comme sont*) *l'application des verres de lunette* aux instruments pour observer, en *la precise mesure* du temps par les Pendules, et la commodité du lieu que l'on aura pour faire les Observations l'on y acquerra des connoissances et developpera des veritez dont il y aura memoire a jamais. (...) L'on fera l'essay de l'Invention des longitudes sur mer par les Horologes a pendule, que l'on y a desia veu servir utilement. Et pour cela on mettra de ces horologes dans des vaisseaux qui vont en Amerique ou a d'autres voyages de long cours.

L'on essaiera ce qui se pourra faire pour les longitudes sur terre qui doivent servir à redresser les Cartes Geographiques »<sup>569</sup>

Huygens était vraiment impliqué non seulement dans la détermination des longitudes mais aussi sur tout ce qui concernait l'art de la navigation et son amélioration<sup>570</sup>. Un exemple marquant est sa réaction à l'ouvrage écrit par M. Renau, Capitaine de Vaisseau, Ingénieur Général de la Marine, & Chevalier de l'Ordre de Saint-Louis sur le principe de la *Théorie de la manoeuvre des vaisseaux*<sup>571</sup>. Le 9 mai 1695 le commentaire de Huygens

---

<sup>569</sup> Ibid., 264-267. (On trouve entre parenthèse ce que les éditeurs des *Œuvres Complètes* appellent les *leçons alternatives*)

<sup>570</sup> On trouve aussi des traces de son intérêt général pour la navigation dans sa correspondance avec Robert Moray (*Œuvres Complètes*, Tome IV, 274-276 & 318-321)

<sup>571</sup> Eliçararay de R.B. (1688), *De la théorie de la manoeuvre des vaisseaux*, Paris : chez Michallet E.

apparaît dans le *Journal des Sçavans*<sup>572</sup> provoquant la réaction de M. Renau. Il s'agit de deux distances différentes parcourues par un vaisseau, selon M. Renau, dans un même temps dans l'objectif de « prouver la position la plus avantageuse de la voile et du vaisseau, non seulement pour gagner au vent mais mesme pour faire quelque route que ce puisse estre, si la dérive du vaisseau n'y estoit pas comprise »<sup>573</sup>. Huygens voit dans la démonstration mathématique du dernier une erreur concernant la méthode de calcul de la vitesse du vaisseau et sa relation avec les forces qui l'environnent, la résistance de l'eau, le vent etc. La réponse du Général apparaît dans les numéros suivants du *Journal*<sup>574</sup> les 16 et 23 Mai 1695. Dans sa réponse, l'auteur soutient ne pas voir d'erreur de sa part car il imagine deux forces différentes, pour chaque distance parcourue, qui soient capables de pousser le vaisseau de sorte qu'il les parcoure dans le même temps. Huygens n'a pas donné suite à cette affaire, probablement convaincu par la réponse exhaustive du Général.

---

<sup>572</sup> Académie des inscriptions et belles-lettres (1695), *Le Journal des sçavans*, Paris : Cusson J., 207-212.

<sup>573</sup> *Ibid.*, 239.

<sup>574</sup> *Ibid.*, 219-225 & 236-240.

## VII. L'APPLICATION ET LA CONFIRMATION DE LA THEORIE GRAVITATIONNELLE.

### 1. 1672, Jean Richer, la découverte inattendue.

Ce qu'on appelle ici l'application de la théorie gravitationnelle est l'hypothèse newtonienne sur la forme de la Terre. La Terre a été longtemps considérée comme une sphère parfaite et les sciences la concernant, comme la géographie, l'on considérée comme telle. Un événement a instauré le doute dans la tête des savants du XVIIe siècle. Une découverte inattendue sur la longueur du Pendule à secondes, un pendule simple, un corps attaché à un fil, dont la longueur semblait dépendre de la latitude du lieu est venu chambouler les idées. Ce phénomène a été observé pour la première fois par Jean Richer, astronome de l'Observatoire de Paris, lors de son expédition à Cayenne en 1672-1673. Louis XIV venait de reconquérir l'Isle de Cayenne. Jean Richer est parti à là-bas afin de réaliser des observations astronomiques dans l'objectif d'établir les effets de deux phénomènes qui interviennent lors des observations astronomiques : la réfraction et la parallaxe des astres et des planètes. Jean Dominique Cassini ou Cassini I, premier directeur de l'Observatoire de Paris, effectuait les mêmes observations que Richer sur la même durée temporelle dans l'objectif de les comparer dès son retour à Paris et d'en déduire les effets de réfraction et de parallaxe lors de l'observation des astres et des planètes. Richer était accompagné lors son voyage par Mr. Meurisse dont le séjour à Cayenne lui coûtera la vie. À leur arrivée à Cayenne le 22 Avril 1672, leur préoccupation première fût de construire un Observatoire. Un Observatoire « sauvage » à l'image ses architectes nous dit Fontenelle dans son Histoire de l'Académie des Sciences. C'était une sorte de cabane « couverte de branches & de feuilles de Palmier, & fermée par les côtés avec des écorces d'arbres »<sup>575</sup> qui n'était pas à la hauteur des instruments de grande précision qui accompagnait les astronomes. Outre les instruments astronomiques, Richer avait à sa disposition deux Horloges à pendules<sup>576</sup> pour la mesure du temps, une qui bâtait la seconde et l'autre la demie seconde, fabriquées par Isaac Thuret Horloger

---

<sup>575</sup> Fontenelle M. d. (1733). *Histoire de l'Académie Royale des Sciences, depuis son établissement en 1666 jusqu'à 1686*. Paris: Imprimerie Royale, Tome I, 105.

<sup>576</sup> Richer J. (1679), « Recueil d'Observations astronomiques et physiques faites en l'île de Cayenne », in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris: Par la Compagnie des Libraires, Tome VII, Partie I, Chapitre II.

ordinaire du Roi et un pendule à secondes (pendule simple qui bâtait la seconde,  $T=2\text{sec}$ ) dont la longueur avait été étalonnée à Paris.

« J'avois pour la mesure du temps deux Horloges à pendule, dont l'une manquoit les secondes, & l'autre les demi-secondes : elles avoient esté faites par le sieur Thuret Horloger ordinaire du Roy, qui par son exactitude & la délicatesse de ses ouvrages, a surpassé jusques à present tous ceux qui se meslent de la fabrique des montres & des Horloges à pendule. »<sup>577</sup>

Nous ne trouvons malheureusement pas de description des Horloges à Pendules utilisées par Richer dans son recueil d'observations. Nous pouvons néanmoins faire l'hypothèse que les Horloges mécaniques dont nous parle Richer, réalisé par l'Horloger du Roi, étaient celles dessinées et déterminées géométriquement par Huygens. Il paraît assez étrange que Richer ne se réfère point à Huygens dans son recueil. Une Horloge de ce type se trouve dans le Boerhaave Museum à Leiden<sup>578</sup>.



Fig. 7.1. Photographie de l'Horloge à Pendule fabriquée par I. Thuret.

---

<sup>577</sup> Ibid., 3.

<sup>578</sup> Horloge à pendule, No. d'inventaire V09854, signature : Isaac Thuret, datée en 1670, au Musée Boerhaave à Leiden. Sa taille est indiquée comme suit : H: 120cm, H: 29cm, B: 24cm, D: 13cm. (<https://rijksmuseumboerhaave.nl/zoekenindecollectie/astronomischslingeruurwerk/V09854/>).

Cette horloge était destinée aux Observations astronomiques et elle a été réalisée très probablement sous les consignes de Christian Huygens. Son pendule a une longueur égale à environ un mètre, ce qui lui permet de battre la seconde. Ce type d'Horloge s'appelle un « régulateur ». Le cadran de l'Horloge comporte trois aiguilles, une pour les heures, une pour les minutes et une pour les secondes, mais leur disposition est différente de celle que l'on utilise communément aujourd'hui<sup>579</sup>. On trouve une Horloge d'une grande ressemblance à celle présentée ici sur la gravure qui ouvre le Recueil de Richer. L'auteur est présenté ici dans sa fonction d'astronome en plein travail, entouré des instruments qui lui était nécessaire pour ses Observations. Entre autre, au milieu de cette gravure figure une Horloge du même type que celle présentée plus haut.



Fig. 7.2 Photographie de la gravure présentée dans le Recueil d'Observations de Jean Richer.

Ces Horloges comme nous dit Richer, surpassaient en précision les Horloges existantes à cette époque. Le sens du terme précision utilisé ici est lié à la marche continue d'une Horloge à pendule, dont le mouvement oscillatoire représente fidèlement une unité de mesure du temps (la seconde ou la demi-seconde). Richer dès son arrivée à Cayenne a suivi une opération de calibrage de ses Horloges afin de « connoître quel rapport les révolutions journalières de l'horloge avoient avec celles du Soleil & des fixes »<sup>580</sup>. L'expédition de Richer est un excellent exemple de l'usage de la mesure du temps, et de

---

<sup>579</sup> Les informations sur l'Horloge en question ont été trouvées sur la page numérique du Musée Boerhaave à Leiden.

<sup>580</sup> Richer J. (1679), Chapitre IV, 12.

la nécessité de sa précision pour la réalisation des Observations astronomiques. L'extrait que nous citons par la suite nous permet de connaître la manière dont l'Horloge à pendule qui battait la seconde était utilisée lors de ses observations, et surtout de constater à quel point elle a facilité le travail des Astronomes :

« Comme toutes ces Observations dépendent du mouvement des pendules, j'avertis en les donnant jour par jour, lors qu'il a esté interrompu, afin que l'on connoisse celles qui ont de la connexion ensemble & celles qui n'en ont point, à cause de l'interruption.

Je me suis pas mis en peine en me servant des horloges à pendule, pour marquer la difference de temps du passage des Fixes, du Soleil, & des autres Planettes au méridien, de leur faire marquer l'heure du mouvement du Soleil qui n'estoit point nécessaire à mon dessein en ce lieu, quoy-que néanmoins on le puisse aisément conclure en plusieurs endroits, par le passage du centre du Soleil au méridien, dont le temps est marqué par l'horloge. Et si j'ay eû besoin ailleurs dans mes autres Observations de sçavoir l'heure du mouvement du Soleil je ne manqueray pas de le faire remarquer.

On remarquera aussi que je n'ay point corrigé le mouvement des pendules, soit qu'elles avançassent ou retardassent à l'égard du mouvement journalier des Fixes : ce que j'ay fait exprés, afin de donner mes Observations telles que je les ay faites, les laissant à corriger à ceux qui en voudront tirer les conséquences, ou à moy lors que je voudrais faire la mesme chose, é que j'en auray le loisir.

Sachant que l'horloge à secondes retardoit tous les jours de 4'. 10''. de temps à l'égard du mouvement journalier des Fixes, comme on peut voir par les Observations (...) »<sup>581</sup>

Les observations de Richer l'ont amené à faire une découverte inattendue. Le Chapitre X (où il n'est plus sujet des Observations Astronomiques mais des Observations Physiques) s'ouvre avec un bref article dédié à cette découverte.

« L'une des plus considerables Observations que j'ay faites, est celle de la longueur du pendule à secondes de temps, laquelle s'est trouvée plus courte en Caïenne qu'à Paris :

---

<sup>581</sup> Ibid., Chapitre IX., 36.

car la mesme mesure qui avoit esté marquée en ce lieu-là sur une verge de fer, suivant la longueur qui s'estoit trouvée nécessaire pour faire un pendule à secondes de temps, ayant esté apportée en France, & comparée avec celle de Paris, leur difference a esté trouvée d'une ligne & un quart, dont celle de Caïenne est moindre que celle de Paris, laquelle est de 3. pieds 8. lignes  $\frac{3}{5}$ . Cette Observation a esté reïterée pendant dix mois entiers, où il ne s'est point passé de semaine qu'elle n'ait esté faite plusieurs fois avec beaucoup de soin. Les vibrations du pendule simple dont on se servoit, estoient fort petites, & duroient fort sensibles jusques à cinquante-deux minutes de temps, & ont esté comparées à celles d'une horloge tres excellente, dont les vibrations marquent les secondes de temps. »<sup>582</sup>

Ici l'auteur se réfère bien à un pendule à secondes et non pas à une Horloge à pendule qui bâte la seconde. Pour avoir une idée de la fabrication des pendules à secondes dans les années 1670, on peut se référer à la description de l'Abbé Picard dans son ouvrage *La mesure de la Terre*<sup>583</sup>. Dans cet ouvrage Picard explique que pour fabriquer un pendule à secondes nous avons tout d'abord besoin d'un fil assez flexible, souvent en soie. La soie avait le désavantage de changer de taille selon l'humidité du lieu d'observation. Afin d'éviter cet inconvénient Picard propose aux Astronomes d'utiliser des brins de Pite « une sorte de filasse qu'on apporte de l'Amérique. » Il s'agit très probablement d'une plante qu'on appelle *Aloés Pitte* ou *Chanvre des Indiens*.

« Il est bon d'observer que la seconde écorce de cette plante est toute composée de fils très-forts, dont le tissu ressemble un peu à de la grosse toile, mais dont les fils au lieu d'être entrelacés, comme le font ceux de la trame & de la chaîne de nos toiles, ne sont simplement qu'appliqués & collés les uns contre les autres ; (...) C'est des feuilles de cette sorte d'aloès, préalablement battues ou écrasées & privées de leur suc, que les Indiens de la Guiane tirent des fils très-longs & assez beaux, dont ils font des hamacs, des

---

<sup>582</sup> Ibid., Chapitre X, 66.

<sup>583</sup> Picard J. (1671), *Mesure de la Terre*, Paris : Imprimerie Royale, Article IV, 4.



voiles, des cordes & autres ouvrages (...) la toile qu'on fait au moyen des fibres des ses feuilles préparées, approche beaucoup, (...) de la soie. »<sup>584</sup>

Ce fil semble avoir été considéré comme idéal pour la fabrication des pendules à secondes, on le retrouve utilisé par les savants durant la première moitié du XVIIIe siècle. Le corps attaché au fil, nous dit Picard, a de préférence la forme d'une boule, de diamètre égale à un pouce, de matière cuivre et de poids égal à celui « d'une balle de mousquet ». « Le haut du filet estoit passé dans une pincette quarrée qui le tenait serré, et le terminoit exactement. Par ce moyen le mouvement du pendule estoit plus libre, et la longueur plus facilement mesurée avec une verge de fer, exactement comprise entre la pincette et la boule ».<sup>585</sup> Le pendule à secondes décrit dans ce texte, était d'une longueur de 36 pouces 8 lignes et  $\frac{1}{2}$ . Cette longueur n'a pas été étalonnée directement par comparaison aux étoiles fixes comme dans le cas de Galilée. Elle était déterminée par rapport à deux Horloges à Pendules qui bâtait la seconde déterminée par le jour solaire moyen, avec une fidélité et une continuité de marche qui pouvait durer plusieurs jours de suite.

Après 10 mois d'observations, Richer a constaté que le pendule à secondes effectuait des oscillations plus lentes à Cayenne que celles qu'il effectuait à Paris, il retardait d'environ 2'28'' par jour. Pour arriver à cette conclusion il nous dit avoir comparé son pendule simple qui battait la seconde à une excellente Horloge, similaire à celle de Picard. Cette information est particulièrement intéressante. Si l'on considère avec Newton que la force gravitationnelle est inversement proportionnelle à la distance du centre de la Terre, nous pouvons déduire la forme aplatie de la Terre aux pôles. Si le pendule à secondes bât plus lentement proche de l'équateur qu'à la latitude de Paris, cela veut dire que l'accélération de la gravité n'est pas constante en toute latitude de lieu. Mais cette observation a été faite par comparaison entre le pendule à secondes (pendule simple) et une Horloge mécanique à pendule de la même période d'oscillation. On peut se poser la question de la fiabilité de cette découverte. L'Horloge mécanique à pendule n'est-elle pas

---

<sup>584</sup> Valmont de Bomare J.-C. (1791), *Dictionnaire raisonné universel d'histoire naturelle*, Lyon : Bruyset Frères, Tome I, 148-149.

<sup>585</sup> Picard J. (1671). Le fascicule de ce pendule fait partie de la collection d'instruments de l'Observatoire de Paris. Sa photographie est illustrée à l'exposition virtuelle « <http://measuredutemps.obspm.fr> ».

sujette à l'accélération de la gravité qui varie selon la latitude du lieu? Une autre question s'ensuit alors : Pourquoi les Astronomes avaient avec eux un pendule à secondes pour les Observations astronomiques puisque les excellentes Horloges mécaniques étaient à leur disposition ?

Une des raisons intéressantes pour laquelle le Pendule à secondes accompagnait les Astronomes dans leur voyage était le désir d'établir une mesure universelle. Un témoignage précoce de cette idée se trouve dans la correspondance entre Robert Moray, initiateur de la création de la Royal Society à Londres, Institution fondée en 1660, et Christiaan Huygens. Robert Moray écrit à Huygens en 23 Décembre 1661 et présente une idée qui pourrait amener à définir une mesure universelle. Son idée était de lier cette mesure à la longueur du pendule ajusté pour réguler une horloge battant la seconde :

« Seulement Je vous diray, que sur la proposition qui a esté faite dans nostre Assemblée il y a 15. jours, touchant une Mesure Universelle, c'est a dire, telle que l'on la puisse faire exactement egalle en tous lieux sans se la communiquer au preallable: (Comme si Je voûs priois de m'envoyer une aulne de Ruban, ou une livre de sucre, mesure d'Angleterre, sans que vous eussiez la mesure de l'aulne ou de la livre Angloise, vous eussiez le moyen de me les envoyer par une mesure commune qui se trouve partout.) l'on est apres pour voir si cela se peut faire par le pendule, ajusté selon vostre invention, par des segments de Cycloides. Ce qu'on s'y propose est, si l'on peut faire, par exemple, un pendule de la longueur qu'il faut, pour mesurer une minute seconde exactement, par chaque vibration, ou excursion, en sorte que cette longueur soit toujours egalle en tous lieux; alors cela pourra passer pour un fondement de mesure universelle dont toutes les autres mesures, tant de differentes especes que de differentes quantitez de chaque espece se peuvent deriver. Or si, par vos Cycloides, deux pendules de mesme longueur, comptant depuis le centre de Gravité du poids appendu au sommet du l, (dont on compte le poids pour rien.) ayant des poids differents appendus, font leurs excursions en temps egal, l'affaire est faite. pour scavoir donc si cela se fait, nous avons fait faire des pendules a vostre mode, et sommes apres l' experiment de la chose, dont vous scaurez le succes. Vous pourrez peut estre, avec justice, nous reprocher l'impatience qui nous pousse a faire cet experiment devant que

Vostre traité soit publié. Mais ne nous reprochez point l'impatience puisque, considéré l'enuie que nous avons de voir vos traittez, il y a dix ans que nous les attendons. »<sup>586</sup>

Dans cette lettre Moray exprime l'impatience de la R.S. de définir cette mesure universelle. Étant déjà au courant des avancés de Huygens au sujet de l'isochronisme du pendule la société se précipite de fabriquer ses propres pendules de poids différents, de les comparer afin de pouvoir établir la longueur exacte du Pendule qui bât la seconde et de les utiliser par la suite comme étalon de toute mesure. Le 30 Décembre Huygens lui répond en expliquant que l'étalonnement d'un pendule simple est suffisant pour cette entreprise. Il n'y a point besoin d'un pendule cycloïdal:

« La fabrique de ma machine m'a empesche quelque temps de travailler aux traittez dont vous me demandez de nouvelles. J'ay entre les mains celuy de l'horologe, du quel une grande partie est dediée aux mouvements et particulièrement j'y ay parlé de cet usage du pendule pour la mesure universelle, dont vous dites qu'on a traité dans vostre assemblee. Je ne trouve pas qu'il soit necessaire d'egaler le mouvement du pendule par les portions de Cycloide pour determiner cette mesure, mais qu'il suffit de le faire mouvoir par des vibrations fort petites, les quelles gardent assez pres l'egalité des temps, et chercher ainsi quelle longueur il faut pour marquer par exemple, une demie seconde<sup>587</sup> par le moyen d'une horologe qui soit desia en train de bien aller, et ajustee avec la Cycloide. Dans l'experiance que vous allez faire de la vertu de cette ligne, si l'evenement ne respond pas tout a fait a ce que j'en ay demonstré vous pouvez estre assuré que la cause en est le medium de l'air, qui n'est pas consideré dans la theorie, et une autre peut estre encore plus efficassieuse qui est le defaut du fil du pendule, qui s'estend plus au moment que le plomb est au bas de l'arc qu'il décrit qu'ailleurs, et par ainsi gaste un peu la figure de cycloide qu'il doibt parcourir. J'ay trouuè depuis quelque

---

<sup>586</sup> Huygens C. (1890), *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*, La Haye : Nijhoff, Tome III (La correspondance 1660-1661), 427-428.

