

Archéologie de la mécanique classique

Hugues GENVRIN

2014

On se propose de définir en premier lieu le périmètre de la mécanique. Deuxièmement nous porterons notre attention sur des couples associant des physiciens et des notions historiques ou philosophiques qui ont structuré la pensée et la pratique de la mécanique.

Tout d'abord on s'appuiera sur l'étude de deux mouvements dialectiques qui paraissent centraux depuis l'époque d'Euclide et Pappus : la méthode et le jugement formant une dialectique métathéorique, chacune d'elles obéissant également à une dialectique propre. Archimède symbolisa la mise en place pratique de ce double mouvement.

Néanmoins bien que tout le monde reconnaisse aujourd'hui qu'Archimède fut l'instigateur des plus profondes pensées de la mécanique antique, les siècles suivants retinrent la théorie d'Aristote qui devint le référent en matière de physique, et ce malgré ses erreurs qui seront découvertes au fil du temps.

La synthèse copernicienne constitua le premier système de pensée s'opposant à une mécanique de l'a priori de la scholastique, héritée d'Aristote. Les arkhétoniques faisant alors place à des systèmes moins dépendant d'énoncés métaphysiques, voire théologiques, accordant à la mesure le droit d'avancer des propositions sur l'agencement du cosmos. Cette époque voyant la nouvelle mécanique des astres supplanter celle de Ptolémée, elle se fonda sur les travaux de Copernic, Brahé, Kepler et Galilée.

Si nous présenterons des détails de l'œuvre de Galilée qui créa la cinématique, nous poursuivrons cette histoire des concepts en exposant celle de Newton, qui naquit l'année où mourut Galilée. Le physicien britannique découvrit les lois de la mécanique, en particulier la relation fondamentale de la dynamique qui lui permit d'expliquer la loi de la chute des corps de Galilée et les lois de Kepler si nous prenons également en compte la loi de la gravitation universelle. Il élaborait une nouvelle arkhétonique dans « Les principes mathématiques de la philosophie naturelle » [33] ou « Principia ».

Nous nous interrogerons sur le statut de la loi en science, puis nous prolongerons cette analyse avec une étude du principe de moindre action, formulé pour la première fois par Fermat pour le cas de la lumière, qui permit à Lagrange d'en présenter une expression féconde pour formuler les lois de la mécanique sous une forme analytique, conduisant à la synthèse de Laplace dans « Le système du monde ».

Après l'effondrement des prétentions d'universalité de la mécanique, il paraîtra intéressant d'exposer l'avis de Poincaré sur la mécanique classique, tel qu'il a pu l'exposer dans « Science et hypothèse ».

Entre-temps il y aura eu une prise de conscience de la communauté scientifique de l'impossibilité de réaliser le mouvement perpétuel qui apparaissait comme le graal de la mécanique. Puis l'expérience de Planck sur le rayonnement du corps noir en 1900 faisant concevoir une énergie qui évolue de manière discrète dans l'infini petit, marqua la naissance de la mécanique quantique. Si l'on ajoute la découverte d'Einstein de la relativité générale, ces événements conduisirent à la nécessité d'abandonner l'idée d'un espace et d'un temps absolus tels qu'avait pu l'exposer Newton.

1 Qu'est-ce que la mécanique ?

1.1 Définition

“Les mécaniciens de l'école d'Héron disent que la mécanique peut être divisée selon une partie « théorique » et une partie « manuelle ». La partie théorique est composée de la géométrie, de l'arithmétique, de l'astronomie et de la physique ; la partie manuelle du travail effectué sur les métaux, de l'architecture, de la menuiserie, de la peinture et de tout ce qui implique une habileté manuelle”.

Pappus, *Livre VII des Collections mathématiques*
(Préface) [34].

La mécanique est une science qui a pour objet les lois du mouvement et de l'équilibre, mais elle est aussi une technique qui va avoir pour objet l'étude des machines, de la construction à leur fonctionnement. Dans cette définition s'élève une double origine : la loi et la pratique, elle se situe en conséquence au croisement du logos et de la praxis.

Dans la préface de son œuvre majeure « Les principes mathématiques de la philosophie naturelle » Newton indiqua également l'existence d'une « double mécanique » [34] : la mécanique rationnelle qui suivait une voie démonstrative se distinguait de la pratique. Toujours est-il que du point de vue du logos, en constatant que la loi physique qui n'est pas première dans l'ordre des lois de la nature à l'époque des grecs, appartient à un corpus qui peut la dépasser. Curieusement nous retrouvons cette intégration de sphères d'idées dans les « Principia » de Newton, on peut en retenir la fragilité de l'édifice théorique, une remise en cause de la loi physique pouvait faire chuter les lois de la nature qu'elle soutint, ou qui y étaient jointes, et tel un château de cartes les lois et à fortiori l'ordre dans la société aurait été menacées.

On retrouve cet argument dans l'histoire des sciences, ils ont nourri les

châtiments dont furent victime Bruno ou Galilée. Cette idée nous fait directement penser que ce n'est pas la religion en tant que telle la responsable des exactions dont furent victimes certains astronomes et philosophes, bien plutôt l'ordre social en place avec ses structures de gouvernance, sa justification, qui ne sont pas sans rappeler l'ordre imposé par Zeus dans la mythologie. En définitive on peut affirmer que le mythe de Prométhée s'est porté sur Galilée, et que plus généralement tout physicien est un Prométhée en puissance.

1.2 Éléments de l'histoire des techniques

1.2.1 L'antiquité

La mécanique antique peut se scinder en trois lieux : la Grèce, Alexandrie et Syracuse sur trois époques : celle de la Grèce d'Aristote, l'Alexandrie d'Euclide et Apollonius, la Syracuse d'Archimède, et enfin la période grecque d'Alexandrie qui verra un âge d'or de la mathématique et physique antique. Si elle possédait une école d'ingénieurs dès le II^e siècle, Braudel souligna que l'utilisation du creuset technique fut largement limité par l'esclavage qui offrait une main d'œuvre exploitable à souhait. Néanmoins Alexandrie verra s'imposer Archimède, Pappus, Hipparque, Héron, Ptolémée (qui inventera la trigonométrie sphérique), Ératostène (qui mesura la circonférence de la terre) et Diophante qui s'illustrèrent en mécanique et mathématique, permirent à la cité un rayonnement hors du commun. La mécanique permettait déjà d'économiser de la puissance physique, en multipliant la force par l'effet de levier ou en la démultipliant par l'utilisation de poulies ou palans. Ce sont là des théories qui remontent à Pappus, Eudoxe et Archimède. L'époque antique se distingua par l'usage et la maîtrise de ce qu'on appelle les « cinq mécaniques » [38] :

1. le plan incliné,
2. le coin,
3. la vis,
4. le levier,
5. la roue

La roue fut employée autant comme mécanisme : pour le transport, qu'en tant que pièce : roue dentée pour les engrenages, systèmes de poulies, de palans. On peut ajouter une invention importante : l'horloge hydraulique ou clepsydre par Ctésibios qui fut le maître de Héron, on mentionnera que celui-ci inventa aussi la mécanique cylindre-piston.