<sup>587</sup> Ibid. 440 « J'ay trouvè cette longueur de 91/2 pouces bien exactement de nos pieds de Rhynde, a scavoir depuis le point de suspension jusqu'au centre de la boule, que je prenois de diverse grandeur et differente matiere ». Note 13 : « 91/2 pouces de Rhinlande font 248,56 mm. Or, pour la latitude de la Haye, la véritable longueur du peudule à secondes est de 994,25 mm (1 vibration = 1 aller dans ce cas), donc celle du pendule à demi-secondes de 248,56 (1 aller-retour du pendule marque une seconde), ce qui coïncide exactement avec la mesure donnée par Chr. Huygens. »

temps le moien d'ajuster fort precisement à son heure mon horologe par un petit plomb mobile que j'applique a la verge de cuivre du pendule, le plomb d'en bas demeurant tousjours ferme. »<sup>588</sup>

Huygens attire l'attention de son correspondant sur les points qui doivent être prise en compte lors de la détermination de la longueur du pendule. Un pendule simple est suffisant pour cette affaire à condition que ses oscillations restent de petite amplitude. L'isochronisme du pendule à secondes est ainsi assuré. Par contre pour l'étalonnage de ce pendule il faut avoir en sa possession une Horloge à Pendule avec des joues cycloïdales, bien calibré pour battre la demi-seconde. Huygens souligne que les causes qui peuvent induire une différence entre le résultat expérimentale et le résultat théorique (du mouvement pendulaire de l'Horloge) sont au nombre de deux : la résistance de l'air, et la longueur du fil qui se rallonge quand le pendule se trouve en position verticale. La mesure universelle était un sujet qui préoccupait les esprits savants de cette époque et sa solution resta un objectif majeur pour longtemps. Nous avons vu dans le Chapitre V comment le manque d'une mesure universelle pouvait entrainer des mécompréhensions des résultats. Picard souligne cette idée dans son ouvrage *Mesure de la Terre*<sup>589</sup>. Il met en avant l'importance de sauver la toise de Paris comme étalon de mesure universelle de distance. Une manière de le faire était de rattacher à cette mesure un phénomène naturel or la longueur du pendule à secondes offrait cette possibilité.

Pour revenir à Jean Richer et son incontournable découverte il faut dire que celle-ci n'a pas été facilement acceptée par ses contemporains. Il va sans dire qu'elle a intriguée les esprits, et les observations à ce sujet se sont multipliées au fur et à mesure du temps passé. Huygens exprime ses doutes dans sa lettre du 1<sup>er</sup> Mai 1687 destinée à De La Hire<sup>590</sup>:

« Il y a parmy mes escrits un petit traité de la cause de la Pesanteur, auquel je souhaiterois d'ajouter quelques reflexions sur ce que Mr. Richer et autres ont observè, touchant la differente longueur des pendules en diferens climats, mais ayant cru que Mr.

---

<sup>588</sup> Ibid., 438.

<sup>589</sup> Picard J. (1671), Article IV.

<sup>590</sup> Huygens C. (1901), *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*, La Haye : Nijhoff, Tome IX (La correspondance 1685-1690), 130-131.

Picart dans l'Isle de Tycho Brahe pretend<sup>591</sup> avoir trouvé la mesme longueur qu'au Cap de Cete et a Paris, et que l'observation du Sr. Varin<sup>592</sup> qui est rapportée au traité de Mr. Mariotte du mouvement des eaux ne garde point de proportion avec celle de Mr. Richer je ne scay ce qu'il faut croire touchant ce phaenome. C'est pourqoy je vous prie Monsieur de me mander au plus tost, si vous en avez d'autres informations qui vous persuadent qu'il y a effectivement cette variation dans la nature ce qui me semble fort vraisemblable, quoyque je puisse aussi rendre raison, en cas qu'elle ne s'y trouve pas. J'attens sur ce sujet les observations faites au Cap de Bonne Esperance par deux personnes<sup>593</sup> qui sont allés jusques la avec mes Horloges pour mesurer les longitudes

---

<sup>591</sup> Il s'agit ici du voyage de l'Abbé Picart à Uranibourg où il a trouvé la longueur du Pendule à secondes la même valeur que celle définie à Paris à savoir 36 pouces 3 lignes et demie. « Observations Astronomiques faites en divers endroits du Royaume, par Monsieur Picart de l'Académie Royale des Sciences » in *Mémoire de l'Académie des Sciences*, Tome VII, Partie I, 346.

<sup>592</sup> La valeur trouvée pour la longueur du pendule dans l'Isle de Gorée par Varin est de 3 pieds, 6 lignes et demie. Ce résultat se trouve dans l'ouvrage de Mariotte E. (1740), « Traité des mouvements des eaux » in *Oeuvres de M. Mariotte*, La Haye : chez Jean Neaulme, Tome I, 413 – 414. Mariotte donne une description du pendule à secondes qu'il utilise lors de ses expériences :

« Pour marquer le tems de l'écoulement, on se servoit d'un pendule de fil très-délié, chargé à son extrémité d'une balle de plomb de 8 lignes de diamètre. La longueur du fil étoit de 3 pieds & 8 lignes jusques au centre de la balle depuis le point de suspension. Ce pendule emploïoit une seconde à chaque battement, & on s'en assûroit en le comparant à une pendule ou horloge très-juste qui marquoit les secondes. (...) Dans les païs proche de la Ligne le pendule soit être plus court, à cause que le mouvement de la surface de la terre en ces endroits est plus grand qu'en France. Mr. Richer & Mr. Varin en ont fait des observations ; le premier à la Cayenne, où il a trouvé plus court de 1 ligne  $\frac{1}{4}$  (donc une différence de longueur de  $1,25/144$  pied et donc une variation relative de longueur pour un pendule de 3 pieds et 8 lignes qui vaut  $2,84 \cdot 10^{-3}$  ; sur la période, cela correspond à une desynchronisation relative de moitié soit d'une oscillation sur 700 environ ; la variation relative de g est de  $2.84 \cdot 10^{-3}$  soit de 0,03 à peu près sur la valeur de g) ; & l'autre en l'Isle de Gorée proche du Cap- Verd, où il le faloit seulement de trois pieds 6 lignes  $\frac{1}{2}$ . »

<sup>593</sup> Les personnes en question sont Thomas Helder et Isaak de Graaf. Thomas Helder est le pilote du vaisseau « Alckmaer » et Isaak de Graaf chargé par Chr. Huygens de diriger les expériences des horloges à pendule pour la détermination de la longitude sur mer. Huygens nous donne des informations relatives au voyage. La première est datée de 9 Septembre 1685 et elle est destinée à son père. Dans celle-là il dit avoir vu le vaisseau qui transportera ces Horloges et il exprime sa crainte « que si les horloges peuvent se maintenir la dedans avec un temps médiocre, l'on ne doutera pas qu'ils ne puissent souffrir la tempeste » jusqu'au Indes Orientales. Il ajoute par la suite qu'un jeune mathématicien accompagnera ces Horloges. De la deuxième nous avons qu'un très bref résumé en Hollandais et en Français de la fonction de Thomas Helder et de sa mort

sur mer, et qui doivent estre de retour dans un mois ou deux. Je vous feray part de ces observations, mais comme la latitude du Cap est de 35 degrez, il n'y aura pas apparemment de difference bien sensible, supposé que l'observation de Mr. ... soit vraie. »

L'Abbé Picard était établi comme une autorité dans la communauté savante. Une valeur différente que celle de l'Abbé ne pouvait pas avoir un avenir favorable. Lors du séjour de Jean Richer à Cayenne, Picard effectuait les Observations au Danemark et il insistait sur son résultat de mesure de la longueur du pendule à secondes. Il a été le premier à exprimer son avis sur la découverte de Richer. Il soutient avoir trouvé la même longueur entre Uranibourg et Paris en présence de plusieurs témoins. Ce résultat lui permet d'exercer une critique ardue contre toute expérience qui soutenait la variabilité de la longueur pendulaire selon la latitude des lieux<sup>594</sup> effectuée jusqu'alors. Il avait à sa disposition deux horloges à pendule, une Horloge à demi-secondes, protégée dans une petite boîte et une Horloge à secondes, attachée contre un mur dans un lieu loin de bruits et de perturbations<sup>595</sup>. Cependant l'existence du résultat de Richer était suffisante pour planter les germes du doute au sujet de l'universalisation de la longueur du pendule. Cette histoire peut paraître anodine, mais elle loin de l'être. Cette découverte obligeait à repenser une figure terrestre différente de celle acceptée jusqu'alors et cette figure nécessitait une théorie qui viendrait l'appuyer. La Terre n'aurait donc plus la forme d'une sphère parfaite mais celle d'un sphéroïde aplati aux pôles. Huygens proposera une théorie dans son traité cité plus haut sur la cause de la pesanteur, comme Newton l'avait fait avant lui dans la première édition des *Principia*. Huygens rejette la théorie de l'attraction universelle de Newton et s'inscrit dans une théorie proche de la théorie des tourbillons de Descartes. Les deux théories, de fondement théorique et philosophique différents, aboutissent au même résultat. La valeur de la diminution de la pesanteur du pôle vers l'équateur est égale à  $\frac{1}{289}$ . Pierre Costabel dans son article *Science positive et Forme de la Terre au début du XVIIIe siècle*, souligne un fait très intéressant au sujet de ce résultat:

---

durant le voyage. Huygens Chr. (1901), « Correspondance 1685-1690 », in *Œuvres Complètes*, La Haye : Nijhoff M., Tome IX, Lettres No. 2398, et No. 2407, note 2.

<sup>594</sup> Picard J. (1729), « Voyage D'Uranibourg », in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris : Imprimerie Royale, Tome VII, Partie I, 208.

<sup>595</sup> Ibid., 202.

« Quiconque jette un regard sur les calculs qui conduisent à ce résultat soit chez Newton, soit dans les manuscrits de Huygens, ne peut manquer de constater à quel point les calculs en question sont dépourvus du contrôle d'approximation qui s'imposerait normalement, et seul Huygens a eu une raison pour adopter  $\frac{1}{289}$ . C'est que 289 est un carré parfait, le carré du nombre premier 17, de telle sorte que la diminution relative de la pesanteur à l'équateur reçoit aussitôt une explication simple dans la théorie tourbillonnaire : à savoir que la matière subtile, responsable de la pesanteur par son tourbillon, va 17 fois plus vite que la Terre dans son mouvement de rotation. »<sup>596</sup>

Costabel n'entre pas dans les détails du calcul et nous allons suivre son exemple. Ce qu'il faut retenir ici c'est que deux théories différentes donnent le même résultat. Un résultat de mesure vient de se rajouter au sujet de la forme de la Terre. Lors des mesures géodésiques effectuées par l'Observatoire de Paris dans l'objectif d'améliorer la cartographie du royaume de France, Jean Dominique Cassini dans un article parue en 1701 annonce son résultat de mesure de Paris aux Pyrénées. Cassini a trouvé que les degrés vers Paris (Nord), sont plus petits que ceux qui allaient aux Pyrénées (Sud). Ce résultat annonçait contre toute attente théorique une forme de la Terre oblongue, ou autrement aplatie à l'équateur et non pas aux pôles. Cassini dans son article nous dit que « Après que le globe de Jupiter nous a paru un peu ovale, on a douté si la terre ne seroit pas aussi un peu ovale, & après que les observations faites par l'Académie Royale à la Cayenne, au Cap verd, & aux Isles de l'Amérique, nous ont appris que les Pendules de la même longueur sont les vibrations plus lentes proche de l'Equinoxial qu'aux grandes distances. M. Huguens, & M. Newton ont tâché d'expliquer ce Phenomene par une hyothese qui fait l'Equinoxial plus grand que les meridiens, de sorte que sa figure seroit aplatie par les Poles, au lieu que M. Eisenschmid, en comparant les diverse dimensions des degres faites en divers lieux, pour les accorder ensemble, a supposé la terre ovale plus longue d'un Pole à l'autre que suivant le diamtre de l'Equinoxial, faisant les meridiens de figure elliptique dont les perpendiculaires sont dirigées à divers points de

---

<sup>596</sup> Costabel P. (1988), « Science Positive et Forme de la Terre au début du XVIIIe siècle », in *La figure de la Terre du XVIIIe siècle à l'ère spatiale*, Lacombe H. & Costabel P. (eds.) Paris : Gauthier-Villars, 98.

l'axe. Il attendoit pourtant le succès de nos dimensions, pour en pouvoir juger avec plus de certitude. »<sup>597</sup>

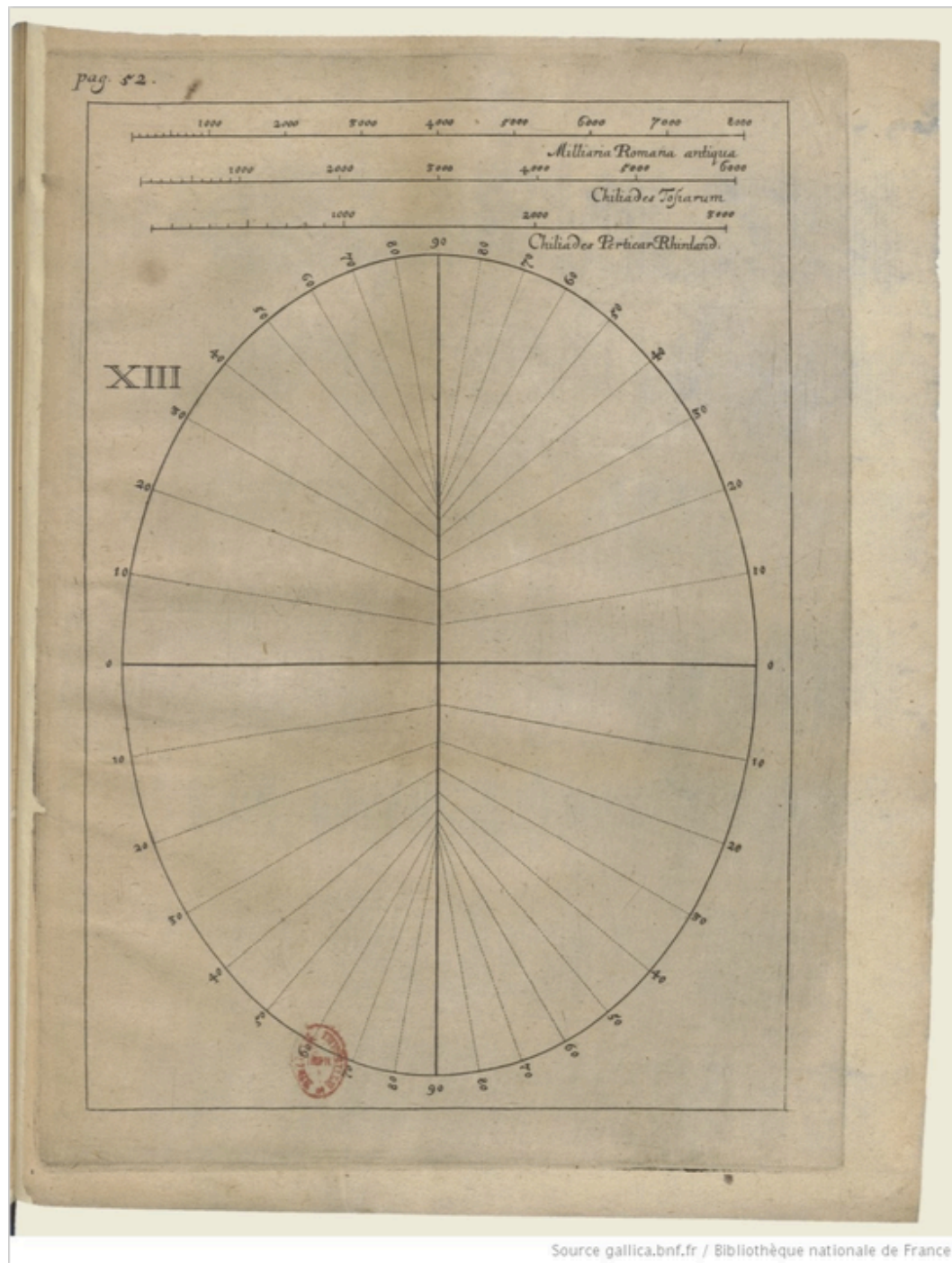


Fig. 7.3. Photographie de la figure originale de la *Diatribes* de Eisenschmit J.C. (Source : Gallica)

<sup>597</sup> Cassini J.D. (1701), « De la meridiene de l'observatoire royal prolongée jusques aux Pyrenées », in *Histoire de l'Academie Royale des Sciences*, Paris : Chez Boudot J., 180.



À la forme aplatie de la Terre vient de se rajouter la forme oblongue. Pour rajouter de la fiabilité à ses résultats de mesure Cassini nous renvoie à la thèse mathématique de Johan Caspar Eisenschmit<sup>598</sup>. Il s'agit d'un ouvrage de deux parties distinctes. Dans la première il s'agit de la présentation des mesures de la Terre de l'Antiquité La deuxième partie est le développement argumentatif par une série de démonstrations géométriques en faveur de la forme oblongue de la Terre. Eisenschmit dessine la forme oblongue de la Terre avec un découpage très original qui indique la taille de la Terre dans des différentes latitudes de l'équateur jusqu'aux pôles. La forme de la Terre occupe une grande place dans l'historiographie. Elle a été traitée à tout ses aspects dans un cadre particulier celui de la guerre ouverte au sol français entre les « cartésiens » et les « newtoniens ». Nous n'allons pas se lancer dans cette discussion et nous n'allons pas prendre part de la bonne interprétation des enjeux de cette période. Notre objectif ici est la préparation du terrain pour l'arrivée de la présentation de la pensée newtonienne à ce sujet.

Newton prend au sérieux le résultat de Richer. En appliquant sa loi gravitationnelle, il déduit la forme de la Terre. La Terre quitte sa forme sphérique pour en trouver une autre celle d'un sphéroïde aplatie aux pôles. Ce phénomène d'aplatissement n'est pas néanmoins réservé à la Terre. Les Observations astronomiques, celles de Jean Dominique Cassini et de John Flamsteed, avaient montré que Jupiter est également un sphéroïde aplati. Huygens a également déduit la forme aplatie de la Terre mais sans pour autant considéré la gravité variable sur les différents lieux de la Terre. Pour Huygens la gravité peut très bien restée constante indépendamment de la forme de la Terre. La cause de son aplatissement peut être considérée l'effet de la force centrifuge dû à la rotation de la Terre autour de son axe.

---

<sup>598</sup> Eisenschmit J.C. (1691), *Diatribes de figura telluris elliptico-sphaeroide*, Argentorati : Spoor J. F.

## 2. La forme de la Terre.

Dans le troisième Livre des *Principia*, la force gravitationnelle trouve des applications diverses dans l'objectif de l'explication des phénomènes terrestres et célestes, entre autres celui de la forme de la Terre. Nous avons mentionné plus haut dans ce Chapitre que si l'on combine la loi gravitationnelle de Newton et la découverte inattendue de Richer nous pouvons déduire la forme aplatie de la Terre considérée comme une sphère parfaite jusqu'alors. Ce que Newton a fait progressivement dans les Propositions XVIII, XIX et XX du troisième Livre.

Dans la Proposition XVIII il prépare le terrain de son hypothèse. Newton nous invite d'imaginer les planètes immobiles ; il nous dit que dans ce cadre les planètes sont absolument sphériques et la gravité de leurs parties est égale à tous les niveaux. Mais ceci n'est pas le cas dans notre réalité. Les planètes, nous dit Newton, suivent un mouvement rotatoire autour de leurs axes respectifs. Dans ce cas, les parties constitutives des planètes ont une tendance de s'éloigner de l'axe de rotation dû à leur mouvement rotatoire. Newton imagine à ce point que les planètes sont faites de matière fluide. Leurs diamètres au niveau de l'équateur ainsi se rallongent. Ce rallongement est le résultat de l'effet exercé par la rotation des planètes (la tendance de s'éloigner de l'axe de rotation) sur leurs parties qui se trouvent au niveau de l'équateur. Puisque la quantité du fluide reste inchangée, cela veut bien dire que si le diamètre au niveau de l'équateur se rallonge et le diamètre au niveau des pôles, ou autrement dit la longueur de l'axe de rotation, se raccourcit. Newton pour souligner la vérité de son hypothèse fait appel aux Observations Astronomiques. Il nous dit que les observations de Jupiter ont montré que ses diamètres, vertical et horizontal, ne sont pas égaux. Le diamètre qui lie les deux pôles s'avère plus petit que celui qui lie deux points opposés au niveau de son équateur. « *Les axes des planettes sont plus petits que les rayons de leurs équateurs.* »<sup>599</sup> De même pour notre Terre nous dit-il à la fin de cette Proposition. Newton avance dans son raisonnement ensuite par la détermination de la proportion entre les deux diamètres.

---

<sup>599</sup> Newton I. ([ 1756] 1759), Livre III, 34.

Ceci est l'objectif de la Proposition XIX. Pour traiter le problème de la figure de la terre Newton fait l'hypothèse d'une Terre parfaitement sphérique, de matière homogène et fluide (avant d'acquiescer son mouvement rotatoire autour de son axe). À la suite de cette hypothèse pour étudier la forme de la Terre il pose deux conditions : une fois le mouvement rotatoire acquis, a) la matière qui compose la Terre doit rester en équilibre et b) la forme de la Terre doit être constante. Prenant en compte la découverte de Richer à Cayenne, et pour respecter les deux conditions préétablies, Newton nous dit que l'axe équatorial de la Terre (là où la pesanteur diminue à cause de la force centrifuge) doit être plus longue que l'axe polaire. Quand la Terre est supposée comme une sphère parfaite, avant son mouvement rotatoire, la force de la gravité reste la même pour toute sa surface. Après l'acquisition de son mouvement rotatoire, la forme de la terre subit les effets de la force centrifuge (la tendance à éloigner les parties de la Terre de son axe). Pour trouver la proportion entre les deux axes (polaire et équatorial) Newton suppose que la gravité est le résultat des attractions de toutes les particules dont est composée la terre (ici homogène). Il utilise les connaissances mathématiques et physiques de son époque ainsi que des observations effectuées par les astronomes et les savants. Les données scientifiques qu'il a à sa disposition pour le traitement du problème sont les suivantes:

1. Le rayon de la Terre (supposée sphérique) déterminée par Picard  $R=19.615.800$  pieds de Paris
2. La distance parcourue par un corps en chute libre en 1 seconde à la latitude de Paris, calculée par Huygens qui a fait le lien mathématique entre la longueur du pendule qui bat la seconde et la chute libre d'un corps dans 1 seconde  $h=2174$  lignes de Paris (la résistance de l'air est prise en compte par Newton<sup>600</sup>)
3. Le temps de la révolution diurne de la terre  $T= 23^h56'4'$  (sidérales)
4. La latitude de Paris  $48^{\circ}50'10''$ .

La cinquième et dernière donnée que Newton a utilisée ici, est celle de la longueur du pendule à secondes à la latitude de Paris. Seulement cette fois-ci Newton ne se réfère plus à la valeur donnée par Huygens, comme il fait à la Proposition IV du troisième Livre

---

<sup>600</sup> Ibid., 35. « Mais le poids des corps diminue par le poids de l'air qui les environne ; supposons que cette diminution soit la  $\frac{1}{1100}$ e partie du poids total, le corps tombant dans le vuide parcoureroit 2174 lignes en une seconde. »

que nous avons étudié dans le Chapitre IV de cette thèse. Il change de Savant de référence. Le résultat de mesure utilisé ici est celui donné par Dortus de Mairan  $l = 3\text{pieds } 8\frac{5}{9}\text{ lignes de Paris}$ , ou plus exactement même  $3\text{pieds } 8\frac{17}{30}\text{ lignes}$ . De Mairan ne se prononce pas dans son article pour ou contre la théorie de Huygens ou celle de Newton. Il se concentre vraiment à la tâche de la mesure de la longueur du pendule à secondes.

« J'avouë qu'après ce que M.<sup>rs</sup> *Richer & Picard* ont dit de la longueur du Pendule à Paris, & les épreuves qu'ils assûrent en avoir faites, il ne paroît pas possible qu'on puisse s'écarter bien sensiblement de la véritable mesure. Le premier cependant fait cette longueur de 3 pieds 8 lignes &  $\frac{3}{5}$ . Le second de 3 pieds 8 lignes &  $\frac{1}{2}$ , la différence est d'un 10.<sup>me</sup> de ligne. Ceux qui voudront mettre la main à l'œuvre, sçauront bientôt combien il est difficile de juger de quel côté est l'erreur. »<sup>601</sup>

Pour ce faire de Mairan a réalisé un nombre considérable d'expériences avec les pendules de longueurs de fils différentes, de différents poids attachés, de mouvement oscillatoire simple, conique etc. De Mairan effectue ses expériences avec un soin remarquable. Newton a ainsi des bonnes raisons de se fier à son résultat.

Newton a utilisé les données mentionnées plus haut pour trouver les rapports entre les forces (centrifuge et gravitationnelle) à la latitude de Paris ( $48^{\circ}50'10''$ ) et à l'équateur et il arrive ainsi à calculer l'aplatissement de la Terre trouvant le rapport des longueurs de deux axes (polaire et équatorial)<sup>602</sup>  $\frac{\text{diametre de la Terre équatoriale}}{\text{diametre de la Terre polaire}}$  est comme  $\frac{230}{229}$ . Cette proportion, selon les données mentionnées plus haut, nous donne la longueur du rayon polaire  $R_p = 19.573.000\text{pieds de Paris}$  et la longueur du rayon équatorial  $R_{\text{éq}} = 19.658.600\text{pieds de Paris environ}$ .<sup>603</sup> La dernière phrase de cette proposition nous

---

<sup>601</sup> Mairan de D. (1753), « Expériences sur la Longueur du Pendule à Secondes à Paris: Avec des Remarques sur cette matière, & sur quelques autres qui s'y rapportent » in *Histoire de l'Académie royale des sciences ... avec les mémoires de mathématique & de physique... tirez des registres de cette Académie*, Paris : Imprimerie Royale, 153-220.

<sup>602</sup> Pour plus d'informations sur le calcul newtonien voir: Newton I. (2016), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, traduction par Emilie du Châtelet, édition critique par Toulmonde M., Ferney-Voltaire : Centre international d'étude du XVIIIe siècle, 291-300.

<sup>603</sup> Newton I. (2016), Tome II, 38.

prépare pour la suite: « Que la gravité diminue sous l'équateur par la rotation diurne de notre terre, & que par conséquent elle doit être plus élevée vers l'équateur qu'aux pôles, (si sa matière est d'une densité uniforme) c'est ce qui paroîtra clairement par les expériences des pendules que je vais rapporter dans la Proposition suivante. »<sup>604</sup>

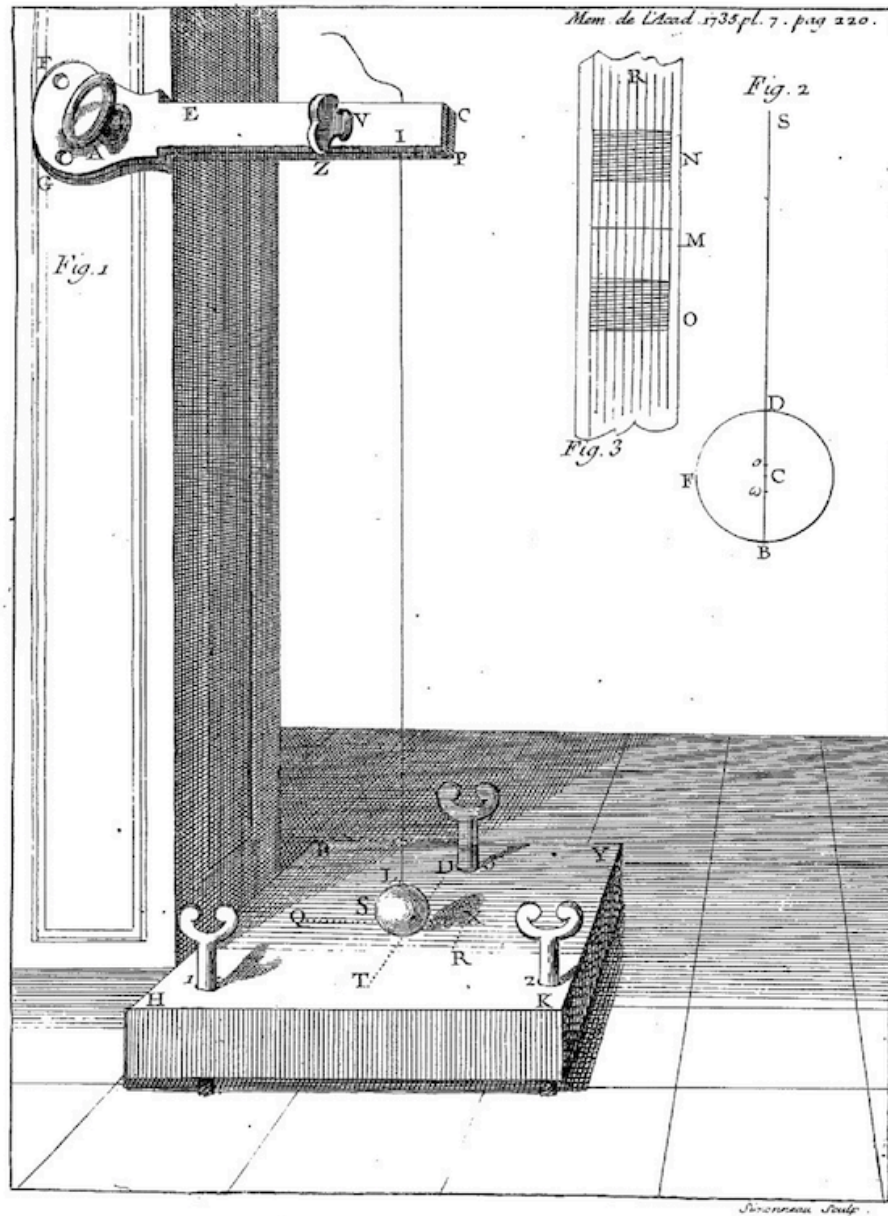


Fig. 7.4. Photographie du dessin originale du dispositif utilisé par de Mairan pour la détermination de la longueur du pendule à secondes à la latitude de Paris.

La Proposition XX prenant en compte le résultat de la Proposition XIX, traite la différence des poids des corps dans les diverses régions de la Terre. Dans cette proposition Newton nous présente un tableau sur lequel figurent les longueurs des

<sup>604</sup> Newton I. ([1756] 1759), Livre III, 39.

pendules à secondes dans des différentes latitudes (de 0 à 90 degrés Nord). Ce tableau apparait pour la première fois à la deuxième édition des *Principia* (1713) avec une seule

Latitude du lieu.	Longueur du Pendule.	Mesure d'un degré du Méridien.
Dégrés.	Pieds. Lignes.	Toises.
0	3 7, 468	56637
5	3 7, 482	56642
10	3 7, 526	56659
15	3 7, 596	56687
20	3 7, 692	56724
25	3 7, 812	56769
30	3 7, 948	56823
35	3 8, 099	56882
40	3 8, 261	56945
1	3 8, 294	56958
2	3 8, 327	56971
3	3 8, 361	56984
4	3 8, 394	56997
45	3 8, 428	57010
6	3 8, 461	57022
7	3 8, 494	57035
8	3 8, 528	57048
9	3 8, 561	57061
50	3 8, 594	57074
55	3 8, 756	57137
60	3 8, 907	57196
65	3 9, 044	57250
70	3 9, 162	57295
75	3 9, 258	57332
80	3 9, 329	57360
85	3 9, 372	57377
90	3 9, 387	57382

correction entre la 2<sup>e</sup> et la 3<sup>e</sup> édition (1726) la longueur du pendule à 25 degrés de latitude de 3 pieds 7,811 lignes (2<sup>e</sup> édition) à 3 pieds 7,812 (3<sup>e</sup> édition). Newton conclut que puisque la différence entre les longueurs des pendules est si petite, on peut continuer à considérer notre Terre comme une sphère parfaite ; « surtout si la matière est plus dense vers l'équateur que vers les pôles. »<sup>605</sup>

Concernant le calcul effectué, afin que la réalisation de ce tableau soit possible, Newton nous donne les informations suivantes : « l'augmentation du poids, en allant de l'équateur vers les pôles, doit être à peu près comme le sinus verse du double de la latitude, ou ce qui est la même chose, comme le carré du sinus droit de la latitude. Les arcs des degrés de latitude augmentent à peu près dans la même raison dans le méridien. »<sup>606</sup>

Afin de mettre un peu plus de lumière à cette affaire nous allons reprendre le calcul comme présenté et expliqué par Michel Toulmonde. Le sinus verse de la latitude d'angle arbitraire  $\varphi$  vaut  $1-\cos(\varphi)$ . Le sinus verse du double de la latitude est  $1-\cos(2\varphi)$  est égal à  $2(\sin\varphi)^2$  (« comme le carré du sinus droit de la latitude »). En ce qui concerne les arcs des degrés de latitude  $\sin(2\varphi) = 2(\sin(\varphi))^2$ . Newton dresse alors la Table des longueurs du pendule battant la seconde pour diverses valeurs de la latitude géographique (3 pieds + quelques lignes) ainsi que la longueur de 1<sup>o</sup> de méridien (en toises) selon ces latitudes. Ces longueurs dépendent de la latitude car, bien sûr pour Newton, la Terre n'est pas sphérique. Dans l'annexe p.530, Toulmonde nous propose la fonction :

$$L(\varphi) = A \times (1 + B\sin^2\varphi)$$

Il traduit les valeurs de la table par une simple relation numérique entre la longueur L cherchée et la latitude. Suivant ce qu'on cherche, on prend les valeurs numériques de A et de B indiquées. Exemple :  $\varphi = 49^\circ$ . Alors  $\sin(49^\circ) = 0,7547095\dots$  soit, élevé au carré :  $0,56958\dots$  La longueur du pendule à cette latitude sera donc  $L = 3 \text{ pieds} + 7,4685 \cdot (1 + 0,2568 \times 0,56958) = 3 \text{ pieds} + 8,5609 \text{ lignes}$ . Newton donne 3 pieds + 8,561 lignes. À

---

<sup>605</sup> Ibid., 41.

<sup>606</sup> Ibid., 40.

la fin de cette Proposition Newton fait une remarque concernant ce calcul. Il nous dit que le résultat des longueurs réelles risque d'être plus important que le résultat donné par le calcul. « Ainsi la terre doit être un peu plus élevée à l'équateur que ce calcul ne l'a donné, & sa matière doit être plus dense à son centre que près de la superficie, supposé cependant que la chaleur de la Zone torride n'ait pas un peu augmenté la longueur du pendule. ». L'auteur nous rappelle que son calcul est basé sur l'hypothèse de la Terre faite de matière homogène alors que ce n'est pas le cas.

Pour dresser ce tableau Newton il a pris en compte un nombre d'observations.

1. 1672, Richer à Cayenne ( $4^{\circ}55'$ )
2. 1677, Halley à St. Hélène ( $16^{\circ}00'$ )
3. 1682, Varin & Deshayes, Observatoire de Paris ( $48^{\circ}50'10''$ ), l'île de Gorée ( $14^{\circ}40'$ ), Guadeloupe ( $14^{\circ}00'$ ) et Martinique ( $14^{\circ}44'$ )
4. 1697, M. Couplet et fils, Lisbonne et Paraïbe ( $6^{\circ}38'$ )
5. 1699-1700 M. Deshayes, Cayenne ( $4^{\circ}55'$ ), Grenade ( $12^{\circ}6'$ ), St Christophe ( $17^{\circ}19'$ ) & S. Dominique ( $19^{\circ}48'$ ).
6. 1704 P. Feuillée, Portobello ( $9^{\circ}33'$ ), Martinique ( $14^{\circ}44'$ )

Le nombre de ses observations n'a pas cessé d'augmenter. Deux expéditions phares qui ont déterminé la vérité de la théorie newtonienne sont celles organisées par l'Observatoire de Paris. L'objectif était de mesurer la longueur du Pendule à secondes aux deux points clés pour la détermination de la forme terrestre. Au Pôle et à l'Équateur. Le chef de la première expédition était Pierre Louis Moreau de Maupertuis et celui de la deuxième était M. de La Condamine. Ces deux expéditions sont bien connues et leurs divers aspects sont déjà étudiés par l'historiographie par des études directes ou indirectes. Avant que les voyages des Astronomes français soient décidés une expédition anglaise voit la lumière du jour et est jugée comme la plus exacte de toutes jusqu'alors. C'est l'expédition présentée par James Bradley qui nous occupera ici. Une expédition peu étudiée et dont la traduction française contient une carte très originale.