1.2.2 Le Moyen-âge

Les constructions sont surtout représentés par les édifices religieux et les châteaux-forts. La mécanique de la période moyenâgeuse marquée par la

construction des cathédrales emprunta à Eudoxe l'art de faire des voûtes. On retrouve les premières voûtes d'ogives et arc-boutant dans les édifices religieux à partir du XII^e siècle [25]. Cette époque marqua le rôle central de l'architecte qui était aussi l'ingénieur, à l'image de Villard de Honnecourt, reste encore le symbole du maître d'œuvre qui renvoyait à l'idéal humaniste de Vitruve ; dont on retrouve la symbolique dans le dessin communément appelé « L'homme de Vitruve », réalisé à la plume, encre et lavis sur papier par Léonard de Vinci (cf. figure 1). Beaucoup d'édifices construits au moyen-

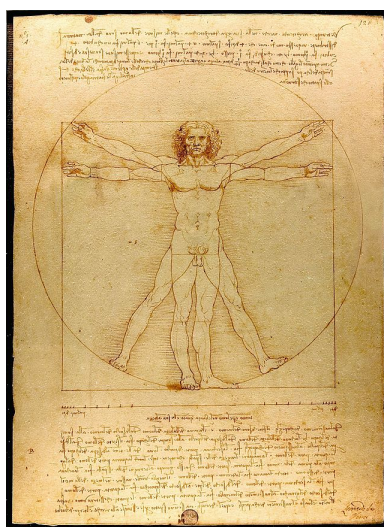


FIGURE 1 – Étude des proportions du corps humain selon Vitruve - Léonard de Vinci (aux alentours de 1492).

âge sont restés les plus hauts monuments des villes modernes. Gimpel nous renseigne que la Tour Victoria du parlement de Londres domine Big Ben de 6 mètres. On mentionnera que la flèche de la cathédrale de Strasbourg qui culmine à 142 atteint une hauteur équivalent à un immeuble de quarante étages [25]. Les architectes du moyen-âge furent de véritables héros, ils faisaient la gloire des villes pour ses représentants fortunés en entretenant un marché du travail pour les diverses corporations. Par ailleurs leur prestige était renforcé par la construction des moyens de défense comme les châteaux-forts.

Les machines Si l'invention de la brouette au XIII^e exprima l'association de la roue et du levier pour transporter les charges, l'historienne Carus-Wilson mentionna que « la mécanisation du foulage fut un événement aussi décisif que la mécanisation du filage ou du tissage au XVIII^e siècle ». [16]. Cette technique s'appuyant sur l'utilisation de la roue devait également permettre la révolution des moulins. On ajoutera des inventions relatives au renvoi, la transformation des mouvements qui vinrent de Chine et d'Italie,

et celles de l'agriculture.

Au niveau social les corporations permirent une spécialisation, une division du travail qui facilita la diffusion d'un savoir-faire. Les commerçants se préoccupèrent des systèmes de mesure : le poids pour l'huile, le vin, les grains, le volume pour les métaux, le sel et le poivre [22]. Le monde Arabe héritier du savoir d'Alexandrie [36] se trouvant stimulée par les échanges (d'idées et de marchandise) autour de la méditerranée, fut très dynamique. Léonard de Pise y ramena de nouveaux concepts numériques lors d'un voyage en Afrique du Nord, composant en 1202 « Liber abaci » originellement un exposé de la numération indienne qui allait introduire le zéro en occident.

1.2.3 La technique de la renaissance à l'âge classique

La renaissance fut jalonnée par de nombreuses inventions scientifiques autant que techniques, au niveau des instruments de mesure Galilée inventa un thermomètre en 1593. Au rang des constructions, on s'intéressa entre autres à la quantification de l'épaisseur d'un mur pour éviter qu'il ne soit perforé par un boulet de canon, Tartaglia publia un livre sur les trajectoires des boulets de canon dès 1550. Toujours dans le domaine de la construction Stevin écrivit en 1586 un texte sur les plans inclinés pour faciliter l'élévation de charges lourdes.

On peut dire que grâce au développement d'une économie matérielle, le marché permit de valoriser des gains de productivité. Si l'imprimerie autorisa la diffusion du savoir ouvrant l'ère d'un marché de masse, le domaine de la production rattaché au transport maritime s'appuyait sur plusieurs industries spécifiques :

1. Production

- (a) chantiers navals,
- (b) corderies,
- (c) charpentiers,
- (d) menuiseries,
- (e) voileries,
- (f) ...

2. Logistique

- (a) arsenaux
- (b) transformation des matières premières
- (c) ...

On observera que lorsqu'on passa du stade de l'invention au stade de la production à grande échelle de nouvelles problématiques se posaient pour optimiser la qualité, respecter les délais des commandes, ne pas tomber en rupture de stock ... Par exemple la poulie qui était très utilisée pour manipuler les gréements sur un voilier impliquaient à la marine britannique d'en

produire 130 000 par an, tâche qui était réalisée sur les chantiers navals de Portsmouth [39]. À vrai dire on remarquera que cette problématique n'a pas changé, elle a accompagné un élargissement du champ de la technique qui s'étendait sur le domaine de l'économie. On retrouvera sur la figure 2 une photo d'une machine à câbler de la corderie royale de Rochefort créée au XVII^e siècle, site de production intégré à l'arsenal fournissant les cordages de la marine royale française¹. D'autre part si Léonard de Vinci développa



FIGURE 2 – Machine à câbler - Corderie royale de Rochefort.

des planches et prototypes de systèmes mécaniques, le passage à l'utilisation d'une machine n'était pas du tout implicite, et beaucoup de ses projets ne furent pas développés.

Au XVII^e on mentionnera le développement des manufactures, la première machine à calculer : la Pascaline. Soulignons que l'invention d'un pignon mobile pour les carrosses au XVII^e siècle fut une véritable révolution dans les transports. Au XVIII^e siècle l'encyclopédie allait mettre à profit la mécanisation de l'impression des caractères typographiques et diffuser un savoir autrefois réservé aux érudits.

1.2.4 Les lumières : le corpus encyclopédiste [32]

Si les projets encyclopédistes se développèrent à l'époque des lumières, on fera remonter les premières encyclopédies longtemps avant, parmi plusieurs civilisations. Néanmoins il apparaît clairement que la démarche des lumières s'appuyait sur une reproductibilité à la fois d'un point de vue qualitatif et quantitatif acceptables, grâce à l'invention de l'imprimerie qui date du XV^e siècle, et offrirent à l'encyclopédie de se retrouver dans une position centrale du savoir au XVIII^e siècle. Parmi les projets on peut citer l'encyclopédie Britannica. A l'origine on trouvera dans les œuvres de Bacon et Locke l'idée de rassembler le savoir sous la forme d'un livre permettant la diffusion de

1. On peut consulter sur le WEB les articles consacrés à l'art des cordes par d'Alembert et Duhamel (Précis de l'art de la corderie en 1746).

l'état de tous les savoirs en place. Si le projet de Bacon fut avorté, ce fut Locke qui soumit une méthode pour classer les thèmes à aborder, suivant la structure d'un arbre de porphyre. On passa alors d'un savoir réservé à des érudits, la forme dominante de la Renaissance, à un savoir qui se déployait par l'intermédiaire de l'encyclopédie vers l'ensemble de la société.

L'empreinte de Young sur l'encyclopédie Britannica Sa première édition fut publiée entre 1768 et 1771 à Edimbourg sous l'égide de gentlemen écossais, la première phrase de l'introduction replace l'ambition de ce projet dans la philosophie utilitariste : « Utility ought to be the principal intention of every publication ». En 1797 sa troisième édition fit qu'au supplément de 1801 elle atteignit vingt volumes. Le supplément à la sixième édition entre 1816 et 1823 fut marqué par les 63 articles rédigées par Young (on compta 46 biographies) qui représentèrent 380 pages. Alors qu'il était le plus grand homme de science depuis Newton, il composa des articles sur les ponts, la menuiserie, la lumière, l'Égypte, la construction des routes, le langage, les marées, l'intérêt, les poids et mesures, la médecine ou encore les machines à vapeur. On précisera que ce fut dans la librairie-relieur de son employeur que le jeune Faraday qui était alors apprenti, commença à apprendre l'électricité alors qu'il reliait (et parcourait) les articles de l'encyclopédie, et qu'il fut alors recommandé au chimiste Davy. Parallèlement à son activité pour l'encyclopédie on signalera que Young fut le fondateur de la notion de résilience en physique des matériaux dont il parvint à une définition, ce concept sera étendu plus tard à la biologie et la médecine avec succès. Il symbolisa la continuité d'Archimède par son engagement à la fois dans la technique et scientifique.

L'encyclopédie de d'Alembert et Diderot L'aventure encyclopédiste dans le Royaume de France démarra en 1709, mais ce fut en 1747 que Diderot et d'Alembert prirent en main le projet. Le physicien Réaumur occupant le poste de directeur de la publication jusqu'en 1750. Dès 1751 le prospectus qui avait pour but de souligner les insuffisances des encyclopédies existantes fut publié et diffusé à 8 000 exemplaires. Les personnes qui participèrent au projet furent appelées les collaborateurs, on y retrouvait des personnes exclues des hautes-charges de l'état et de l'église, provenant pour beaucoup du tiers-état. On en compta en tout dans les 150, s'y retrouvèrent des personnages célèbres tels Turgot, Necker, Quesnay, Montesquieu, Rousseau, Vaucanson, ou encore Helvétius. D'Alembert rédigea 1 600 articles jusqu'à sa démission en 1758, dont ceux sur les mathématiques, Diderot se consacra lui aux articles de sciences expérimentales et à la philosophie. Ce furent en tout 4 255 exemplaires de 17 volumes qui furent publiés, dont 7 édités à Paris et 10 à Neuchâtel, entre 1751 et 1772. Le sous-titre fut « Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers », on y trouva alors 71 818 articles occu-

pant 18 000 pages (qui représentaient un peu moins de 22 millions de mots). Le plus important contributeur fut Louis de Jaucourt qui rédigea 17 395 articles. Le projet occupa 1 000 ouvriers pendant 24 ans. On pouvait distinguer deux types de documents : les textes et les planches. La documentation iconographique constituée par les planches ne fut pas négligée, elle accompagna les débuts de la révolution industrielle avec ses dessins techniques. Toutefois nous remarquerons à ce sujet qu'il n'y avait qu'un article consacré aux machines à feu, avec une planche sur la machine de Newcomen l'accompagnant. Mais on notera la présence de la machine autoclave de Papin. Par contre dès 1753 on pouvait retrouver un article de d'Alembert consacré aux « Principes de la philosophie naturelle », une des œuvres majeures de Newton, alors que la traduction de la marquise du Châtelet fut publiée à titre posthume quatre ans plus tard. Diderot dira de la qualité des articles : « Parmi quelques hommes excellents, il y en eu des faibles, de médiocres et de tout à fait mauvais. De là cette bigarrure dans l'ouvrage où l'on trouve une ébauche d'écolier, à côté d'un morceau de maître [...] ». On découvre là un problème fondamental de toute encyclopédie et plus généralement de tout système d'information : le dilemme sur la qualité des informations et les coûts engendrés, qui reste névralgique sachant qu'il traite d'un sujet qui se veut une représentation du savoir universelle à date, et que ce dernier est par nature dynamique. On se retrouve face à des coûts de production naturellement élevés, nécessitant une grande expertise ainsi que des coûts d'entretien de l'information relatifs aux mises à jours, aux rectifications loin d'être négligeables.

Les huit mécaniques des lumières L'encyclopédie permet de marquer des méthodes et bonnes pratiques pour les différentes techniques, la classification des machines simples se composait alors de huit dispositifs, qui en fait pouvaient se décliner de la classification antique.

Définition 1 (Machine simple²). *Une machine simple est un dispositif mécanique permettant de transformer une force dont le module ou/et la direction sont différentes.*

Voici la liste qu'on peut en faire, on trouvera sur la figure 3 une page encyclopédique datée de 1728 présentant les diverses machines de manière plus exhaustive.

1. levier,
2. roue,
3. poulie,
4. coin,
5. plan incliné,

2. Référence : http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_simple [14]

6. vis,
7. engrenage,
8. treuil.

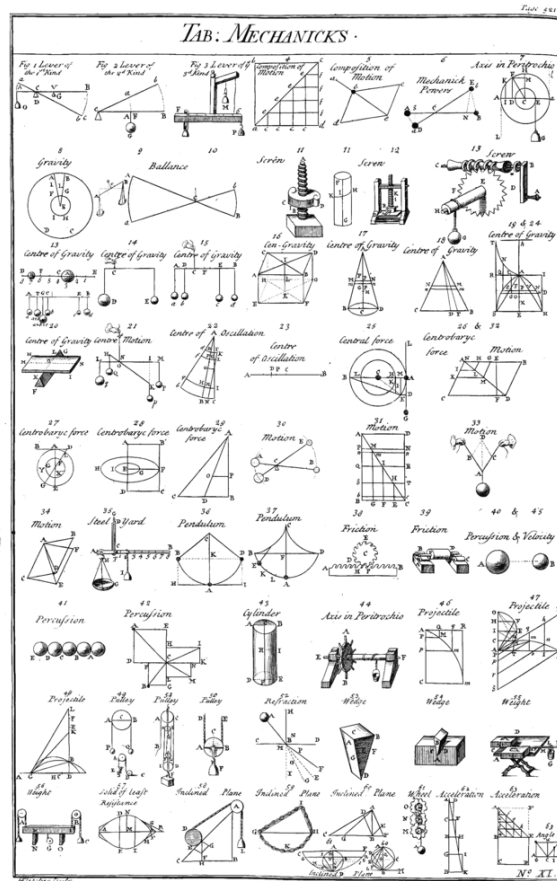


FIGURE 3 – Les machines simples tirées de « Cyclopaedia »(1728) (cf. note 2).