### 3. James Bradley et la rivière noire de Jamaïque.

Soixante ans après la découverte inattendue de Jean Richer à Cayenne, alors qu'un nombre considérable d'observations ont été mises en place pour la vérification de cette découverte, un nouvel article apparaît sur le même sujet dans les *Philosophical Transactions*<sup>607</sup>. C'est un rapport d'un nombre d'observations faites au sujet de la longueur du Pendule à secondes à différentes latitudes terrestres, à Londres par l'horloger et F.R.S. George Graham et à la Rivière Noire de la Jamaïque par Colin Campbell, F.R.S qui a contribué à l'avancement de l'astronomie. Ces observations sont communiquées aux *Phil. Trans.* par l'astronome et F.R.S. James Bradley. Selon Bradley, les observations publiées qui précèdent celles-ci n'ont pas été capables de communiquer un résultat avec une précision suffisante « sufficient Exactness »<sup>608</sup>. Ce que cherche à établir cet article est une certitude sur la détermination de la Figure de la Terre et de ses parties constitutifs à travers les observations sur la longueur du pendule.

On trouve des éléments de constitution de cet article dans la correspondance entre Graham et Bradley. Par une lettre de Graham du 15 Juillet 1732<sup>609</sup> destinée à Bradley on apprend que l'expérience réalisée en Jamaïque par l'astronome John Harris a été couronnée de succès. John Harris a commencé les expériences à la Jamaïque mais du fait de sa mauvaise santé il a été obligé de rentrer à Londres avec les premiers résultats en main. D'après des observations effectuées de 22 Janvier au 20 Février 1732, avec grand soin et grande précision, le pendule, conservant la même longueur qu'à Londres, retardait de deux minutes et six secondes lors d'un jour sidéral<sup>610</sup>. Trois jours après

---

<sup>607</sup> Graham G., Campbell C. & Bradley J. (1733), « An Account of Some Observations Made in London, by Mr. George Graham, F.R.S. and at Black-River in Jamaica, by Colin Campbell, Esq; F. R. S. concerning the Going of a Clock; In Order to Determine the Difference between the Lengths of Isochronal Pendulums in Those Places. Communicated by J. Bradley, M. A. Astr. Prof. Savill. Oxon. F. R. S. », in *Philosophical Transactions*, vol. 38, no. 427-435, 302-314.

<sup>608</sup> Ibid. 302.

<sup>609</sup> Bradley J. (1832-1833), *Miscellaneous Works and correspondence of the rev. James Bradley,...*, Rigaud S. P. (éds), Oxford : University press, 395-§.

<sup>610</sup> Ibid. « When the pendulum was reduced to the same length it had here, saving what was owing to the differences of heat, it went slower there than at London two minutes and about six secondes in a sidereal day ; it was observed from the 22d of January to the 20th of February with great care and exactness. ». Le jour sidéral étant de 23h 56 min et

Bradley exprime sa joie du bon résultat et sa tristesse de l'état de santé de Harris dans sa réponse à Graham<sup>611</sup>. Dans cette lettre on apprend que la suite des expériences sera effectuée par Colin Campbell qui est lui aussi à la Jamaïque. Colin Campbell<sup>612</sup> était un astronome Anglais ami de Edmond Halley. Il a été élu F.R.S. le 10 Décembre 1730. Il a effectué des observations astronomiques avec Joseph Harris et il a continué le travail après le départ de ce dernier pour des raisons de santé. Bradley nous assure de l'ingéniosité de Campbell pour garantir l'exactitude des ses observations :

« (Campbell) dont les Connaissances et les Talents/Facultés à tout respect le qualifient pour l'Avancement de l'Amélioration des Arts et des Sciences; et dont le Génie lui le pousse à les cultiver assidûment, que je ne doute pas que nous allons bientôt avoir la Satisfaction de recevoir beaucoup d'autres Observations précieuses, particulièrement comme celles liées à l'Astronomie ; lui qui s'est fourni lui-même avec un Équipement d'Instruments digne de celui de l'Observatoire d'un Prince. »<sup>613</sup>

L'avantage de travailler avec Campbell, à part son génie et ses capacités intellectuelles, est le nombre important d'instruments d'excellente qualité qu'il a à sa disposition. Entre autre une horloge à pendule qui bâta la seconde fabriquée et étalonnée à Londres lors d'une journée sidérale, par un horloger hors pair, George Graham. Cette horloge, destinée à des observations astronomiques, sans beauté esthétique particulière, a permis à Campbell d'établir avec une exactitude maximale (*utmost exactness*), nous dit l'auteur, la différence de longueur des pendules isochrones à Londres et à la Jamaïque. Les parties de cette horloge étaient fabriquées de telle manière que si on les démontait elles pouvaient être imbriquées par la suite de sorte que la longueur du pendule soit

---

4s, soit 86164s, le retard relatif est de  $126/86164=1,46 \cdot 10^{-3}$  et donc le double pour la variation relative de g, soit  $2,92 \cdot 10^{-3}$ .

<sup>611</sup> Bradley J. (1832-1833), *Miscellaneous Works and correspondence of the rev. James Bradley, (...)*, Rigaud S. P. (éds), Oxford : University press, 395.

<sup>612</sup> Stearns R. S. (1970), *Science in the British Colonies of America*, Urbana, Chicago, London : University of Illinois Press, 373-375.

<sup>613</sup> Graham G., Campbell C. & Bradley J. (1733), 303. « (Campbell) whose Knowledge and Abilities in every respect qualifies him for the Improvement of Arts and Sciences; and whose Genius prompts him to cultivate them so assiduously, that I doubt not but we shall soon have the Satisfaction of receiving many other valuable Observations from him, particularly such as relate to Astronomy; he having furnished himself with an Apparatus of Instruments not unworthy the Observatory of a Prince. »

identique. Le traducteur de cet article en français M. De Brémond nous donne une description de cette Horloge qui dit être la même que celle utilisée par Louis Mareau de Maupertuis et son équipe durant leur expédition en Laponie. L'Horloge en question est loin d'être une Horloge à pendules simple ou habituel. À ce titre nous allons citer sa description à son intégralité :

« Le Pendule de l'Instrument de M.Graham est composé d'une Lentille pesante qui tient à une Verge plate de Cuivre. Cette Verge est terminée supérieurement par une pièce d'Acier qui lui est perpendiculaire, & dont les extrémités sont deux couteaux, qui, au lieu d'être reçus entre deux Plans inclinés, ou entre les Cilindres, portent sur deux Tablettes planes d'Acier toutes deux dans le même Plan Horizontal. On est assuré de la situation de ce Plan, lorsqu'une pointe qui fait l'extrémité de la Verge du Pendule, répond au point o d'un Limbe dans le Plan duquel elle doit se trouver, & ce Limbe sert à mesurer les Arcs décrits par le Pendule. Tout l'Instrument est renfermé dans une boîte très-solide. La lentille du Pendule de M. de *Maupertuis* a 6. pouces  $10\frac{3}{4}$  lignes de diamètre, & 2. pouces  $2\frac{3}{4}$  lignes d'épaisseur au centre. Pour transporter cet instrument sans le déranger, on élève avec une vis, par le moyen d'un chassis mobile, le Pendule, de manière que le tranchant des couteaux ne porte plus sur rien, & que la pièce d'Acier qui forme les couteaux, se trouve appuyé au défaut de leur tranchant. On attache au-dedans, de la boîte une pièce de bois creusée pour recevoir la Lentille, & cette pièce, après que la Lentille y été mise, est recouverte d'une autre, & pour lors la Verge & la Lentille ne peuvent avoir aucun mouvement. »<sup>614</sup>

---

<sup>614</sup> Bradley J. ([1733] 1740), « Observations faites à Londres...& à Black-River de Jamaïque », in *Transactions Philosophiques de la Société Royale de Londres*, traduites par De Brémond M., Paris : Chez Piget avec approbation et privilège du Roi, Note (a), 111-112.

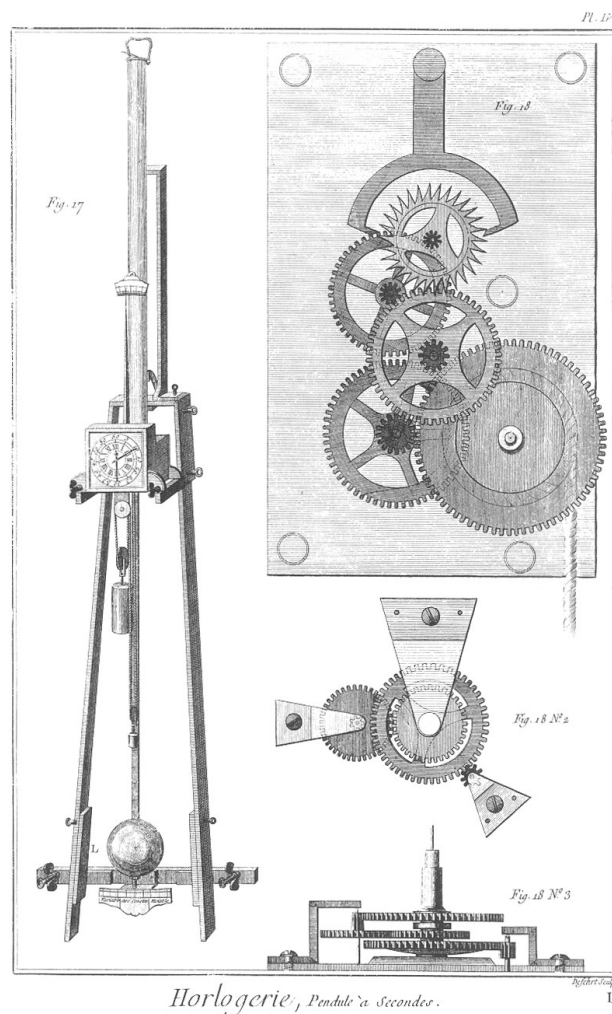


Fig. 7.5. « Représentation perspective d'une pendule à secondes, propre pour les observations astronomiques, du chassis qui lui sert de support, & du thermometre de compensation, qui corrige l'effet du chaud & du froid sur le pendule. »<sup>615</sup>

La figure ci-dessus, représente un Pendule à secondes qui se rapproche à la description de celui-ci citée plus haut. On voit bien la Limbe à la partie inferieur du pendule, la lentille, même les extrémités de la barre en acier sous forme de couteaux. Cette description peut nous faire penser au posage du Secteur de Galilée que nous avons étudié dans la cinquième Partie du Chapitre V de cette thèse. Peut-être que Galilée a imaginé quelque chose de ce genre pour la barre de fer qui traverse le centre de son pendule. Mais il ne faut pas oublier qu'ici il s'agit d'un pendule destiné aux observations

<sup>615</sup> Diderot D. & D'Alembert J. le R. (eds.) (1751-1772), *L'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers est une encyclopédie française*, Paris : Briasson, David, Le Breton & Durand, Volume 21 Page 19:9.

astronomiques sur terre et non pas sur mer. Ce posage présente une variété d'inconvénient pour un voyage sur mer.

Nous n'avons malheureusement pas de description du thermomètre que Graham a utilisé, nous savons que c'est un thermomètre à Mercure. Pour l'étalonnage de cette horloge à Londres, Graham a dû poser son Horloge dans une pièce loin des perturbations de la circulation des véhicules de l'époque et loin du soleil dans la mesure du possible. Pour la détermination du jour sidéral il a choisi la trajectoire de l'étoile *Lucida Aquila* et le moment de son passage par le méridien. Les observations ont eu lieu au mois d'Aout 1731 et Graham a dressée une table indiquant la date de l'observation et l'heure du passage de l'étoile en question :

Date	Heure, minutes, secondes
20	8h 59min. 15 secondes
22	8h 59min. 18 secondes
23	8h 59min. $20\frac{1}{2}$ secondes
25	8h 59min. 22 secondes
28	8h 59min. $25\frac{1}{2}$ secondes
29	8h 59min. 26 secondes
30	8h 59min. 27 secondes

Ces résultats montrent une accélération de l'Horloge de l'ordre de 12 secondes au cours de 10 révolutions apparentes de l'étoile. Après avoir déterminé des facteurs de perturbations à la marche de l'horloge, comme la température<sup>616</sup>, ou le changement de poids de l'Horloge<sup>617</sup>, les légers changements d'amplitude d'oscillation (à l'aide de la

---

<sup>616</sup> Pour le faire Graham a établi un thermomètre et il prenait note de la température à 10 et 11 heures du matin et du soir.

<sup>617</sup> Le poids du pendule et le poids de l'Horloge ont été déterminés (17 pounds, et 12lb.  $10\frac{1}{2}$ oz.), et ils étaient remontés une fois par mois. À l'usage d'un arc fait de cuivre, subdivisé en degrés, l'amplitude d'oscillation de la verticale était mesurée de 1° et 45'.

Le 31 Août de la même année Graham a changé le poids de l'Horloge, il a mit un autre moins lourd (6lb.  $30\frac{1}{2}$ oz) et il a mesuré une amplitude d'oscillation de la verticale

Limbe situé à l'extrémité inférieure du Pendule), la quantité d'huile sur les pivots, ou la propreté de l'Horloge il a conclu que la plupart de ces facteurs ne sont pas la cause d'un retardement ou d'une accélération considérable de l'horloge, à la seule exception du changement de température et de la gravité. Les résultats des observations effectuées par Graham ont été communiqués à Bradley en Septembre 1731, alors que l'Horloge se trouvait déjà dans un navire à destination de la Jamaïque. Graham a envoyé des notices destinées à Campbell concernant le montage de l'Horloge mais sans aucune information sur la marche de l'Horloge afin de ne pas influencer les observations sur place. Bradley prend le temps de nous garantir de l'ingéniosité de deux acteurs impliqués dans ces observations pour nous assurer de la fiabilité et de l'exactitude des résultats. Ce que cherche à établir cet article est une certitude sur la question de la Figure de la Terre et ses parties constitutives. Les résultats figurent à la suite de cet article dans une Table dressée par l'auteur. Cette table est de trois colonnes. La première indique la date et le jour, la seconde le nom de l'étoile et l'heure de son passage par le Meridien et la troisième l'heure la hauteur de l'Esprit du Thermomètre à l'heure où il était observé. La table montre un retard du pendule de 54' et 21'' dans 26 révolutions des étoiles ce qui correspond à un retard de  $2' 5'' \frac{1}{2}$  dans une révolution avec une variation selon la température. Graham avait déterminé la variation du Pendule à secondes à Londres entre été et hiver de 25 à 30 secondes de temps, ce qui lui permettait de comparer les deux résultats en prenant en compte les variations du pendule en température le plus basses et les plus hautes de la Jamaïque. John Campbell a déterminé le retard du pendule à Jamaïque, à 18 degrés de latitude, comparé à celui de Londres était « de plus de 1'58'' »<sup>618</sup>. Ces résultats ont un sens que comparés aux résultats newtoniens.

« Supposant donc avec M. le Chevalier *Newton*, que la différence que l'on observe dans le mouvement du Pendule, vient de ce que les parties de la Terre sont plus élevées vers l'Equateur que vers les Poles, & comparant ces Observations avec ce que M. Newton établit dans la XXe Proposition du IIIe Livre de ses *Principes*, on trouve que le diametre de l'Equateur est à l'axe de la Terre comme 190. à 189. La différence de l'un & de l'autre

---

1° et 15'. L'Horloge ainsi retardait de 1seconde et  $\frac{1}{2}$  dans 24 heures comparée à lui même avec le précédent poids.

<sup>618</sup> Bradley J. ([1733] 1740), 126.

étant 41. Milles & demi, ce qui est un peu plus que ce que M. *Newton* avoit conclu de sa Théorie, en supposant la densité de toutes les Parties de la Terre uniforme.

Je n'entrerai point ici dans la dispute sur le Figure de la Terre ; mais je supposerais pour le présent avec M. le Chevalier *Newton*, que l'augmentation de la Gravité à mesure qu'on s'éloigne de l'Equateur, est à peu près comme le Quarré du *Sinnus* de la Latitude de chaque lieu, & que la différence de longueur des Pendules es proportionnée à l'augmentation ou diminution de la Gravité.»<sup>619</sup>

L'auteur ainsi peut calculer la longueur du pendule pour les différentes latitudes des lieux. Le traducteur de l'article en français considère avec *Bradley* l'expérience effectuée par *Campbell* et *Graham* une des plus précises au même niveau que celle de *Maupertuis*. La publication de l'article en français à eu lieu en 1740 et contient un commentaire très riche au sujet de la forme de la Terre dont quelques parties étaient reprises ici. Ce que l'on peut retenir néanmoins de ce commentaire est que les expériences au sujet de la longueur du pendules à secondes fut multiples et variées et l'exactitude de la plupart de celles-ci très difficile à estimer. À ce sujet le traducteur a demandé à M. *Buache*, le premier Géographe du Roi, son ami et confrère à l'Académie Royale des Sciences de dresser une carte. Cette carte porte l'intitulé *Carte des Lieux où les différentes longueurs du Pendule à secondes ont été observées*. On voit en haut à droite que cette carte était destinée « pour la Note des Transactions Philosophiques A 1734. page 135. ». Le côté gauche de cette carte est dédié aux observations astronomiques. Il y figure une table de trois colonnes. À la première on trouve indiquées les années, à la deuxième les latitudes des lieux de 90 à 0 degrés, et à la troisième les nom des Astronomes qui ont effectués les Observations, les noms des lieux d'Observations et la longueur du pendule qui a été déterminé par les observations à chaque latitude. Au milieu de la partie basse de cette table on trouve trois tables « de l'Augmentation de la Pesanteur de l'Equateur vers les Poles », celle dressée par *Newton*, celle dressée par *Bradley* à la fin de l'article étudié ici, et celle dressée par *Maupertuis* dans son ouvrage *Mesure de la Terre*. Les deux expéditions ont utilisé le même pendule à secondes.

---

<sup>619</sup> 127-131.





TABLES DE L'AUGMENTATION DE LA PESANTEUR de l'Equateur vers les Poles

Suivant M.M. NEWTON						Suivant M.M. NEWTON						Suivant M.M. NEWTON					
Latitude	Longueur du Pendule en Toises de Paris	Valeur des Degres de la Latitude en Parties du 10. Angl.	Differ. de l'Acceleration du Pendule en Parties du 10. Angl.	Acceleration du Pendule en Parties du 10. Angl.	Allongement du Pendule en Parties du 10. Angl.	Latitude	Longueur du Pendule en Toises de Paris	Valeur des Degres de la Latitude en Parties du 10. Angl.	Differ. de l'Acceleration du Pendule en Parties du 10. Angl.	Acceleration du Pendule en Parties du 10. Angl.	Allongement du Pendule en Parties du 10. Angl.	Latitude	Longueur du Pendule en Toises de Paris	Valeur des Degres de la Latitude en Parties du 10. Angl.	Differ. de l'Acceleration du Pendule en Parties du 10. Angl.	Acceleration du Pendule en Parties du 10. Angl.	Allongement du Pendule en Parties du 10. Angl.
0	3.7.40.8	56.53.7				41	3.8.2.9.4	56.95.8				50	3.8.5.9.4	57.07.4			
5	3.7.48.2	56.64.2	0.0016	1.7	1.6	42	3.8.3.27	56.97.1				55	3.8.7.50	57.13.7	0.1386	103.2	143.1
10	3.7.52.6	56.65.9	0.0062	6.9	6.4	43	3.8.3.61	56.98.4				60	3.8.9.07	57.19.0	0.1549	171.2	169.9
15	3.7.59.6	56.68.7	0.0138	15.3	14.3	44	3.8.3.94	56.99.7				65	3.9.0.44	57.25.0	0.1696	187.5	175.1
20	3.7.69.2	56.72.4	0.0246	26.7	24.9	45	3.8.4.28	57.01.0	1033	114.1	106.6	70	3.9.10.2	57.29.5	0.1824	201.6	188.3
25	3.7.81.2	56.76.9	0.0369	40.8	38.1	46	3.8.4.61	57.02.2				75	3.9.20.8	57.33.2	0.1927	213.2	198.9
30	3.7.94.8	56.82.3	0.0516	57.1	53.3	47	3.8.4.94	57.03.5				80	3.9.32.9	57.36.0	0.2003	221.4	206.8
35	3.8.0.9	56.88.2	0.0679	75.1	70.2	48	3.8.5.28	57.04.8				85	3.9.37.2	57.37.7	0.2050	226.5	211.6
40	3.8.20.1	56.94.5	0.0853	94.3	88.1	49	3.8.5.61	57.06.1				90	3.9.38.7	57.38.2	0.2065	228.2	213.2

pres le Pont Neuf. Sous le Privilege de L'Academie R<sup>o</sup>. des Sciences le 6<sup>e</sup> fevrier 1740.