La plupart des démonstrations de l'effet des machines simples se retrouvent dans l'application du principe de d'Alembert, on précisera que les travaux de Coulomb sur le plan incliné permirent une étude approfondie des forces de frottement. On complétera en indiquant qu'on peut grouper les machines simples suivant le cadre formel traitant du problème.

Le coin Le coin reste une des plus ancienne machines simples, il était déjà utilisé au paléolithique. l'intérêt est de pouvoir renvoyer pour l'action d'une force verticale s'exerçant à la base du solide une force perpendiculaire aux deux autres côtés, dirigée du solide vers l'extérieur proportionnelle « à la différence des contraintes qui caractérisent le côté et la base du coin » [38].

Poulies et treuil Les systèmes utilisant les poulies peuvent se distinguer suivant plusieurs sous-cas : poulie simple, poulie double et composées. Le treuil représentant un mécanisme analogue où la traction s'exerce par un effort en rotation. Dans le cas d'une poulie simple ou d'un treuil (cf. figure 4), pour un poids P_f exercé par un fardeau sur un système qu'il convient de déplacer sur une distance d_0 , l'intensité de l'action à réaliser par la traction V_t à accomplir sera dans le rapport :

$$\frac{V_t}{P_f} = \frac{d_f}{d_t}.$$

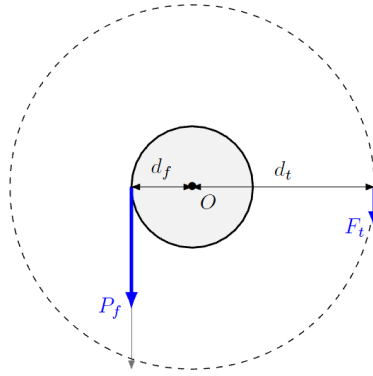


FIGURE 4 – Modélisation des efforts pour un mécanisme à poulie simple ou treuil.

Leviers, roues, engrenages Archimède associa le principe de la roue à celui du levier, considérant les axes passant par le point fixe qui déterminerait l'essieu comme autant de leviers. Le système des leviers se trouvant à l'origine des mécanismes de pesées ou pour multiplier un effort. Les engrenages restant alors un cas particulier de transmission du mouvement entre des roues dentées, qu'on retrouvait dans les mécanismes d'horlogerie.

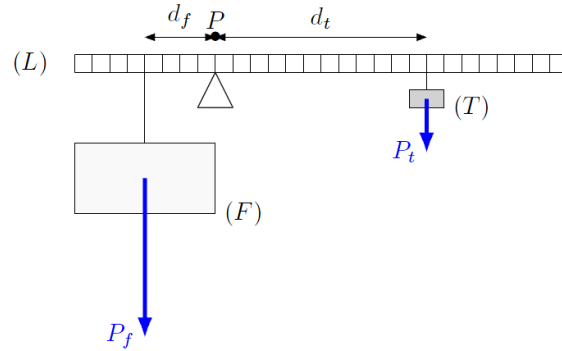


FIGURE 5 – Mécanisme de levier entre un fardeau et une tare autour d'un pivot P .

On retrouve la formule bien connue :

$$P_t \times d_t = P_f \times d_f \Leftrightarrow \frac{P_t}{d_f} = \frac{P_f}{d_t}$$

Plan incliné, vis En s'appuyant sur un plan incliné (cf. figure 6) dont l'utilité serait de maintenir un fardeau élevé à une certaine hauteur, on peut calculer le rapport de proportionnalité entre les poids et les longueurs des côtés respectifs. Si on matérialise le plan incliné par un triangle rectangle (A, B, C) , le poids du fardeau et de la tare par $\mathbf{P_f}$ et $\mathbf{P_t}$ alors à l'équilibre :

$$d_f = \frac{BC}{AC} \times \frac{P_t}{P_f} \times d_t$$

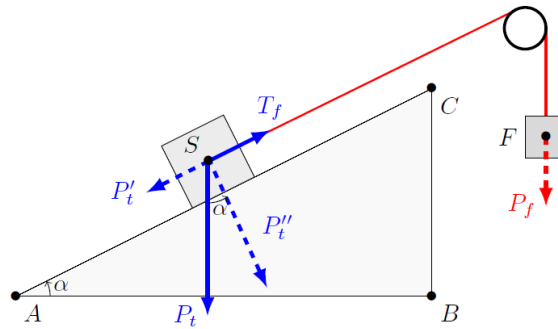


FIGURE 6 – Lever d'un fardeau à partir d'une poulie et d'une tare sur un plan incliné.

Le savant de Syracuse voyait dans la vis sans fin l'analogue du plan incliné, par l'enroulement d'un triangle rectangle autour d'un cylindre (cf. figure 6).

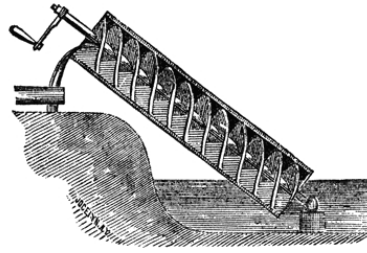


FIGURE 7 – Vis d'Archimède par Chambers [13] (1908).

Définition 2 (Machine composée³). *Une machine composée est un assemblage de machines simples.*

La brouette donne l'exemple d'une machine composée puisqu'elle allie l'utilisation de deux machines simples : la roue et le levier. On retrouve sur la figure 8⁴ l'ensemble des forces qui s'appliquent sur le système.

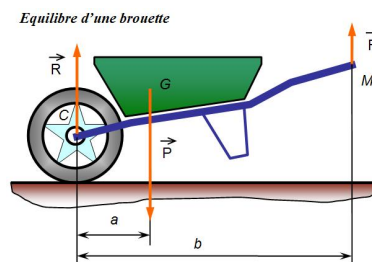


FIGURE 8 – La brouette, une machine composée (Wikipédia).

Coulomb [6] mentionna une expérience que réalisa le maréchal Vauban, qui parut dans le bulletin de la science des ingénieurs de Bélidor, où Vauban en conclut « que sur terrain sec, uni et horizontal, 100 hommes avec des brouettes feront le travail de 150 hommes avec des hottes ». On peut imaginer la véritable révolution pour les activités de déblayages et remblayages que procura cette machine.

1.2.5 De la révolution industrielle à notre époque

Alors que les machines-outils commencèrent à se répandre, le développement de l'industrie textile au XVIII^e marqua une étape importante vers la révolution industrielle. La problématique pour construire les pièces des machines à vapeur restant avant tout mécanique, nécessitant davantage de précision, les inventions se succédèrent à grand pas. La connexion avec le domaine de l'électricité au XIX^e sera fructueuse, consacrée par l'invention de pièces

3. Références : https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_simple

4. Références : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Brouette>.

comme l'alternateur ou de la machine automobile. Puis au XX^e les moyens de transports modernes permirent le développement d'industries faisant un large usage des techniques mécaniques : automobile, transport ferroviaire et aérien. Le domaine de l'énergie symbolisant aussi un ressort pour l'utilisation de la mécanique.

Évolution de la technique à nos jours Gosset embauché chez Guinness pour améliorer le goût de la bière fut un des précurseurs de l'analyse statistique moderne (En 1908 il inventa le test de student). En conséquence l'OST ne fut pas la première approche scientifique du travail au sens strict, puisque Taylor publia seulement en 1911 son principe d'organisation scientifique du travail. On peut se référer à Hacking [20] ou Déroisière [24] pour remarquer comment les nombres étaient déjà utilisées à des fins économiques (pour une compagnie ou pour un état), ou découvrir la gestion des ateliers d'Oberkampf pour voir que les lignes de production et les techniques d'indennage obéissaient à des techniques de production méthodiques [23].

Néanmoins l'outil de traitement de l'information adéquat qui émergea au XX^e siècle fut reposa sur les calculateurs, dont l'ordinateur personnel qui permit de diffuser un outil d'exploitation de données standard (grâce au système d'exploitation) d'une puissance inconnue jusqu'alors. Le but étant de traiter des données numériques pour répondre le plus efficacement aux engagements des firmes par l'usage de logiciels de simulation, d'aide à la conception, de production qui révolutionnèrent la technique.

Si la technique entraîna dès ses origines la diminution des distances physiques via les automobiles, trains, avions, moyens de communications privilégiés pour transporter sur des distances plus ou moins longues des voyageurs et du fret. Au niveau logistique l'invention des conteneurs fut une révolution pour le transport de marchandises qui accompagna la mondialisation des échanges.

Dans le prolongement d'une intégration pluridisciplinaire, le XXI^e verra sans doute une utilisation domestique des robots ou l'emploi des nanotechnologies dans le domaine industriel. La robotique bénéficiant d'interactions entre la mécanique, l'informatique et l'électronique.

1.2.6 Économie de pensée

Nous mettons ici en avant une dimension particulière de ce qu'on appelle la complexité, qui dépend de l'état de l'art des connaissances et se distingue d'une complexité plus fondamentale telle que peut nous l'expliquer Connes [11].

À ce stade ce qui nous intéresse en particulier reste le symbole de l'économie de la pensée que permet d'accomplir la mécanique, avec le calcul des horaires de marées. En son temps César s'était déjà plaint auprès de ses généraux de l'impossibilité de calculer l'horaire des marées alors qu'il avait déjà perdu

dix-huit navires lors d'une précédente tentative d'invasion de la Bretagne [9]. En méconnaissant les lois de la gravitation, en particulier son application pour la relation existant entre la lune et la terre, cela peut s'avérer impossible ou tout au moins très compliqué en faisant un usage de statistiques et de marges d'erreurs. Toutefois avec les lois de Newton le problème devint relativement simple, on aboutit certes à un formalisme qui pourra paraître compliqué à un lecteur non instruit, mais il reste possible d'apprendre et d'appliquer des règles pour la rédaction d'un calendrier des horaires de marées, qui sont toujours très utiles pour les pêcheurs ou les estivants. On retrouvera ci-dessous une machine inventée en son temps par Thomson le célèbre physicien britannique pour calculer l'horaire des marées, tâche qui est nettement plus facile de nos jours avec un ordinateur.

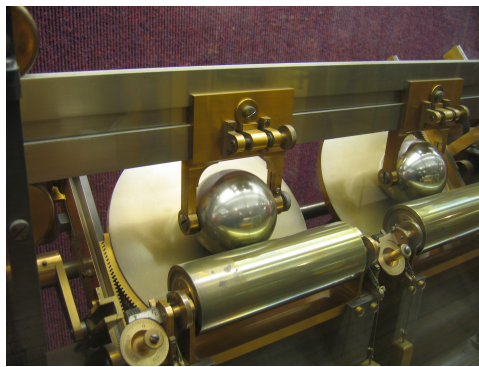


FIGURE 9 – Machine des frères Thomson [9].

Si le mot d'économie peut interpellier le lecteur, on précisera qu'au-delà d'une dimension liée à la sphère monétaire, l'économie renvoie à l'art de gérer en général, ainsi quand on en viendra à aborder le principe de moindre action les auteurs parlèrent d'une loi d'économie de la nature. Si l'exemple pris est issu de ce qu'on pourrait appeler un problème technique aujourd'hui, il se retrouvera avec la mécanique des astres. On passera alors de l'a priori à la mesure puis à la formulation des lois mathématiques qui condensent toutes les mesures.

1.2.7 Une dimension pragmatique

Elle permet de mieux comprendre le monde, de se le représenter dans des termes, avec des une grammaire propres à découvrir des lois de la nature qui ne sont pas des lois de l'a priori. Ainsi les mathématiques apparaissent un langage adapté à la mécanique. Si nous devions prolonger la définition initialement proposée de la mécanique, on dirait volontiers qu'elle est un formalisme pour saisir la production, le mouvement, l'équilibre, l'évolution de systèmes physiques.

Du côté du créateur, libre cours au découvreur ou à l'inventeur d'user d'une approche épistémologique de son choix, étant entendu que ce qui définira une bonne mécanique sera la qualité de justesse, d'économie, de régularité, de conformité des faits prédits avec ceux observés. La mécanique est un domaine ouvert sur le réel, et surtout gardons en tête ce que nous dit Bachelard : un dispositif mécanique reste une théorie matérialisée.

Nous avons pu percevoir que l'histoire des techniques permettait de repérer la liaison entre les deux mécaniques. Si la technique est la mise à plat d'un savoir, il faut bien constituer le savoir, c'est le sujet de la mécanique rationnelle.