Fig. 7.7. Photographie de la reproduction originale.

Une critique intéressante des résultats donnés à l'article de Bradley est la lettre de James Stirling du 24 Novembre 1733 destinée à Bradley. Dans cette lettre Stirling exprime l'absurdité du résultat annoncé par les expériences à la Rivière Noire de Jamaïque et ses doutes sur l'exactitude avec laquelle les expériences se sont mises en place. L'augmentation de Stirling<sup>620</sup> se présente comme suit.

<sup>620</sup> Bradley J. (1832-1833), *Miscellaneous Works and correspondence of the rev. James Bradley, (...)*, Rigaud S. P. (éds), Oxford : University press, 398-400.

« [To the Rev. Mr. Bradley.]

Tower-street, London, Nov. 24, 1733.

I was very sorry that I did not see you when last in town, because I wanted very much to have conversed about the experiment made in Jamaica, which I hear you have considered, as indeed I have also done. If the pendulum went slower there than here by 2'6'' in a sidereal day, and only 9'' or 10'' are to be allowed for the lengthening of it by heat, as Mr. Graham tells me, thence it would follow that the earth's diameters are as 189 to 190, or thereabouts, in which case the force of gravity at the equinoctial would be to the centrifugal force as  $237\frac{1}{2}$  is to unity; which is impossible, unless the diameter of the earth were above 9000 miles, and that differs so much from the measures of Norwood, Picart, and Cassini, that it cannot be admitted, nor consequently the experiment from whence it is deduced: and besides, I can prove from undoubted observations in astronomy, that Cassini's measure is very near the truth, for the diameter of the earth can be found surer by them than by any actual mensuration. If 29'' could be allowed for the lengthening of the pendulum by heat, this experiment made at Jamaica would agree with other things, but Mr. Graham says that he cannot allow that by any means. I am very far from thinking that the experiment was not exactly made, and indeed a greater absurdity would follow from Richer's experiment made in the island of Cayenna, which is the only one that can be depended on, which is mentioned in sir Isaac's Principia.

I find that sir Isaac in his 3d edit. Princip. mentions three observations of Dr. Pound, which make Jupiter's diameter about 37''; I want to know if that be the greatest diameter of Jupiter; because if it be, then the lesser would be about 34'', which would make too great an odds in the thing for which I want it. And I should be glad to know if you can help me to any observation which ascertains the moon's middle distance from the earth, which I could depend more than the common ones; if you could inform me of these things, I should be able quickly to make an end of what I shall say about the figure

Un article qui fait le lien entre les observations à la Jamaïque et celles au Pôle par Maupertuis est celui de James Stirling<sup>621</sup> apparue dans les *Philosophical Transactions* en 1735. Comme annoncé dans sa lettre de 24 Novembre 1733 destinée à Bradley, Stirling se méfie des résultats expérimentaux sur le sujet de la figure de la Terre, et présente une manière autre que celle de Newton pour calculer l'aplatissement de la Terre. Cette méfiance ne manque pas de base. Dans un premier temps la Terre n'est pas faite de matière homogène et puis, comme l'auteur note bien à la fin de son article, l'hypothèse d'un sphéroïde parfait n'est peut pas être acceptée. La surface terrestre a tellement d'irrégularités (Montagnes, lacs etc...) que de la considérée absolument aplatie ne coïncide pas avec sa forme réelle. Les théories et les observations de la figure de la Terre ont obligé les savants de quitter une idée abstraite pour en adhérer à une autre. Ils ont passé d'une sphère parfaite à un sphéroïde aplatie. C'est pour cela que l'auteur de cette lettre peut se permettre de caractériser toutes ses efforts, pratiques comme théoriques, des « absurdités » !

« Je regrette beaucoup de ne pas vous avoir vu dernièrement en ville, car je voulais vraiment dialoguer concernant l'expérience effectuée à la Jamaïque, d'après ce que j'entends tu l'as étudié, comme d'ailleurs j'ai fait moi aussi. Si le pendule retardait là-bas par rapport à ici de 2'6'' lors d'un jour sidéral, seulement 9'' ou 10'' sont permis pour son allongement dû à la température, comme Mr. Graham me l'a dit, de ce fait il s'en suit que les diamètres de la terre sont comme 189 à 190, ou plus ou moins, dans ce cas la force de la gravité de la terre était à l'équinoxe serait à la force centrifuge comme le  $237\frac{1}{2}$  est à l'unité; chose qui est impossible, à moins que le diamètre soit supérieur de 9000 miles, et ceci diffère tellement des mesures de Norwood, Picard, et de Cassini, chose qui n'est peut pas être admise, ni par conséquent l'expérience par laquelle ceci a été déduit: et en outre, je peux prouver par des observations astronomiques incontestables, que la mesure de Cassini est très proche de la vérité, car le diamètre de la

---

of the earth, which I would the more willingly do, because not only Mairan, but also Hugens, Hermann, and Maupertuy, have all of them entirely mistaken the matter. I heartily wish you all happiness, and the sooner I hear, the lore you will oblige,

Sir, your most humble servant,

J.STIRLING. »

<sup>621</sup> Stirling J. (1735), « Of the Figure of the Earth, and the Variation of Gravity on the Surface. » in *Philosophical Transactions*, vol. 39, no. 436-444, 98-105.

terre peut être trouvé plus certain que par toute les mesures actuelles. Si 29'' pouvait être permis pour la longueur du pendule par la température, cette expérience effectuée en Jamaïque serait en accord avec les autres, mais Mr. Graham dit qu'il ne peut pas le permettre par aucun moyen. Je suis très loin de penser que cette expérience n'était pas réalisée avec précision, et en effet une absurdité plus importante résulterait de l'expérience de Richer effectuée dans l'île de Cayenne, qui est le seul sur lequel il peut dépendre, qui est mentionné dans les *Principia* de sir Isaac.

Je fais également une autre observation, que même si la Matière de la Terre était entièrement uniforme, toutefois l'Hypothèse d'être un vrai Sphéroïde ne s'approche pas assez de la Vérité en sorte de donner le nombre de vibrations qu'un Pendule effectuée dans vingt-quatre Heures. Et supposons que la vraie Figure serait connue, les Inégalités des Montagnes et des Vallées, de la Terre et de l'Eau, de la Chaleur et du Froid, n'auraient jamais permis la Théorie et les Expériences d'être en accord. Mais à la suite de l'accomplissement de l'entreprise des Gentils hommes Français, qui font actuellement des mesures d'un Degré, et qui font des Expériences avec des Pendules dans le Nord et dans le Sud, on peut espérer un nouvel Éclairage à ce sujet. »<sup>622</sup>

Stirling ne désespère pas. Il place ses espoirs aux expéditions françaises, celle de Maupertuis et celle de La Contamine. La question de la figure de la terre a pris une ampleur sans précédent durant la première moitié du XVIIIe siècle. Son estimation exacte jouait un rôle double. Elle pouvait être utilisé pour renforcer une théorie mais surtout pour résoudre des problèmes pratiques en améliorant la cartographie terrestre et maritime. Ou pas ? D'Alembert connaît mieux cette réponse que nous, laissons lui alors le dernier mot :

« Il ne nous reste plus qu'un mot à dire sur l'utilité de cette question de la *figure de la Terre*. On doit avouer de bonne-foi, qu'eu égard à l'état présent de la navigation, & à

---

<sup>622</sup> Ibid. 105 « I shall also observe, that although the Matter of the Earth were entirely uniform, yet the Hypothesis of its being a true Spheroid is not near enough the Truth to give the Number of vibrations which a Pendulum makes in twenty-four Hours. And suppose the true Figure were known, the Inequalities of Mountains and Vallies, Land and Water, Heat and Cold, would never allow Theory and Experiments to agree. But after the French Gentlemen who are now about measuring a Degree, and making Experiments with Pendulums in the North and South, shall have finished their Design, we may expect new Light in this Matter. »

l'imperfection des méthodes par lesquelles on peut mesurer en mer le chemin du vaisseau, & connoître en conséquence le point de la Terre où il se trouve, il nous est assez indifférent de savoir si la Terre est exactement sphérique ou non. Les erreurs des estimations nautiques sont beaucoup plus grandes, que celles qui peuvent résulter de la non-sphéricité de la Terre. Mais les méthodes de la navigation se perfectionneront peut-être un jour assez pour qu'il soit alors important au pilote de savoir sur quel sphéroïde il fait sa route. (...) On voit combien la solution complete de cette grande question, demande encore de discussion, d'observations, & de recherches. »<sup>623</sup>

---

<sup>623</sup> Diderot D. & D'Alembert J. le R. (eds.) (1751-1772), *L'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers est une encyclopédie française*, Paris : Briasson, David, Le Breton & Durand, Vol. 6, 748-781.

## VIII CONCLUSION.

Nous avons cherché, par l'étude d'une partie des œuvres et de la correspondance de trois savants du XVII<sup>e</sup> siècle, à comprendre où se situait l'émergence dans la recherche de la précision dans la mesure du temps (définie par la quête infinie d'une subdivision du temps en parties toujours plus petites par un instrument de mesure du temps). Nous nous sommes concentrés sur le travail de Newton et, guidé par ce dernier, sur ceux de Galilée et de Huygens. Nous avons donc tout d'abord recherché des indices de la précision dans la mesure du temps dans la théorie de la gravitation universelle de Newton.

L'historiographie présente comme une évidence la précision dans la mesure du temps, en tant qu'élément constitutif important de cette théorie, du fait de la mathématisation de la philosophie naturelle intervenue dans la première partie du XVII<sup>e</sup> siècle. Puisque la colonne vertébrale de la philosophie naturelle est désormais mathématique, l'importance de la précision dans la mesure du temps semble s'imposer. Comme si tous les savants majeurs de l'époque se disaient *soudainement* que la précision dans les mesures est un élément incontournable de validation de leurs théories. Or, si l'on regarde de plus près l'émergence de la précision dans la mesure du temps à cette époque, son utilisation dans la validation des théories ne se met en place que progressivement, sans lien de cause à effet avec la mathématisation de la philosophie naturelle, sans évidence forte. Ce sont plus des questions pratiques qui semblent avoir dicté cette utilisation.

Dans les constructions théoriques, nous avons montré qu'il s'agissait pour les savants d'une mise en rapport des deux forces (gravitationnelle et centrifuge), et qu'ils ont utilisé le pendule comme une représentation géométrique du mouvement. Nous avons vu dans les manuscrits de jeunesse de Newton que si le temps et sa mesure ont une importance dans la construction de sa théorie, c'est plutôt dans la détermination de la force centrifuge (devenue plus tard centripète). Cette détermination est réalisée par une mise en rapport géométrique entre le mouvement circulaire uniforme de la force centrifuge, et le mouvement vertical uniformément accéléré de la force gravitationnelle. Newton cherche à déterminer dans un temps donné (par exemple une seconde) la

longueur de l'arc décrit par un corps dans son mouvement circulaire uniforme, ainsi que la distance parcourue par un corps grave, dans sa chute libre en partant du repos. Il ne s'agit pas d'une mesure précise du temps, mais on y retrouve des éléments comme l'utilisation d'un pendule et la détermination du temps. Le pendule (et ses propriétés) est utilisé ici comme une image au service de la représentation géométrique du mouvement et le temps, comme une durée déterminée qui permet la mise en rapport des mouvements géométriquement représentés.

Dans l'application de la théorie gravitationnelle à la question de la forme de la Terre, comme dans la confirmation de cette dernière, le pendule à seconde (un instrument de mesure du temps) est utilisé non pas pour mesurer le temps, mais pour mesurer une longueur. Pour la mesure de cette longueur il est en effet nécessaire de pouvoir représenter avec fiabilité la seconde définie astronomiquement comme la 86400<sup>e</sup> partie des 24h par les oscillations du pendule. Mais cette détermination ne se fait pas en ayant comme objectif la mesure du temps lui-même. Elle ne répond pas à la question : quelle heure est-il ? Ou : Combien de temps est-il passé ? Mais à la question : quelle longueur du pendule observons-nous sous telle latitude terrestre ? Dans la confirmation de la théorie, si l'on généralise, on suit la même logique que dans l'application : on mesure des longueurs de pendule. La seule différence est qu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, la notion de précision, indépendamment de tout lien avec la mesure du temps, commence à jouer un rôle crucial comme élément de validation d'une théorie. Il s'agit de précision dans les mesures en général, et pas uniquement dans la mesure du temps. Cela se voit dans l'évolution du statut des expériences même : on passe progressivement et de manière empirique des observations soignées du début du XVII<sup>e</sup>, à des expériences qui ont presque la même définition qu'aujourd'hui, où l'on retrouve des protocoles bien établis, dans lesquels la recherche et l'analyse des effets perturbateurs devient un enjeu majeur.

L'idée que la précision dans la mesure du temps ait trouvé son importance avec l'arrivée de l'argumentation mathématique que l'on trouve dans l'article de Westfall étudié dans le premier Chapitre de cette thèse nous semble problématique. Avant le XVII<sup>e</sup> siècle la séparation entre connaissance (science) et technè (technique/technologie) est claire. On a vu qu'Aristote avait bien établi les domaines d'application des mathématiques. L'Astronomie par exemple appartient au domaine de la technè, alors que la cosmologie

est du côté de la science. Un autre exemple frappant de cette distinction est donné par Stilman Drake, quand il dit que « Geminus, un contemporain d'Hipparque, interdisait tout simplement aux Astronomes de considérer les causes des mouvements célestes, car ils n'étaient point compétents pour le faire et qu'ils n'en avaient pas besoin pour leur travail non plus. Toutes les explications causales étaient l'affaire des physiciens, qui étaient des Philosophes de la Nature. »<sup>624</sup> Tout un monde séparait le travail de mesures et d'observations, de celui de l'acquisition de la connaissance scientifique. La science en ce sens était la recherche des causes, non pas par le biais des mesures et des expériences (comme la *technè*), mais par le biais du raisonnement. On peut expliquer cette distinction qui aujourd'hui nous paraît hiérarchique (la pensée avant l'expérience), si l'on prend en compte l'objectif de ce qu'on appelle à cette période : la connaissance scientifique. Le centre d'intérêt principal de cette connaissance était l'homme et sa finalité (que ce soit l'âme qui retrouve la vérité oubliée du monde des Idées, ou l'entéléchie, ou la vérité divine), à travers ses relations avec soi, avec le monde et avec Dieu. La *technè* ne concernait que le monde dans ses aspects pratiques. Nous en avons des illustrations stupéfiantes dans les constructions architecturales basées sur des mesures très précises depuis l'Antiquité ou au Moyen Âge par exemple. Une certaine précision dans les mesures était donc bien présente dans la *technè* avant la géométrisation de la Nature.

On peut voir Galilée comme un savant de son époque, d'éducation classique, qui s'est posé une simple question : comment peut-on faire de la Philosophie Naturelle, parler des phénomènes naturels, quand nos raisonnements ne sont pas en accord avec l'observation (ou expérience réelle ou de pensée). Galilée invite les Philosophes à observer, à lever la tête de leurs livres, à regarder attentivement autour d'eux, comme Aristote l'aurait fait s'il avait été leur contemporain. Galilée ainsi, comme le dit Drake, « a commencé à mesurer tout ce qui pouvait être mesuré mais qui ne l'était pas encore, (...) »

---

<sup>624</sup> Drake St. (1999), « Measurement in Galileo's Science », in *Essays on Galileo and the History and Philosophy of Science*, Toronto, Buffalo, London : University of Toronto Press, Vol. 1, 91. Trad. pers.: « Geminus, a contemporary of Hipparchus, simply forbade astronomers to consider causes of celestial motions, which they neither were trained to do nor needed for their work. All causal explanations were left to physicists, who were natural philosophers. »

et à transformer en objet de mesure des choses qui n'étaient pas mesurables. »<sup>625</sup> Mais cela ne signifie pas pour autant qu'il les ait vraiment mesurées, ou qu'il ait cherché la précision dans leur mesure. Drake donne l'exemple de la tension d'une surface. Il nous dit que cette quantité a été mesurée pour la première fois quand elle a été nommée, au XVIII<sup>e</sup> siècle, mais la possibilité de sa mesure a été établie par Galilée<sup>626</sup>. Entre transformer une chose en quantité mesurable, la mesurer, et la mesurer avec précision, il y a un grand écart. Notre thèse, sur la mesure du temps et de sa précision confirme celle de Drake. Galilée a bien mesuré le temps mais son objectif principal n'était pas sa précision, comme nous l'avons définie dans cette thèse. Il n'était pas à la recherche constante de l'amélioration de la précision dans la mesure du temps. S'il est question chez Galilée de précision dans la mesure du temps liée au pendule à secondes (T=1sec), ce n'est pas pour mesurer le temps dans la description des phénomènes terrestres (chute libre). Il propose le pendule à secondes comme instrument précis de la mesure du temps dans le cas des observations astronomiques. La mesure précise du temps chez Galilée reste dans le domaine de l'Astronomie, la *technè*. Dans ce cas précis il conserve quelque chose de la tradition ancienne et médiévale. Même si la mesurabilité des phénomènes terrestres prend vie dans son œuvre, en considérant que les arguments géométriques sont les seuls fiables, il utilise les observations pour la mise en rapport des quantités et les démontre géométriquement. L'observation seule n'est pas un argument suffisant pour soutenir une thèse scientifique. La thèse selon laquelle l'importance de la précision dans la mesure du temps va de pair avec la géométrisation de la nature n'est pas totalement défendable.

Si l'on considère que Galilée croit vraiment à l'idée que le livre de la Nature est écrit en formes et en rapports géométriques et que Dieu est géomètre, on peut croire que Galilée n'a pas perdu de vue l'essentiel de la science en tant que connaissance, comme nous l'avons définie plus haut. Il cherche à établir le lien entre l'homme et la vérité divine. Si l'on suit le raisonnement *galiléen*, la seule manière de comprendre la création divine est par le biais de la géométrie, qui est le langage partagé entre Dieu et l'homme. Ce qui lui échappe pourtant, c'est qu'en faisant usage des mathématiques pour expliquer la création divine, il laisse de côté toutes les relations causales qui font que la relation

---

<sup>625</sup> Ibid. Trad. pers. : « began to measure what could be measured but had not been, (...) and to make measurable things that had not been measurable. »

<sup>626</sup> Ibid., 92.



entre l'homme et la vérité divine est possible. Dans ce cadre, l'objectif de la science se réduit à la compréhension géométrique de la physis et du cosmos. La science à partir du moment où elle entre dans le monde du mesurable cesse d'avoir un rapport direct avec l'homme, qui n'est plus vu qualitativement mais quantitativement. L'exclusion de l'homme (inconsciente peut-être) transforme progressivement l'idée même de la connaissance scientifique, devenue géométrique, et lui permet de s'entremêler avec celle de la *technè*.