2 Éléments de mécanique rationnelle

On peut distinguer deux catégories de termes en science. En référence aux mots utilisés on remarque les noms communs démonstration, théorie, jugement, mesure, ... d'un côté ; puis pour la mécanique par exemple on retrouvera des expressions et mots tels centre de gravité, force, masse, levier ... Ceci permet de distinguer un vocabulaire qui s'appliquant en réalité à toute science qu'on appellera alors lexique métathéoriques et une terminologie qui consacrée à la restriction du monde étudié qu'on dénommera corpus du domaine. Finalement le langage de la science pour produire des énoncés scientifique utilisera un langage métathéorique avec des variables qui prendront des valeurs du corpus. Ainsi le cadre minimaliste pourra produire des énoncés prédictifs du langage qui ne seront pas consistants rapportés à une extension de la restriction au monde, mais corrects sur le domaine couvert.

2.1 L'épistémologie de la mécanique

On entend par ce titre la connaissance et les possibilités de la mécanique. Il est clair que la position géographique, le prestige culturel que possédait Alexandrie rendait possible les fondements d'une épistémologie de la mécanique qui fut soutenue par deux mouvements dialectiques et des méthodes hypothético-déductives que nous détaillerons.

2.1.1 Les origines de la méthode hypothético-déductive : Euclide et Pappus

Si ce qu'on désigne par cette méthode relève de la métathéorie, nous sommes à l'interface ou la frontière avec la restriction du monde étudié qu'on souhaite modéliser et le langage de la science. On va introduire les termes du corpus, qu'il a fallu nécessairement créer, étalonner, modifier. Si pour certains cela va de soi, c'est une sélection naturelle impitoyable, qui utilise voire connaît les notions de l'impétus, du phlogistique ou du calorique aujourd'hui ? On verra aussi que certains mots restent dans l'ombre d'une

théorie avant d'être mis en lumière par d'autres expériences. L'arkhétonique est dans ce cas fondée sur un système formel SF et un ensemble de déductions $D = (D_i)$ par une théorie déductive TD.

Le système formel SF Euclide donnera le premier, dans son livre XI sur la géométrie des solides des définitions de base de la mécanique.

Définition 3 (Solide (Euclide)). *Un solide est ce qui possède une longueur, une largeur et une profondeur.*

Définition 4 (Surface (Euclide)). *L'extrémité d'un solide est une surface.*

On précisera qu'il définit également la notion d'angle solide. A cette période, Apollonius écrivit un traité en six volumes sur les coniques considéré aujourd'hui comme perdu mais signalé comme aussi important que les Éléments d'Euclide. Néanmoins Pappus consolidera les résultats dans un autre traité. Après avoir brièvement montré les origines euclidienne, qu'Archimède reprendra de manière plus féconde, montrons les deux méthodes hypothético-déductives suivant Pappus : « Il existe deux méthodes dans une théorie hypothético-déductive pour démontrer un énoncé : La première est la méthode d'exposition Aristotélicienne et Euclidienne, consistant à partir des principes et à en déduire les conséquences de façon démonstratives. La seconde méthode consiste à partir de ce que l'on veut démontrer et remonter la chaîne des causes jusqu'à aboutir à un principe. » [3] On appellera D_S et D_A les déductions procédant respectivement par synthèse et analyse.

Synthèse : D_S Les éléments d'Euclide restent depuis leur création un modèle de mise en place arkhétonique sous la forme d'une théorie hypothético-déductive. Déployer un raisonnement à partir de ce qui est donné pour en dériver des théorèmes permet de figurer une méthode synthétique de la découverte.

L'analyse de Pappus (D_P) Dans « Trésors de l'analyse », Pappus qui vécut entre le quatrième et le troisième siècle avt.J. — C. exposa une méthode inverse de celle présentée dans les éléments d'Euclide qu'il appela analyse. Pappus y laissa entendre que si Euclide présentait ses résultats sous forme synthétique, il détenait une méthode plus ou moins secrète qui consistait « en partant de ce que l'on cherche - on fait comme si cela était admis - et passant par ses conséquences nécessaires, aboutit à ce qui est admis dans la synthèse ». [4]

Si l'auteur n'évoqua pas directement la notion bien connu des informaticiens de chaînage arrière, il utilisa les termes de « à reculons » pour expliquer sa démarche. L'analyse est utilisée de façon courante en mathématique, elle permet de démontrer une proposition fausse par un contre-exemple. Prenons

un exemple trivial comme le cas du nombre de Mersenne $M_{11} = 2^{11} - 1 = 2047$ qui n'est pas un nombre premier, car il est divisible par 23 et 89.

1. $e_0 = "M \text{ est un nombre premier}"$,
2. $e_1 = "\nexists n \in \{2, \dots, 45\} | M_{11} \cong n(0)"$,
3. $e_2 = "M_{11} = 23 \times 89"$,
4. $e_3 = "e_0 \text{ est fausse}"$,
5. $e_4 = "M_{11} \text{ n'est pas un nombre premier}"$.

Pappus distingua deux sortes de raisonnements analytiques, dans le premier cas « on cherche ce qu'il est demandé de trouver » [4], c'est « l'analyse problématique, dans le second cas on suppose que ce que l'on désire établir est connu, puis on parcourt ses diverses conséquences successives dans l'ordre, en faisant comme si elles étaient vraies jusqu'à aboutir à quelque chose d'admis » [4].

La méthode d'exhaustion et de réduction par l'absurde initialement développée par Eudoxe, améliorée par Archimède représentait une analyse problématique. Nous la retrouverons un peu plus loin. Mais est-ce là une représentation du trésor évoqué par Pappus, ne peut-on pas envisager une véritable méthode sur cette base pour construire un système formel ?

La méthode (M) En soi la méthode pourrait être définie par un ensemble de procédures pour produire quelque chose de précis. Cette chose s'en suivra juste ou fausse suivant qu'on applique scrupuleusement la dite méthode. En théorie de la connaissance cela renverra à la détermination de procédures pour la production d'énoncés vrais. Néanmoins il y a une ambiguïté que nous nous proposons d'élucider. Lorsque Archimède publia ses « Méthodes » qu'il destina en premier lieu à Ératosthène, il présenta le texte sous la forme d'une méthode d'investigation où il compila des lemmes et théorèmes. Ce qu'on entendait véritablement par arkhéctonique se retrouvait tout compte fait dans « De l'équilibre des figures planes ». Quelle est alors la place de la méthode ? Est-elle la réalisation d'un système formel ou bien l'élaboration de dérivations hypothético-déductives qui s'apparente au final à des jugements bivalents sur des énoncés du système ?

Sans aucun doute elles sont toutes les deux les lieux d'une méthode qui s'exprime de manière différente : dans le premier cas il s'agit d'une dialectique formelle, dans le second cas d'une méthode hypothético-déductive (analyse ou synthèse).

Implications relatives à la relation entre analyse et synthèse

Nous allons maintenant distinguer les méthodes analytiques et synthétiques pour un système formel donné par le schéma ci-dessous, où e_0 représente ce qu'on cherche, et e_n représente ce qui est admis. Pour $i, j \in \mathbb{N}$, nous construisons le symbole de dérivation $\vdash_i^j$ entre deux énoncés qui à priori

peut-être de différents types : $\Leftrightarrow$ ou $\Rightarrow$ ad-minima en logique classique. Voici comment formuler les raisonnements.