Nous observons aussi cette transformation à l'œuvre dans les travaux de Huygens et de Newton. Chez Newton ce mélange entre connaissance scientifique et *technè* s'établit clairement dans la Préface de la première édition des *Principia* avec le terme *L'Art de la Mécanique* qui inclut en son sein aussi bien la géométrie que la *technè*. Dans ce terme néanmoins la perfection géométrique et l'imperfection de la *technè* sont bien soulignées. *L'Art de la Mécanique* est parfait dans son ensemble mais la mécanique pratique est victime de l'imperfection des manipulations humaines. Le seul argument fiable reste pour Newton l'argument géométrique. L'observation et les mesures sont utilisées comme éléments qui participent à l'édifice des Propositions géométriques. Dans ce cadre, Newton n'est pas non plus dans une quête de précision dans la mesure du temps. Il cherche plutôt une précision dite suffisante pour la construction de sa théorie.

Huygens constitue un exemple à part. On retrouve chez lui une attitude vis-à-vis de l'observation comme outil de la géométrisation des phénomènes terrestres. Huygens s'inspire tout aussi bien par l'observation pour résoudre des problèmes géométriques que par l'étude des objets géométriques pour résoudre des problèmes pratiques. Nous avons vu aussi que le mélange entre géométrie et observation est tellement fort que l'auteur lui-même ne sait plus s'il doit parler d'un résultat de mesure ou d'un résultat géométrique en ce qui concerne la mesure du temps. À ce sujet Huygens mériterait une étude à lui seul. Si la partie consacrée à son œuvre semble plus petite que celle des autres auteurs, ce n'est pas par manque de sources mais au contraire parce que les sources liées à notre sujet sont trop nombreuses et que l'on pourrait s'y perdre facilement. Nous avons essayé ici de faire un choix d'étude, aussi restreint soit-il, lié strictement au résultat utilisé par Newton et de toucher du doigt la méthodologie de Huygens. Contrairement à Galilée pour qui le sujet des longitudes n'était qu'un problème parmi tant d'autres à résoudre par le biais de l'astronomie, Huygens, lui, baignait dans

cette question depuis son enfance. Son pays, sa famille étaient impliqués activement dans cette problématique et il a vite compris l'importance de la mesure du temps à cette fin. La précision dans la mesure du temps prend par conséquent une grande ampleur dans la partie de son œuvre qui s'y attache. Il n'est plus sujet de la mesure du temps comme un élément secondaire des observations célestes seulement. La mesure du temps prend le rôle central dans la quête de la détermination des longitudes. Huygens améliore le côté technique des Horloges, avec l'application du pendule aux Horloges comme régulateur, et avec l'étude de la cycloïde pour assurer l'isochronisme du pendule. Et il fait tout ce qui est en son pouvoir pour assurer la marche continue des Horloges à bord d'un navire. Si l'on parle de précision ici, nous ne sommes de nouveau pas encore dans notre définition, nous sommes plus dans une définition de la précision au sens de « fidélité ». La précision dont il est question se réduit à la garantie de la marche continue d'une Horloge dans des cas de grandes perturbations et avec un isochronisme assuré. Nous ne sommes pas encore dans la quête de la précision de la subdivision de la seconde, les préoccupations de Huygens se concentrent sur le fonctionnement mécanique de l'Horloge. L'objectif de Huygens est d'assurer un battement stable sur un voyage maritime de plusieurs semaines. Autrement dit assurer la reproductibilité du mouvement pendulaire avec une grande exactitude.

Contrairement à Huygens, Newton semble incertain de l'usage du temps pour la détermination de longitudes. Il reste persuadé que les meilleures méthodes sont celles dictées par les observations astronomiques. « Newton a aussi mentionné la conception d'une montre pour garder le temps exact, mais il a dit qu'une telle montre n'était pas encore fabriquée, que deux montres de ce genre seraient nécessaires, et que toute montre devait être vérifiée par des observations astronomiques. (...) les horloges exactes pourraient garder la longitude une fois connue, mais pas la trouver à partir de rien. Seule l'astronomie le pouvait. »<sup>627</sup> Simon Schaffer, dans un article écrit pour la bibliothèque digitale de l'Université de Cambridge, retrace l'histoire du lien entre Newton et la détermination des longitudes. Il nous dit que Newton était persuadé que

---

<sup>627</sup> Schaffer S., Board of Longitudes, Longitudes essays, Isaac Newton (source : <https://cudl.lib.cam.ac.uk/view/ES-LON-00011/1>). Trad. pers. : « Newton also mentioned the design of a watch to keep exact time, but said such a watch had not yet been made, that two such watches would be needed, and that any watch would have to be checked against astronomical observations. (...) exact clocks could keep longitude once known, not find it from scratch. Only astronomy would. »

seules les observations astronomiques, surtout une bonne théorie du mouvement de la Lune, en combinaison avec une bonne horloge (au service des observations), pouvaient offrir une solution fiable au problème. Il nous dit même que Halley en 1697 a publié un texte qui démontrait le lien entre les *Principia* et la méthode lunaire dans la détermination des longitudes en mer<sup>628</sup>. Après la *Longitude Act* de 1714<sup>629</sup> Newton est devenu et étudiait des propositions pour la résolution de ce problème. La loi en question a été établie sous le règne de la Reine Anne d'Angleterre. On y trouve soulignée l'importance de la détermination des longitudes pour la navigation et la sécurité des navigateurs. Plusieurs solutions théoriques avaient été proposées jusqu'alors, mais sans succès pratique. Afin d'encourager les savants à trouver une solution efficace, un Prix avait été offert, atteignant la somme maximale de 20 000 livres anglaises. Les propositions seraient étudiées par les Commissaires de manière théorique, puis expérimentalement, afin de déterminer si elle était praticable et avec quel degré de précision. 10 000 livres étaient offertes à celui qui trouverait la méthode pour déterminer un degré de longitude du grand cercle ou soixante miles géographiques. 15 000 livres étaient offertes à celui capable de déterminer les deux tiers du degré ; et 20 000 livres pour un demi degré de longitude. Pour ce faire, il fallait déterminer la circonférence de la Terre au niveau de l'équateur et en déduire les distances représentées par les degrés mentionnés. Pour une méthode basée sur la mesure du temps, les distances en question nous dictent la précision demandée pour l'Horloge. Un degré de la circonférence terrestre correspond à quatre minutes de temps, un demi degré à deux minutes de temps et ainsi de suite<sup>630</sup>. Alors que les savants étaient capables de fabriquer des Horloges de précision de l'ordre de la seconde, la précision demandée ici apparaît relativement faible. La méthode serait jugée fiable, pour un prix de 10 000 livres, si le voyage d'un navire sur une distance de 80 miles géographiques de la côte Anglaise était assuré. Pour les 20 000 livres, il fallait assurer le voyage d'un navire jusqu'aux Indes Orientales. Cet *Act* exprime clairement le désir de précision au sens d'une amélioration constante (plus la précision est élevée, plus la récompense offerte est grande!), pour des applications techniques.

---

<sup>628</sup> Ibid.

<sup>629</sup> RGO 14/1, 11<sup>r</sup>– 12<sup>r</sup>, University of Cambridge Digital Library.

<sup>630</sup> Un degré de la circonférence terrestre au niveau de l'équateur est égale environ à 111,26km, un demi degré 55,6km environ.

8r

I received last week from your Board of Admiralty a reference of a Proposal of a piece of Watch work for finding the Longitude at sea. I can make no sense of it. The Longitude is not to be found before its lost & as its once lost it is not to be found again by watch work alone without Astronomy. It has been found ~~at~~ by Astronomy at land above 1500 years ago. By the improvement of Astronomy ~~at the sea~~ within the past sixty years, ~~it has been~~ much improved & Geography much rectified thereby. I represented to it It is ~~now~~ already exact enough to settle the longitude of all the harbours in the world without erring above a quarter of a degree in any of them. I told the Committee of the House of Commons that it was exact enough to find the Longitude at sea without erring above two or three degrees; & that it was exact enough to find the longitude at sea without erring above a degree, it would be usefull; if without erring above 40' it would be more usefull, if without erring above half a degree it would be as exact as could well be expected, & upon this report ~~was grounded~~ the rewards in these three cases set down in the Act of Parliament. But the

And therefore those rewards have respect to Astronomy. But the chairman of the Committee And as I have often represented that the Longitude at sea ~~is not to be found without Astronomy~~, so I ~~now~~ declare that the meddling with any other methods, tends to obstruct the House of Commons represented the bringing a seaman represented that they did not want the Longitude, & so far as I can observe the sea-men are generally of that opinion. He represented further that the motion of the Moon is too swift to be made use of in finding the Longitude whereas if it were swifter it would be fitter for the purpose. And the first step for putting the Act in execution should have been to consider how Astronomy might be ~~sufficiently~~ improved. And this is not to be done by ~~other~~ Proposals by ~~the~~ ~~performance~~ of another ~~kind~~ before it be applied to sea affairs.

I received last week your letter coming from the Board of Admiralty upon a Proposal for finding the Longitude at sea by watchwork, whereas it is not to be found at sea by any other method, that that by watch it ~~is~~ ~~not~~ ~~found~~ at land, & that method wants to be further improved at land before it be applied to the sea. Watchwork seems only to keep a reckoning of the line of a celestial body. When the Longitude is once lost, it cannot be found again by watchwork. And to talk of keeping a reckoning at sea so exactly as never to lose the Longitude is a design that I desire to be excused from meddling with.

Schaffer, dans l'article mentionné plus haut, nous renvoie à un manuscrit écrit par Newton et destiné aux autres Commissaires avant leur première rencontre officielle en 1737. Il s'agit du MS. Add 3972, 40<sup>r</sup>. Dans ce manuscrit, Newton se prononce avec une grande force de conviction contre l'usage des Horloges pour déterminer les Longitudes en mer. En revanche il s'exprime en faveur des méthodes astronomiques. Dans ce manuscrit, Newton invite les Commissaires de la *House of Commons* à ne considérer que les propositions qui contribuent à l'amélioration des méthodes astronomiques, pour les Prix proposés par la *Longitude Act*. Pour soutenir cette thèse, il prend comme exemple les longitudes déterminées par l'Astronomie sur terre (soit par la méthode des mouvements lunaires soit par celle des Satellites de Jupiter), et fait appel aux grands progrès de la géographie grâce aux méthodes astronomiques. Grâce à l'astronomie, les cartes géographiques ne sont-elles point grandement améliorées ? Il souligne par ailleurs le grand danger qui se cache derrière l'idée d'utiliser les horloges dans cette affaire. Si l'on ne se fie qu'aux Horloges à bord d'un navire pour déterminer la position longitudinale, c'est-à-dire, si l'on se fie à la mesure de la durée du voyage depuis la position initiale le risque est grand de se perdre, si jamais l'horloge cesse de fonctionner ou ne marque plus le temps avec une précision suffisante. Car avec les Horloges, si l'on perd la position longitudinale une fois, elle ne peut plus être retrouvée. Newton, tout comme Galilée, est loin des efforts entrepris par Huygens à ce sujet. Il propose d'utiliser la mesure du temps seulement pour améliorer les observations astronomiques au service de la navigation. Plus tard John Harrison portera tort à cette conviction newtonienne grâce à l'invention de son chronomètre marin. C'est effectivement la précision dans la mesure du temps, améliorée sans cesse, qui se trouvera derrière la solution tant désirée. Si dans la *Longitude Act* de 1714 la précision demandée était de l'ordre de deux minutes de temps, pour une distance de 55,6 km environ, aujourd'hui avec les horloges atomiques nous sommes capables d'avoir une précision de l'ordre de 3 mètres pour un GPS standard. Nous sommes ici au centre de notre définition de précision dans la mesure du temps. Une quête sans fin qui a débuté au XVIIe siècle et qui nous habite encore aujourd'hui. « La mesure du temps atteint aujourd'hui des précisions vertigineuses, (...) Or la recherche de la précision ultime est une course de longue haleine qui est loin d'être achevée. »<sup>631</sup>

---

<sup>631</sup> Dimarcq N. & Sagnes I. (2016), « La démesure du temps », in CNRSleJournal.fr.

Dans les pays européens, l'importance de la détermination des longitudes au XVII<sup>e</sup> et au XVIII<sup>e</sup> siècle prenait une place majeure dans les travaux scientifiques appliqués. Ceci n'est pas un hasard. En Angleterre par exemple, en 1707, le désastre naval de Sorlingues entraîna la mort de près de 2 000 hommes d'équipage, y compris celle de Sir Cloudesley Shovell, le commandant en chef. La raison de cette tragédie, l'une des plus meurtrières de l'histoire de la navigation, était l'incapacité des navigateurs à se positionner en mer, tout spécialement par gros temps. Assurer la sécurité des navigateurs devint une priorité évidente. Et au-delà de cette raison apparente, en situation de guerre comme l'étaient ces hommes au moment de la catastrophe, le coût humain est aussi un coût militaire.

Et si l'on creuse encore la question, c'est bien la relation entre navigation et commerce qui a créé l'urgence de trouver une solution au problème des longitudes. L'importance des sommes d'argent engagées et la compétition internationale renforçaient ce besoin impérieux pour les grandes nations. Dans l'encyclopédie *Britannica* publiée en 1823, au terme *Navigation* cette relation est mise particulièrement en valeur. « (...) on peut établir comme une maxime que le rapport entre le commerce et la navigation, ou si l'on peut se permettre de le dire, leur union est si intime que la chute de l'un entraîne inévitablement celle de l'autre ; et qu'ils s'épanouiront toujours de concert ou disparaîtront ensemble. »<sup>632</sup> La question des longitudes en mer est donc une question liée aux profits financiers des pays.

Dans tous ces exemples, il est nécessaire de souligner un aspect important de la précision dans la mesure du temps. Le temps n'est jamais mesuré pour lui-même. La mesure du temps indépendamment de sa précision est toujours au service d'autre chose. Dans la théorie, on *mesure* le temps, même s'il s'agit d'une mesure indirecte, pour l'établissement d'arguments géométriques. En pratique pour mesurer des longueurs d'instruments, pour la précision des mesures astronomiques, en navigation pour déterminer les longitudes, en géographie pour mesurer des distances etc. La mesure du

---

<sup>632</sup> (1823) *Encyclopedia Britannica ; Or a Dictionary of Arts, Sciences, and miscellaneous Literature ; Enlarged and Impoved*. Edinburgh : Archibald Constable & Company, London : Hurst, Robinson & Company, Vol. 14, 645. Trad. pers. : « it may be established as a maxim, that the relation between commerce and navigation, or if we may be allowed to say it, their union, is so intimate, that the fall of the one inevitably draws after it that of the other ; and that they will always either flourish or dwindle together. »

temps n'est jamais un objectif en soi. Elle devient nécessaire dans des cadres particuliers, théoriques ou pratiques, pour des objectifs qui la dépassent. Dans ce contexte, la demande ou le besoin de précision est variable. C'est ce qui fait que le temps en tant que notion au XVII<sup>e</sup> siècle est une notion évolutive qui prend l'importance et la place qui lui sont dictées. Ce qui permet aussi à Galilée et Huygens de ne pas définir la notion de temps dans leurs théories.

On voit aussi que l'importance de la question de la précision dans la mesure du temps est très variable selon les savants. On a souligné que dans la correspondance entre Galilée et Baliani, c'est ce dernier qui a tout de suite saisi l'importance de la mesure du temps par un pendule. Il a de suite perçu l'application à vaste échelle que l'on pouvait faire de la précision dans la mesure du temps. Chez Huygens, c'est la partie « application » qui a pris beaucoup plus de place dans son œuvre, par rapport aux autres. La question de la précision au sens de l'isochronisme pendulaire, du mouvement régulier des horloges, de leur marche perpétuelle, etc., y est fondamentale. Chez Riccioli, alors qu'il utilise encore l'argumentation qualitative, on note une grande minutie dans ses expérimentations et un souci du détail qui s'approche de notre définition de la précision, car il cherche toujours à affiner ses moyens d'observation. Il ne se contente pas d'un pendule à seconde pour la mesure de la chute libre. Newton, de son côté, pratique très peu d'expériences de mesure du temps à l'aide d'un pendule. On trouve bien un exemple dans ses manuscrits de jeunesse mais l'on ne peut qu'énoncer des hypothèses sur la réalisation de ces expériences. Dans le livre II des *Principia*, nous avons vu qu'il a utilisé le mouvement pendulaire pour mesurer la résistance des fluides mais qu'il a alors rencontré beaucoup d'inconvénients. Enfin pour la détermination de la résistance de l'air dans la chute libre, il n'a pas réalisé lui-même les expériences mais a laissé cette tâche à la personne en charge à la Royal Society, Francis Hauksbee. En revanche il a fait grand usage des mesures du temps dans la construction de ses démonstrations géométriques.

Il s'avère très ardu de poursuivre une histoire linéaire de la recherche de la précision dans la mesure du temps au-delà du XVII<sup>e</sup> siècle. En effet l'objectif de la science évolue. Au XVII<sup>e</sup> siècle, on retrouve des éléments de la définition de la science comme elle était conçue par la Philosophie Naturelle Qualitative. Mais on trouve aussi à travers l'union

entre connaissance scientifique (géométrique) et *technè*, une définition qui semble être plus proche de la nôtre. Si l'on tient absolument à faire cette histoire, il faut donc se pencher plus du côté de la technologie ou du côté des domaines d'application du savoir scientifique, que de celui de la construction théorique d'une argumentation géométrique pure.



## BIBLIOGRAPHIE

- Académie des inscriptions et belles-lettres (1695), *Le Journal des sçavans*, Paris : Cusson
- Adams J. C., Living G., Luard H. R., & Stokes G. G. (eds.) (1888), *A catalogue of the Portsmouth collection of books and papers written by or belonging to Sir Isaac Newton.*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Andrade E.N. da C. (1950), *Robert Hooke, Wilkins Lecture*, London : The Royal Society.
- Andrewes W.J.H. (1985), « Time for the Astronomer 1484-1884 », in *Vistas in Astronomy*, Vol. 28, 66-86, Great Britain : Pergamon Press.
- Andriessse C.D. ([1993] 1998), *Christian Huygens*, Paris : Albin Michel.
- Arago F. (1854), *Astronomie populaire*, Paris : Gide & Baudry J., Tome I.
- Ariotti P.E. (1968), « Galileo on the Isochrony of the Pendulum », in *Isis*, Vol. 59, No. 4, 414-426.
- Ariotti P.E. (1972), « Aspects of the Conception and Development of the Pendulum in the 17th Century », in *Archive for History of Exact Sciences*, Spinger, Vol. 8, No. 5, 329-410.
- Ariotti P.E. (1973), « Toward absolute time : The undermining and refutation of the Aristotelian conception of time in the sixteenth and seventeenth centuries », in *Annals of Science*, Vol. 30, No. 1, 31-50.
- Aristote (1861), *Physique*, traduction par Saint-Hilaire B., Paris : Librairie Philosophique de Ladgrange.
- Aristote (1996), *Physique*, traduction par Carteron H., Paris : Belles Lettres, I-IV.
- Bacon Fr. ([1620] 1857), *Novum Organum*, traduit par Lorquet A., Paris : L. Hachette.
- Bailly A., Séchan, L., & Chantraine, P. (1969). *Dictionnaire grec francais: redige avec le concours de E. Egger. Ed. rev. par L. Sechan et P. Chantraine. Avec, en appendice, de nouvelles notices de mythologie et religion par L. Sechan.* Paris : Hachette.
- Barrow I. (1670), *Lectiones geometricae, in quibus praesertim generalia curvarum linearum symptomata declarantur*, Londini : Tupis Gulielmi Godbid.
- Barrow I. (1700), *The Works of the Learned Isaac Barrow*, Tillotson J. (eds.), London : Aylmer B., Vol. 1.
- Barrow I. ([1684] 1734), *Mathematical Lectures*, traduction par Kirby J., London: Austen S.

- Barrow I. (1735), *Geometrical Lectures, Explaining the Generation, Nature and Properties of Curve lines*, traduction par Newton I., London : Printed for Stephen Austen, at the *Angel and Bible* in St. Paul's Church-Yard.
- Barrow I. (1759), *The theological work of Isaac Barrow*, Napier A. (eds.), Cambridge : Cambridge University Press, Vol. IX.
- Beaulieu A. (1982), « Christiaan Huygens et Mersenne l'inspirateur », in *Huygens et la France*, Paris : Vrin, 25-31.
- Bechler Z. (1992), « Newton's ontology of the force of inertia », in *The Investigation of difficult things*, Cambridge : Cambridge University Press, 287-304.
- Bedini S.A. (1991), *The pulse of time*, Leo S. Olschki.
- Belhoste B. (2016), *Histoire de la science moderne*, Paris : Armand Colin.
- Bell A.E. (1947), *Christian Huygens and the development of science in the 17th century*, London, E. Arnold ; Timperley, the St Ann's press.
- Berkeley G. (1710]1889), « Traité sur les Principes de la connaissance humaine », traduction par Renouvier Ch., in *La Critique Philosophique*, Paris : Au bureau de la Critique Philosophique.
- Berthoud F. (1802). *Histoire de la mesure du temps par les Horloges*, Paris: De l'imprimerie de la République, Vol I & II.
- BIPM (2008), Vocabulaire international de métrologie-Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM).
- Birch T. (1757), *The History of the Royal Society*, London: Millar A.,Vol. III & IV.
- Blamont J. (2001), « La mesure du temps et de l'espace au XVIIe siècle », in *Dix-septième siècle*, No. 213, 579-611.
- Blay M. & Barthélemy G. (1984), « Changements de reperes chez Newton : Le problème de deux corps dans les *Principia* », in *Archives internationales d'histoire des sciences*, 68-98.
- Blay M. (1992). *La naissance de la mécanique analytique*. Paris: PUF.
- Blay M. (1993), *Les Raisons de l'Infini*, Paris : Gallimard.
- Blay M. (1995), *Les « Principia » de Newton*, Paris : PUF.
- Blay M. & Halleux R. (1998), *La Science Classique*, Paris : Flammarion.
- Blay M. (1999). *La naissance de la science classique au XVII siècle*, Paris: Nathan collection 128.

- Blay M. (2010), *Penser avec l'infini : la fécondité d'une notion mathématique et philosophique, de Giordano Bruno aux Lumières*, Paris : Vuibert,
- Bos H.J.M, Rudwick M.J.S., Snelders H.A.M. & Visser R.P.W. (eds.) (1980), *Studies on Christiaan Huygens*, Lisse, Netherlands : Swets and Zeitlinger.
- Bousquet C. (2013), *Maupertuis Corsaire de la Pensée*, Paris : Seuil.
- Bradley J. ([1733] 1740), « Observations faites à Londres...& à Black-River de Jamaïque », in *Transactions Philosophiques de la Société Royale de Londres*, traduites par De Brémond M., Paris : Chez Piget
- Bradley J. (1832-1833), *Miscellaneous Works and correspondence of the rev. James Bradley, (...)*, Rigaud S. P. (éds), Oxford : University press
- Britannica E. (1823), *Encyclopedia Britannica Or a Dictionary of Arts, Sciences, and miscellaneous Literature ; Enlarged and Impoved*. Edinburgh : Archibald Constable & Company, London : Hurst, Robinson & Company.
- Britten F. (1904), *Old Clocks and Watches and Their Makers.*, London: Bradbury, Agnew, & Co. Ld. Printers.
- Brugmans Henri L. (1935), *Le Séjour de Christian Huygens à Paris et ses relations avec les milieux scientifiques français. Suivi de son Journal de voyage à Paris et à Londres*, Paris: André P. & Droz E.
- Brunet P. (1929), *Maupertuis*, Paris: Librairie Scientifique Albert Blanchard.
- Brunet J. (2000). *L'introduction des théories de Newton en France au 18ème siècle Tome 1 - avant 1738*, Paris : VIGDOR, Vol.I.
- Burko L.M. (2003), « Effect of the spherical Earth on a simple pendulum », in *European Journal of Physics*, 24, 125-130.
- Caffarelli R.V. (2009), *Galileo Galilei and Motion: A Reconstruction of 50 years of Experiments and Discoveries*, Berlin, Heidelberg, New York : Springer.
- Cajori F. (1924), « The Growth of Legend about Sir Isaac Newton », in *Popular Astronomy*, Vol. 32, 482-486.
- Camerota F. (2012), *Galilée et la mesure du temps*, Catalogue d'exposition du Museo Galileo, Florence.
- Cassini J.D. (1701), « De la meridienne de l'observatoire royal prolongée jusques aux Pyrenées », in *Histoire de l'Academie Royale des Sciences*, Paris : Chez Boudot J.
- Cassini, J. (1723). *Traité de la Grandeur et de la Figure de la Terre.*, Sciences A.R. (eds.), Amsterdam: Chez Pierre De Coup.

- Caveing M. (1982), *Zénon et le continu*, Paris : VRIN.
- Chambers E. (1680 (ca.)-1740), *Cyclopædia, or, An universal dictionary of arts and sciences*, London: Knapton J. & J.(...) Johnson A. & Osborn T.
- Chandrasekhar S. (1995), *Newton's Principia for the common reader*, Oxford : Clarendon Press.
- Chappell V. (eds.) (1992), *Seventeenth-century natural scientists*, New York ; London : Garland
- Chareix F. (2006), *La philosophie naturelle de Christiaan Huygens*, Paris : J. Vrin
- Clarke S. (1717), *A Collection of Papers, Which passed between the late Learned Mr. Leibnitz, and Dr. Clarke, In the Years 1715 and 1716*, London : Knapton J.
- Clarke S. (1738), *The Works of Samuel Clark D.D.*, London :Knapton J.& P., Vol. II.
- Clavelin M. (1996), *La philosophie naturelle de Galilée : Essai sur les origines et la formation de la mécanique classique*, Paris : Albin Michel.
- Clavelin M. (2016), *Galilée Cosmologie et science du mouvement*, Paris : CNRS.
- Cohen I.B. (1969), « Hypotheses in Newton's Philosophy. », in *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Cohen R.S. & Wartofsky M.W. (eds), Dordrecht : Springer, Vol 5.
- Cohen I.B. (1978), *Introduction to Isaac Newton's "Principia"*, Harvard : Harvard University Press.
- Complete Dictionary of Scientific Biography, ([1981] 2008), New York : Charles Scribner's Sons.
- Condamine de La (1747). « Nouveau Projet d'une mesure invariable. » in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec les Mémoires de Mathématique et de Physique tirés des Registres de cette Academie*, 489-514.
- Costabel P. (1978), « Isochronisme et accélération 1638-1687 », in *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, Vol. 28, 3-20.
- Costabel P. (1982), « Huygens et la mécanique de la chute des corps à la cause de la pesanteur », in *Huygens et la France*, Paris : Vrin, 139-152.
- Costabel P. (1988), « Science positive et forme de la terre au début du XVIIIe siècle », in *La figure de la Terre du XVIIIe siècle à l'ère spatiale*, Paris : Gauthier-Villars, 97-114.
- Crépel P. & Schmit C. (2017), *Autour de Descartes et Newton*, Paris : Hermann.

- Débarbat S. (2013), « The French Savants, and the Earth-Sun Distance », in *The Journal of Astronomical Data* 19, 1, 109-119.
- De Gandt F. (1995), « La réception de Newton : philosophes et géomètres. », in *Revue du Nord*, Vol. 77, No. 312, 845-857.
- Defossez L. (1946), *Les Savants du XVIIe siècle et la mesure du temps*, Lausanne : Journal Suisse D'Horlogerie Et De Bijouterie.
- De Libera A. (2014), *La philosophie médiévale*, Paris : PUF
- De Moivre A. (1727), *Memorandums relating to Sir Isaac Newton*, Ms. 1075.7, Joseph Halle Schaffner Collection, Chicago, Illinois, USA: University of Chicago Library.
- Dictionary, O. E. ([2003] 2017). *Oxford English Dictionary. The definitive record of the English language*, Oxford University Press.
- Dictionnaire, D. T. (1738-1742), *Dictionnaire universel françois et latin*, Nancy: edition lorraine.
- Gjertsen D. (1986), *The Newton Handbook*, London & New York : Routledge & Kegan P.
- Diderot D. & D'Alembert J. le R. (eds.) (1751-1772), *L'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers est une encyclopédie française*, Paris : Briasson, David, Le Breton & Durand.
- Dimarcq N. & Sagnes I. (2016), « La démesure du temps », in CNRSleJournal.fr.
- Dobson R.D. (1985), « Galileo Galilei and Christiaan Huygens », in *Antiquarian Horology* Vol. 15, 261-270.
- Dorido C. (2006), *Madame du Châtelet*, Paris : Bibliothèque Nationale de France.
- Drake S. ([1995] 2003), *Galileo at Work, His Scientific Biography*, Mineola, New York : Dover Publications.
- Drake S. (1999), *Essays on Galileo and the History and Philosophy of Science*, Toronto, Buffalo, London : University of Toronto Press, Vol. I.
- Du Chatelet E. (1740), *Institutions de Physique*, Paris : Chez Prault fils, Chapitre VI.
- Ducheyne S. (2008), « Galileo and Huygens on free fall : Mathematical and methodological differences. », in *Dynamis*, Vol. 28, 243-274.
- Dugas R. (1950), *Histoire de la mécanique*. Neuchâtel: Jacques Gabay.
- Duhem P. (2016), *La théorie physique. Son objet, sa structure*, Lyon : ENS.
- Eisenschmit J.C. (1691), *Diatribes de figura telluris elliptico-sphaeroide*, Argentorati : Spoor J. F.

- Eliçararay de R.B. (1688), *De la théorie de la manœuvre des vaisseaux*, Paris : chez Michallet E.
- Exposition (1987), *La publication des Principia de Newton ses conséquences en France* Paris: Observatoire de Paris, Vol. Newton 87.
- Febvre L. (1946), *Le Problème de l'incroyance au XVIe siècle*, Paris : Éd. Albin Michel.
- Feingold M. (1993), « Newton, Leibniz, and Barrow Too: An Attempt at a Reinterpretation », in *Isis*, Vol. 84, No. 2, 310-338.
- Fontenelle M. d. (1733). *Histoire de l'Académie Royale des Sciences, depuis son établissement en 1666 jusqu'à 1686*. Paris: Imprimerie Royale.
- Frank Ad. (1875), *Dictionnaire des sciences philosophiques*, Paris : Hachette.
- Furetière A. (1690), *Dictionnaire Universel contenant generalement tous les mots françois, tant vieux que modernes, & les termes de toutes les sciences et des arts*, La Haye : Leers A. et R.
- Galilei G. ([1995] 2008), *Discours et demonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, introduction & traduction Clavelin M., Paris : Puf.
- Galilei G. (1661), *Dialogues on two world systems*, traduction par Salusbury Th., London: Leybourne W.
- Galilei G. (1890-1968), *Le Opere di Galileo Galilei*, Favaro A. (eds.), Firenze : edizione nazionale sotto gli auspicii di sua maestà il re d'Italia., Vol 1-18.
- Galilei G. (1980), *L'Essayeur de Galilée*, traduction par Chauviré C., Paris : Les Belles Lettres.
- Galilei G. (1992), *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, traduction par Fréreux R., Paris : Seuil.
- Gapaillard J. (1993), *Et pourtant elle tourne ! Le mouvement de la Terre*, Paris : Seuil.
- Gjertsen D. (1986), *The Newton Handbook*, London & New York : Routledge & Kegan Paul.
- Glare P.G.W. (eds.) ([1982] 1984), *Oxford Latin Dictionary*, New York : Oxford University Press.
- Graham G., Campbell C. & Bradley J. (1733), « An Account of Some Observations Made in London, by Mr. George Graham, F.R.S. and at Black-River in Jamaica, by Colin Campbell, Esq; F. R. S. concerning the Going of a Clock; In Order to Determine the Difference between the Lengths of Isochronal Pendulums in Those Places.

- Communicated by J. Bradley, M. A. Astr. Prof. Savill. Oxon. F. R. S. », in *Philosophical Transactions*, vol. 38, no. 427-435
- Graney C. M. (2015), *Setting aside all authority: Giovanni Battista Riccioli and the science against Copernicus in the age of Galileo*. Notre Dame Indiana : University of Notre Dame Press.
- Greenberg J. (1987), « Isaac Newton et la théorie de la figure de la Terre », in *Revue d'histoire des sciences*, Tome 40, No 3-4, 357-366.
- Guicciardini N. (1999), *Reading the Principia*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Guicciardini N. (2009), *Isaac Newton on mathematical certainty and method*, Cambridge, Massachusetts, London England : The MIT Press.
- Guicciardini N. (à paraître), « Newtonian absolute time vs fluxional time », Nicolaidis E. & Morfouli M. (eds), in *Accuracy of the measures and mobility of astronomers*, Paris: CNRS
- Guyot E. (1995), *Histoire de la détermination des longitudes*, La Chaux – de – Fonds : Chambre Suisse de l'Horlogerie.
- Bos H.J.M, Rudwick M.J.S., Snelders H.A.M. & Visser R.P.W. (eds.) (1980), *Studies on Christiaan Huygens*, Lisse, Netherlands : Swets and Zeitlinger
- Hadot P. (1968), « Philosophie, Exégèse et Contre-sens », in *Akten des XIV. Internationalen Kongresses für Philosophie*, Vienne : Herder & Co, Vol I.
- Hadot P. (1983), « Physique et poésie dans le Timée de Platon », in *Revue de théologie et de Philosophie*, Vol. 115, 133-133.
- Hadot P. (2004), *La voile d'Isis*, Paris : Gallimard.
- Hall A.R. (1957), « Newton on the calculation of central forces », in *Annal of Science*, Vol. 13, No. 1, 62-71.
- Hall A.R. (1976), « Huygens and Newton », in *The Anglo-Dutch Contribution to the Civilization of Early Modern Society: A Symposium*, Wilson Ch. et al. (eds.), London : Oxford University Press, 167-181.
- Hall A.R. (1992), « Newton and the absolutes », in Harman P.M. & Shapiro A.E. (eds.), *The Investigation of Difficult Things: Essays on Newton and the History of the Exact Sciences in Honour of Whiteside D.T.*, Cambridge : Cambridge University Press, 261-285.

- Hall A.R. (2003), *Isaac Newton Adventurer in thought*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Hall C. (2013), *Galileo's Reading*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Harrison P. (2015), *The territories of Science and Religion*, Chicago and London : The University of Chicago Press.
- Harris J. (1704), *Lexicon technicum or an universal English dictionary of arts and sciences: explaining not only the terms of art but the arts themselves*, London : Brown D., Goodwin T. (...) & Coggan F.
- Heiddeger M. ([1962] 1971), *Que-ce qu'une chose ?* Paris : Gallimard Collection TEL.
- Helden van A. (1985), *Measuring the Universe*, Chicago, London : The University of Chicago Press.
- Hellman C.D. (1931), « George Graham, Maker of Horological and Astronomical Instruments », in *Vassar Journal of Undergraduate Studies*, Vol. V, 221-251.
- Henry J. (2010), « Religion and the Scientific Revolution », in *The Cambridge Companion to Science and Religion*, Harrison P. (eds.), Cambridge : Cambridge University Press, 39-58.
- Herrivel J. (1965), *The Backround to Newton's Principia*, Oxford : At the Clarendon Press.
- Hooke R. (1665), *Micrographia : or some Physiological Descriptions of Minute Bodies made by magnifying glasses*, London : Martyn J. & Allestry J.
- Hooke R. (1674), *An attempt to prove the motion of the Earth from observations*, London : Martyn J., Printer to the Royal Society.
- Hooke R. (1935), *The diary of Robert Hooke, 1672-1680*, Henry W., Robinson H.W. & Adams W. (eds), London : Taylor & Francis.
- Hutton S. (2012), « Between Neton and Leibniz : Emilie du Châtelet and Samuel Clarke », in *Archives internationales d'histoire des Idées*, 77-95.
- Huygens C. (1690), *Traité de la lumière, où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la réflexion et dans la réfraction et particulièrement dans l'étrange réfraction du cristal d'Islande, avec un Discours de la cause de la pesanteur*, Leyde: P. Van der Aa
- Huygens C. (1888-1950), *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens*, La Haye : Nijhoff M., Vol. I-XXII.



- Huygens C. (1979), *Le Temps en question*, Catalogue d'exposition de l'Institut Néerlandais, Paris.
- Huygens C. (1981), *Horologium oscillatorium*, traduction & notes par Peyroux J., Bordeaux : Bergeret.
- Huygens C. (1986), *The Pendulum Clock or Gaometrical Demonstration Concerning the Motion of Pendula as Applied to Clocks*, traduction Blackwell R.J., Iowa: The Iowa University State Press.
- Iltis C. (1977), « Madame du Châtelet's metaphysics and mechanics », in *Studies in History and Philosophy of Science*, Great Britain : University of St Fancisco, Vol. 8, No.1, 29-48.
- Janiak A. (2008). *Newton as philosopher*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Jardine L. (2015), *Temptation in the Archives, Essays in Golden Age Dutch Culture*, London : UCL Press.
- Jorland G. (2002), « La notion de révolution scientifique aujourd'hui. », in *Revue européenne des sciences sociales. European Journal of Social Sciences*, (XL-124), 131-146.
- Jullien V. (eds.) (2002), *Le calcul des longitudes. Un enjeu pour les mathématiques, l'astronomie, la mesure du temps et la navigation*, Rennes : Presses Universitaires Rennes.
- Kölvig U. & Courcelle O. (2008), *Emilie du Chatelet éclairages et documents nouveaux*, Centre international d'étude du XVIII<sup>e</sup>.
- Koyré A. ([1948] 1971), « Du monde de l' « à-peu-près » à l'univers de la précision. », in *Études d'histoire de la pensée philosophique*, Paris : Gallimard, Collection Tel.
- Koyré A. (1952), « An Unpublished Letter of Robert Hooke to Isaac Newton », in *Isis*, Vol. 43, No. 4, 312-337.
- Koyré A. (1953), « An experiment in measurement », in *Proceedings of American Philosophical Society*, Vol. XCVII, No. 2, 222-237.
- Koyré A. (1960), « Newton, Galilée et Platon ». In: *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*. 15<sup>e</sup> année, N. 6, 1041-1059.
- Koyré A. (1966), *Études galiléennes*, Paris : Editions Hermann.
- Koyré A. ([1966] 1973), *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris : Gallimard.
- Koyré A. (1968), *Études Newtoniennes*, Paris : Gallimard.