1. Raisonnement analytique :

$$(e_0) \vdash_1^1 (e_1^1) \vdash_2^1 (e_2^1) \dots \vdash_{n-1}^1 (e_{n-1}^1) \vdash_n^1 (e_n).$$

2. Raisonnement synthétique :

$$(e_n) \vdash_1^2 (e_1^2) \vdash_2^2 (e_2^2) \dots \vdash_{m-1}^2 (e_{m-1}^2) \vdash_m^2 (e_0).$$

Étant donné que la dérivation peut-être de plusieurs natures, si on suppose le cas le plus simple où $\vdash_i^j$ représenterait le connecteur logique $\Leftrightarrow$ pour tout couple (i, j) , alors le raisonnement analytique deviendrait l'exact réciproque du raisonnement synthétique. Si bien qu'on pourrait partir de l'analytique et présenter le résultat synthétique en suivant un mécanisme inverse des dérivations et énoncés produits, ce qui est toujours plus élégant (dans ce cas $n = m$).

Maintenant supposons que $\vdash_i^j$ soit le connecteur $\Rightarrow$ pour tout couple (i, j) . La chaîne analytique se réduit alors à $e_0 \Rightarrow e_n$, et, là où le statut admis de e_n suffisait dans le cas de l'équivalence, sous l'implication seule le sort de la méthode dépend entièrement de la valeur de vérité que prend le terme de la chaîne.

- Si e_n se révèle vrai, alors $e_0 \Rightarrow e_n$ avec e_n admis n'apprend rien sur e_0 : en conclure e_0 reviendrait à affirmer le conséquent. L'analyse est ici stérile pour la preuve positive. Pour en tirer une synthèse il faut un supplément, à savoir vérifier que chaque pas est réversible, autrement dit relever chaque $\Rightarrow$ au rang de $\Leftrightarrow$, ce qui nous ramène au premier cas. C'est précisément la discipline des géomètres grecs, qui ne tinrent jamais l'analyse pour une démonstration et la faisaient toujours suivre d'une synthèse remontant la chaîne.
- Si e_n se révèle faux, le *modus tollens* donne immédiatement $\overline{e_n} \Rightarrow \overline{e_0}$, donc e_0 est faux. La réfutation, elle, ne réclame aucune réversibilité : l'implication simple y suffit.

On dégage ainsi l'asymétrie fondamentale : sous le seul régime de l'implication, l'analyse ne démontre pas mais réfute. C'est pourquoi la même méthode analytique sert à établir un contre-exemple — notre cas de Mersenne en est l'illustration élémentaire : de « M est premier » on tire « M n'admet pas de diviseur propre », on exhibe un diviseur (e_n faux), et l'on conclut. C'est aussi le ressort de l'« analyse problématique » de Pappus et de la méthode d'exhaustion d'Eudoxe perfectionnée par Archimède : supposer acquis ce que l'on cherche, en parcourir les conséquences jusqu'à buter sur l'absurde, puis conclure par *reductio*. La réversibilité n'y est jamais requise, puisque le terme de la chaîne est une fausseté.

On retrouve une trace de cette dissymétrie en théorie des probabilités, où l'approche classique et l'approche bayésienne ne font pas coïncider une probabilité et sa probabilité inverse : le passage de l'une à l'autre exige une information supplémentaire — la formule de Bayes —, de même que le pas-

sage de l'analyse à la synthèse exigeait la réversibilité des pas.

Avant de considérer le cas général d'un jugement de ce type pour lequel on appliquerait une méthode de jugement de type hégélienne, centrons notre intérêt sur une classe de jugement particulière : les jugements intra-énoncé atomique.

Les énoncés atomiques L'élucidation d'une méthode pour classer davantage que pour porter un jugement bivalent sur des énoncés atomiques passionna les philosophes : Leibniz, Hume et Kant en particulier. Nous précisons que classer un jugement relatif à un énoncé en vertu de la relation existant entre le sujet et le prédicat soutient une logique des méthodes. Bien entendu on pense ici à la distinction entre « jugement analytique » et « jugement synthétique » telle qu'a pu les définir Kant : « Ainsi les jugements (les affirmatifs) sont analytiques quand la liaison du prédicat au sujet y est pensée par l'identité, mais on doit appeler jugements synthétiques ceux en qui cette liaison est pensée sans identité ».

Au XX^e siècle dans un article resté fort célèbre, Quine écrira que cette distinction est dogmatique. Le seul véritable type d'énoncé analytique détectable serait selon lui celui où la composante factuelle serait nulle, en dehors de ce cas la distinction serait impossible à établir. On observera au passage que Quine définit deux composantes pour tout énoncé : les faits et significations. Cela bien entendu conforte la modélisation de la vérité entropique telle qu'on la définit dans *Une vérité entropique* [?], isolant la composante liée à la probabilité de l'événement et son corollaire entropique. L'idée de fait reprise par Quine à Kant pouvant aisément se représenter par l'idée d'un événement de probabilité unitaire et se généraliser à la notion d'événement au sens complet du terme. Mais cette application de la vérité entropique suggère aussi comment passer de la formulation d'un éventuel jugement analytique à un jugement synthétique par des modifications sur les compositions des domaines et co-domaines des relations de correspondance en jeu.

Ceci surenchérissant l'amalgame démontré par Quine et mettant en évidence le jeu entre méthode de formalisation et jugement qu'on peut établir au niveau atomique. Pour terminer autour de cette idée, la logique bivalente ne paraît adaptée qu'à un nombre de cas limités, l'adoption de la vérité entropique permettant de coller davantage à la réalité, mais éloignant la distinction claire et franche entre énoncés analytiques et synthétiques. La prise en compte de la nécessité d'établir des jugements bivalents dans certaines pratiques comme la mécanique impose de redéfinir la méthode formelle. C'est l'enjeu de la classification Kantienne qui devrait néanmoins nous faire relativiser la validité des jugements analytiques en regard du système formel qui sert d'interface avec le monde réel, formant une dimension pragmatique à la méthode.

La construction d'un système formel sous l'angle pragmatique

Si cet ouvrage dans le domaine mécanique fut principalement l'œuvre d'Archimède de Syracuse, on peut néanmoins se demander s'il ne s'agit pas là du véritable trésor d'Euclide ? Nous présenterons dans le dernier chapitre des conséquences philosophiques tirées des nouveaux résultats présentés qui auront en partie pour sujet une remise à plat de la distinction analytique-synthétique.

Toutefois la mécanique en tant que confrontation au réel doit être appréhendée de manière pragmatique avant une élucidation complète au niveau épistémologique.