- Koyré A. (1973), *Chute des corps et mouvement de la Terre de Kepler à Newton*, Paris : Vrin.
- Levallois J.-J. (1988), « L'Académie Royale des Sciences et la figure de la Terre », in *La figure de la Terre du XVIIIe siècle à l'ère spatiale*, Paris : Gauthier-Villars, 41-75.
- Lindberg C.D. (1965), Galileo's Experiments on Falling Bodies, in *Isis*, Vol. 56, No. 3, 352-354.
- Locke J. (1735), *Essai philosophique concernant l'entendement humain*, traduit par Coste M., Amsterdam : Chez Pierre Mortier.
- Locher J.G. (1614), *Disquisitiones mathematicae, de controversiis et novitatibus astronomicis*, ingolstadii : Officina Typographica Ederiana.
- Locke J. (1690), *An Essay Concerning Humane Understanding*. London: Thomas Bassett.
- Lohne J. (1960), « Hooke versus Newton : An analysis of the Documents in the Case of free fall and Planetary Motion », in *Centaurus*, Vol. 7, No. 1, 6-52.
- Lucrèce (1899), *La nature des choses*, traduction par Lefèvre A., Paris: Société d'éditions littéraires, Livre I.
- Lucrèce (1993), *De la nature*, traduction par Ernout A., Paris : Belles Lettres, Livre I.
- Lucretius T. Carus (1714), *Of the Nature of things*, traduction par Creech T, London : Matthews J. Livre I.
- MacDougal D.W. (2012), *Newton's Gravity : An Introductory Guide to the Mechanics of the Universe*, New York : Spinger.
- Macey L.S. (1994), *Encyclopedia of Time*, New York & London : Garland Publishing.
- Maclaurin C. (1748), *An Account of Sir Isaac Newton's Philosophical Discoveries*, London : Murdoch P.
- Maclairin C. (1749), *Exposition des découvertes philosophiques de M. le Chevalier Newton*, Paris : Durand.
- Mahoney M.S. (1980), « Christian Huygens : The measurement of Time and of Longitude at Sea », in *Studies on Christian Huygens*, Bos H.J.M. (eds.), Lisse : Swets.
- Mairan de D. (1753), « Expériences sur la Longueur du Pendule à Secondes à Paris: Avec des Remarques sur cette matière, & sur quelques autres qui s'y rapportent » in *Histoire de l'Académie royale des sciences ... avec les mémoires de mathématique & de physique... tirez des registres de cette Académie*, Paris : Imprimerie Royale, 153-220

- Malet A. (1997), « Isaac Barrow on the Mathematization of Nature : Theological Voluntarism and the Rise of Geometrical Optics », in *Journal of the History of Ideas*, Vol. 58, No 2, 265-287.
- Marguet F. (1931), *Histoire générale de la Navigation du XVe au XXe siècle*. Paris : Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales.
- Martins R.D. (1993), « Huygen's reaction to Newton's gravitational theory. », in *Renaissance and revolution : Humanists, scholars, craftsmen and natural philosophers in early modern Europe*, Field J.V. & Frank A.J.L. (eds.), Cambridge : Cambridge University Press, 203-213.
- Mathews M.R. (2005), « Idealisation and Galileo's Pendulum Discoveries : Historical, Philosophical and Pedagogical Considerations », in *The Pendulum*, Mathews M.R., Gauld C.F. & Stinner A. (eds.), Netherlands : Springer.
- Matthews M.R. (2000), *Time for Science Education*, New York : Springer
- Maupertuis P. L. (1732). *Discours sur les différentes figures des astres avec une exposition des systèmes de MM. Descartes et Newton*. Paris: De l'Impimerie Royale.
- Maupertuis P.L. (1738), « Observations faites au cercle polaire, Livre troisième, Mesure de la Pesanteur au Cercle Polaire », in *La Figure de la Terre déterminée par les Observations*, Paris: De l'Imprimerie Royale. 153-181.
- McGuire J.E. (1978), « Existence, Actuality and Necessity : Newton on Space and Time », in *Annals of Science*, Vol. 35, 463-508.
- McGuire J.E. (1978), « Newton on place, time and God : an unpublished source », in *The British Journal for the History of Sciences*, Vol. XI, Part 2.
- Merleau-Ponty J. (1974), *Leçons sur la genèse des théories physiques Galilée, Ampère, Einstein.*, Paris : Vrin.
- Mersenne M. (1634), *Traité des Mouvements, et de la chute des corps pesans, & et de la proportion de leurs différentes vitesses. Dans laquelle l'on verra plusieurs expériences très exactes*, Paris : Chez Jacques Villery.
- Mersenne M. (1636-37), *Harmonie Universelle, contenant la théorie et la pratique de la musique*, Paris : S. Cramoisy.
- Mersenne M. (1959-1635), *Correspondance*, De Waard C. (eds), Paris : CNRS, Tome I-V.
- Moesgaard K. P. (1988), « Refraction in TYCHO Brahe's Small Universe » in *Mapping the Sky : past heritage and future directions : proceedings of the 133rd Symposium of*

- the International Astronomical Union, held in Paris, France, June 1-5, 1987 / Débarbat S. (eds.), Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 87-92.
- Montucla J.-É. (2007). *Histoire des mathématiques*, Agasse P. (eds.), France : Jacques Gabay. Vol. II & III.
- Moray R. (1665), « A Narrative Concerning the Success of Pendulum-Watches at Sea for the Longitudes » in *Philosophical Transactions 1665-1666*, No. 1, 13-15.
- Moriarty P.V. (2006), « The principle of sufficient reason in Du Châtelet's *Institutions* », Zinsser J.P. & Candler Hayes J. (eds.), in *Émilie Du Châtelet: rewriting Enlightenment philosophy and science*, Oxford : Voltaire Foundation, 203-225.
- Mormino G. (2003), « Le rôle de Dieu dans l'œuvre scientifique et philosophique de Christian Huygens. » in *Revue d'histoire des sciences*, Vol. 56, No. 1, 113-133.
- Moscovici S. (1967), *L'expérience du mouvement*, Paris : Hermann.
- Nauenberg M. (2005), « Robert Hooke's Seminal Contribution to Orbital Dynamics », in *Physics in Perspective*, Basel : Birkhäuser Verlag.
- Nauenberg M. (2005), « Robert Hooke's Seminal Contribution to Orbital Dynamics », in *Physics in Perspective*, Vol 7, No. 1, 4-34.
- Newton I. (1687), *Philosophiæ naturalis Principia Mathematica*, Londini : Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater.
- Newton I. (1723), *Philosophiæ naturalis Principia Mathematica*, Cambridge.
- Newton I. (1726), *Philosophiæ naturalis Principia Mathematica*, Londini : Apud Guil.& Joh. Innys, Regiæ Societatis typographos.
- Newton I. (1728), *A treatise of the system of the world*, traduction Motte A., London : Fayram F.
- Newton I. ([1726] 1759), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, par feuë Madame la Marquise Du Chastellet, Paris : Chez Desaint & Saillant..., Lambert.
- Newton I. (1960), *The correspondence of Isaac Newton (1676-1687)*, Turnbull H.W., Cambridge : Cambridge University Press, Vol. II & III.
- Newton I., & Whiteside, D. T. (1964-67). *Mathematical works*. New York, Etats-Unis: Johnson Reprint Corp.
- Newton I. (1967-1981), *The Mathematical Papers*, Whiteside, D. T. (eds), London : Cambridge University Press.
- Newton I. (1972), *Philosophiæ naturalis Principia Mathematica*, Koyre A. & Cohen I.B. (eds.), Cambridge: Cambridge University Press.

- Nezton I. & Whiteside D.T. (1989), *The Preliminary Manuscripts for Isaac Newton's 1687 Principia 1684-1685*, Cambridge : Cambridge University Press.
- Newton I. (1995), *De la Gravitation, suivi de Du Mouvement des corps*, Paris : Gallimard.
- Newton I. (1999), *The Principia, Mathematical Principles of Natural Philosophy*, traduction par Cohen I.B. & Whitman A., Berkley, Los Angeles, London : University of California Press.
- Newton I. (2005), *Principia, Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, traduction par feu de la Marquise du Châtelet, Paris : Dunod.
- Newton I., & Densmore, D. ([2003] 2010). *Newton's Principia: the central argument*. Santa Fen New Mexico: Green Lion Press.
- Newton I. ([1787], 2015), *Optique*, traduction Marat J.-P., Blay M. (eds.), Paris : Dunod.
- Newton I. & Du Châtelet E. (2015), *Principes mathématiques de la philosophie naturelle. La traduction française des Philosophiae naturalis principia mathematica*, Toulmonde M. (eds.), Ferney-Voltaire : centre international d'étude du xviiiè siècle.
- Ogilvie M., & Harvey J. (eds.) (2000). *The biographical dictionary of women in science: pioneering lives from ancient times to the mid-20th century*. New York & London : Routledge, 378-380.
- Ovide (1806-1888), « Tristes », traduction par Nisard de M., in *Oeuvres Complètes* Paris : Dubochet J.-J. & Compagnie, Livre III, élégie IV.
- Olmsted J.W. (1960), « The voyage of Jean Richer to Acadia in 1670 : A study in the relations of science and navigation under Colbert », in *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol. 104, No 6, 612-634.
- Olmsted W. (1942), « The scientific expedition of Jean Richer to Cayenne (1672-1673) », in *ISIS*, Vol. XXXIV, Part 2, No. 94, 117-128.
- Outhier M. (1744). *Journal d'un voyage au Nord en 1736 & 1737*. Paris: Chez Piget & Durand.
- Paty M. (2001), « Réflexions sur le concept de temps », in *Revista de filosofía*, Vol. 25, 53-92.
- Pemberton H. (1728), « Preface », in *A View of Sir Isaac Newton's Philosophy* (<http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/OTHE00035>)
- Picard J. (1671), *Mesure de la Terre*, Paris : Imprimerie Royale.

- Picard J. (1729), « Voyage D'Uranibourg », in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris : Imprimerie Royale, Tome VII, Partie I
- Picard É. (1929) *Cérémonie du troisième centenaire de la naissance de Christian Huyghens à Leyde*, Paris : Palais de l'Institut.
- Platon (1985), *Timée/Critias*, établi et traduit par Albert Rivaud, Paris: Les Belles Lettres.
- Platon (1992), *Timée/Critias*, traduction de Luc Brisson, Paris: GF Flammarion.
- Plomp R. (1999), « A Longitude Timekeeper by Isaac Thuret with the Balance Spring Invented by Christian Huygens », in *Annals of Science*, 56, 4, 379-394.
- Rey A. ([1992] 2006), *Dictionnaire historique de la langue française*, Paris : Le Robert, Vol. 2.
- Riccioli G. B. (1651), *Almagestum novum astronomiam veterem novamque complectens observationibus aliorum, et propriis novisque theorematibus, problematibus, ac tabulis promotam, in tres tomos distributam*, Bologne: Haeredis Victorii Benati.
- Richer J. (1679), « Recueil d'Observations astronomiques et physiques faites en l'île de Cayenne », in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris: Par la Compagnie des Libraires, Tome VII, Partie I, Chapitre II.
- Robin L. (2002), *Platon*, Paris : PUF.
- Royal Society, (1675-1680), *Records and Papers*, Register Book Original Vol. 5.
- Royal Society (1685-1687), *Records and Papers*, Register Book Original, Vol. 6.
- Schaffer S. (2013), « Swedenborg's Lunars. », in *Annals of Science*, Vol. 71, No. 1., 1-25.
- Schaffer S. (2014), *La fabrique des sciences modernes*, Paris : Seuil.
- Seidengart J. (2016), *Vérité Scientifique et vérité philosophique dans l'œuvre d'Alexandre Koyré*, Paris : Les Belles Lettres.
- Shank J.B. (2004), « There was no such a thing as the 'Newtonian Revolution', and the French Initiated It. Eighteenth-Century Mechanics in France before Maupertuis. », in *Early Science and Medecine*, Vol. 9, No. 3, 257-292.
- Shank J. B. (2008). *The Newton Wars & the beginning of the French Enlightenment*. USA: The University of Chicago Press.
- Shea W. (1992), *La révolution galiléenne*, Paris : Seuil.
- Shea W. R. (1997), *Galileo's intellectual revolution, Middle period, 1610-1632*, New York: Science History publications, A division of Neale Watson Academic Publications.
- Shea W. (2012), *Galileo Selected Writings*, Oxford : Oxford University Press.

- Shorey P. (1901), « Plato, Lucretius and Empiricus », in *Harvard Studies in Classical Philology*, 11.
- Smith G.E. (1996), « Huygen's 1688 Report to the Directors of the Dutch East India Company on the Measurement of Longitude at Sea and the Evidence it Offered Against Universal Gravity. », in *Christiaan Huygens. Actes du Congrès International de Leiden*, Vol. XII, No. 1, 198-214.
- Smith G.E. (2000), « Fluid resistance : Why did Newton Change His Mind ? » in *The foundations of Newtonian scholarship*, Dalitz, R. H., & Nauenberg, M. (eds.), 105-136.
- Smith G.E. (2001), « The Newtonian Style in Book II of the Principia », in *Isaac Newton's Natural Philosophy*, Buchwald J. & Cohen I.B. (eds.), Cambridge, Massachusetts, London, England : The MIT Press, 249-297.
- Smith G.E. (2014), « Closing the Loop : Testing Newtonian Gravity, Then and Now. », in *Newton and Empiricism*, Biener Z. & Schliesser E. (eds.), Oxford : Oxford University Press, 262-351.
- Souffrin P. (2012), *Ecrits d'histoire des sciences*, Paris : Les Belles Lettres
- Speiser D. (1988), « Le « Horologium Oscillatorium » de Huygens et les Principia », in *Revue Philosophique de Louvain*, Tome 86, no 72, 485-504.
- Speiser D. (1988), « Le « Horologium Oscillatorium » de Huygens et les « Principia » », in Struik D. J. (1981), *The Land of Stevin and Huygens*, Dordrecht, Netherlands, Boston, Mass & London : D. Reidel.
- Stakley W. (1752), *Memoirs of sir Isaac Newton's life*, MS/142, Royal Society Library, London, UK.
- Stearns R. S. (1970), *Science in the British Colonies of America*, Urbana, Chicago, London : University of Illinois Press.
- Stein H. (1977), « Some Philosophical Prehistory of General Relativity », in *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Earman J., Glymour C. & Stachel J. (eds.), Vol. VIII, 3-49.
- Stirling J. (1735), « Of the Figure of the Earth, and the Variation of Gravity on the Surface. » in *Philosophical Transactions*, vol. 39, no. 436-444
- Tadhg Ó hAnnracháin (2015). *Catholic Europe, 1592–1648: Centre and Peripheries*. Oxford: Oxford University Press.

- Taton R. (1988), « L'expédition géodésique de Laponie (Avril 1736 - Août 1737), in *La figure de la Terre du XVIIIe siècle à l'ère spatiale*, Paris : Gauthier-Villars, 115-138.
- Terral M. (2006). *The man who flattened the earth*. Chicago: University of Chicago Press.
- Todhunter I. (1873), *A History of the Mathematical theories of attraction and the figure of the earth*, London: Macmillan and Co, Vol.1.
- Valleriani M. (2010), *Galileo Engineer*, Springer Netherlands.
- Valmont de Bomare J.-C. (1791), *Dictionnaire raisonné universel d'histoire naturelle*, Lyon : Bruyset Frères, Tome I.
- Vanpaemel G. (1989), « Science disdained : Galileo and the problem of Longitude », *Italian Scientists in the low countries in the XVIIth and XVIIIth centuries*, Maffioli C.S. & Palm L.C. (eds.), Amsterdam, Atlanta : Rodopi, 111-123.
- Van Helden, A. (1986). *Measuring the universe: cosmic dimensions from Aristarchus to Halley*. Chicago & London : University of Chicago Press.
- Vig. R.J. (Novembre 2011), *Accurate Clocks and their Applications*. Princeton (source: [princetonacm.acm.org/downloads/AccurateClocksVig.pdf](http://princetonacm.acm.org/downloads/AccurateClocksVig.pdf))
- Vilain C. (1996), « La loi galiléenne et la dynamique de Huygens. », in *Revue d'histoire des mathématiques*, Vol. 2, 95-117.
- Vilain C. (1996), *La mécanique de Christian Huygens: la relativité du mouvement au XVIIe siècle*, Paris : A. Blanchard
- Vitrac B. (2006), « Les mathématiques dans le Timée de Platon : le point de vue d'un historien des sciences. », in *Etudes platoniciennes*, Vol. 2, 11-78.
- Voltaire (1879), « Éléments de la philosophie de Newton », in *Œuvres Complètes de Voltaire*, Paris : Frères Garnier.
- Westfall R.S. (1971). *Force in Newton's physics: the science of dynamics in the seventeenth century*. London : Macdonald and Co. ; New York : American Elsevier.
- Westfall R.S. ([1980] 1986), *Never at rest, A Biography of Isaac Newton*, Cambridge, London, New York, Melbourne, Sydney : Cambridge University Press.
- Westfall R.S. (1986), « Newton and the Acceleration of Gravity », in *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 35, No. 3, 255-272.
- Westfall R.S. (1990), « Making a world of precision: Newton and the Construction of Quantitative Physics », in *Some Truer Method. Reflexions on the Heritage of*



- Newton, Durham, F. & Purrington, R.D. (eds.), New York: Columbia University Press, 59-87.
- Whiston W. ([1749] 1753), *Memoirs Of The Life And Writings Of Mr. William Whiston (...)*, London: Whiston J. & White B., 32-33.
- Whiteside D.T. (1966), « Newton's marvellous year: 1666 and all that » in *The Royal Society journal of the History of Science*, Vol 21, No. 1, 32-41.
- Whiteside D.T. (1970), « Before the Principia : The maturing of Newton's thoughts on dynamical Astronomy, 1664-1684 », in *JHA* i, 5-19.
- Whiteside D.T. (1976), « Newton's Lunar Theory : From high Hope to Disenchantment », in *Vistas in Astronomy*, Vol. 19, 317-328, Great Britain : Pergamon Press.
- Whitstone S. (2008), « The identification and attribution of Christian Huygens' first pendulum clock », in *Antiquarian Horology*, 201-222.
- Whitstone S. (2012), « Christian Huygens' Lost and Forgotten Pamphlet of his Pendulum Invention », in *Annals of Science*, Vol. 69, 1, 91-104.
- Wolf C. (1902), *Histoire de l'Observatoire (1666-1793)*, Paris : Gauthier-Villars.
- Yoder J.D. ([1988] 1990), *Unrolling Time time : Christiaan Huygens and the mathematization of nature*, Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Yoder J.D. (2013), *Catalogue of the manuscripts of Christiaan Huygens including a concordance with his oeuvres complètes*, Leiden : Brill
- Αριστοτέλης (2008), *Φυσικά Γ'-Δ'*, εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια Μπετσάκος Β., Θεσσαλονίκη : εκδόσεις Ζήτρος
- Αριστοτέλης (2010), *Φυσικά Α'-Β'*, εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια Μπετσάκος Β., Θεσσαλονίκη : εκδόσεις Ζήτρος
- Πλάτωνας (1995), *Τιμαίος*, εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια Κάλφας Β., Αθήνα : Πόλις.

Sites numériques consultées:

<http://gallica.bnf.fr>

<http://www.newtonproject.ox.ac.uk>

<https://cudl.lib.cam.ac.uk>

<https://www.museogalileo.it>

<http://adsabs.harvard.edu>

<https://fr.wikisource.org>