Quine reprenait volontiers le mot de Neurath : « Nous sommes comme des marins sur un bateau en pleine mer qui prend l'eau ». La nécessité de prendre en compte un cadre formel pour procéder à des jugements analytiques à l'intérieur de ce domaine sera l'objectif du premier mouvement dialectique : échafauder ou améliorer un modèle existant sur le modèle Euclidien des « Éléments ».

La seconde dialectique à laquelle nous assignerons le rôle de jugement critique se fera sur la prise en compte de la théorie (Méthode formelle et dérivations déductives) et le verdict rendu par le tribunal de la réalité, l'épreuve des faits constituant toujours les meilleures preuves pour une science empirique. Elle obéira à la méthode de la dialectique Hégélienne qui portera un jugement sur l'ensemble de la théorie et en différera en ne sur-valorisant pas la raison qu'on mettrait dans la nature, feront que cette dialectique confronte la raison par rapport au réel pour en fin de compte bâtir un couple SF/TD qui produiront des énoncés interprétés dans le monde réel. Voici le schéma de base de la dialectique hégélienne :

$$A \wedge \overline{A} \vdash S.$$

Avant de formaliser ce double mouvement nous souhaitons présenter l'œuvre d'Archimède de Syracuse qui témoigne mieux que toute autre théorie de cette organisation de la pensée en mécanique pragmatique.

2.1.2 L'œuvre d'Archimède

“Donnez-moi un point d'appui et je mouvrai la terre”.

Archimède de Syracuse.

Archimède naquit en 287 avt.J. – C., son père fut astronome et sa famille était liée avec celle du roi Hiéron II, dont il se trouvait être le cousin. Celui-ci lui confia la défense de la ville à une période délicate. Soulignons que la Sicile fut le terrain de la première guerre punique en 264 avt.J. – C. où les romains après avoir battus les carthaginois prirent le contrôle d'une majorité du territoire de l'île. Toutefois Syracuse resta un royaume indépendant, dominé par le tyran Hiéron II qui vécut jusqu'à 92 ans. Lors de la seconde guerre punique menée par Hannibal en 218 avt.J. – C. les troupes romaines

de nouveau victorieuses décidèrent d'étendre leur territoire. Profitant de la mort de Hiéron II et d'un successeur qui désirait s'affranchir des romains en signant un pacte avec Carthage, des troupes romaines conduites par Marcellus parvinrent à prendre Syracuse en 212 avt.J. – C., au cours de cette action Archimède fut assassiné par un soldat romain.

Ingénieur et mathématicien Archimède reste encore aujourd'hui comme l'un des plus grands physiciens de tous les temps, on le considère comme l'inventeur de la statique. Si ses travaux furent en grande partie oubliés jusqu'au XVII^e siècle, il inspira Pascal, Galilée entre autres, cette période coïncidant avec une nouvelle prise en considération de son œuvre. Il dut sa notoriété autant par ses constructions et inventions techniques prestigieuses que par ses apports théoriques. On le qualifie en particulier de fondateur de la mécanique rationnelle. Quoique fidèle à Syracuse il bénéficia d'un étroit contact avec la culture d'Alexandrie où il se rendit faire ses études, qui lui permit de connaître et de perfectionner l'état de l'art en mécanique et mathématique, mais aussi faire diffuser et faire rayonner son savoir.

Sa pratique était très étendue, tout d'abord on peut citer qu'il rapporta la vis sans fin d'Égypte qui permettait de soutirer de l'eau du sol, travailla sur cet outil. Cette machine hydraulique qui porte aujourd'hui le nom de vis d'Archimède (cf. figure 7) fut décrite par Philon de Byzance et Vitruve.

Archimède travailla aussi sur les systèmes de poulies, de leviers sur lesquels il passait pour un maître, ainsi que sur les engrenages. On lui doit ainsi la construction d'un planétarium reproduisant les mouvements des planètes telles qu'ils étaient alors suggérés par les astronomes.

Concernant la mise à sec et le mouillage des bateaux, il inventa une machine que Plutarque nomma « polypastion », qui dispensait le travail de halage des ouvriers. On rapporta que grâce à cette machine composée de moufle de poulies il pouvait tirer seul un navire chargé de marchandises. La démonstration aurait eu un tel succès que le tyran Hérion II s'essaya avec réussite à tracter un trois mats destiné au roi Ptolémée d'Égypte [1]. Ces expériences furent d'ailleurs considérées comme des réfutations de la théorie Aristotélécienne de la force, ce dernier ayant affirmé que la force ne pouvait se décomposer en-dessous d'une certaine limite et qu'en aucun cas « un seul homme continuât à mouvoir un vaisseau déplacé habituellement par une équipe de plusieurs haleurs ». [1]

Son apport à l'ingénierie militaire fut également important et décisif, plusieurs auteurs rapportant son usage précis des catapultes, et d'autres armes. Nous aborderons plus précisément la problématique de jaugeage impliquée par l'utilisation des catapultes dans un prochain paragraphe.

L'œuvre théorique Voici un tableau reprenant les publications (non perdues) d'Archimède. Il rédigea ses travaux sur des rouleaux de papyrus en Dorien de Syracuse, ses écrits demeurèrent archivés à la bibliothèque d'Alexandrie, avant d'être dispersés suite au ravage du pillage des armées de César en 57 av.J. – C., période durant laquelle la bibliothèque fut entièrement brûlée. Il composa le premier traité axiomatique de la mécanique, appelé Méthode

Titre	Ordre Chrono.	Livre ⁵
De la sphère et du cylindre (I)	n°4	Tome I
De la sphère et du cylindre (II)	n°5	Tome I
De la mesure du cercle	n°10	Tome I
De la mesure du cercle	n°7	Tome I
Des spirales	n°6	Tome II
De l'équilibre des figures planes (I)	n°1	Tome II
De l'équilibre des figures planes (II)	n°3	Tome II
L'arénaire	n°11	Tome II
La quadrature de la parabole	n°2	Tome II
Des corps flottants (I)	n°8	Tome III
Des corps flottants (II)	n°9	Tome III
Stomachion		Tome III
La méthode		Tome III
Le livre des lemmes	n°12	Tome III
Le problème des bœufs		Tome III

TABLE 1 – Publications d'Archimède.

de la statique ou « De l'équilibre des figures planes ». Illustrons ce qu'on peut y lire comme axiomes et propositions déduites.

Postulat 1 (Postulat n°1). « *Des masses égales suspendues à égales distances d'un pivot sont en équilibre* ».

Postulat 2 (Postulat n°4). « *Similairement, si quelque chose est retiré d'une des masses, elles ne sauraient rester en équilibre plus longtemps, mais seulement être inclinées vers la masse qui n'a pas été modifiée* ».

D'où il en déduit la proposition :

Proposition 1 (Proposition n°2). « *Quand des corps suspendus à égales distances sont en équilibre, les masses des corps sont égales entre elles.* »

Il mentionna en particulier dans la démonstration l'utilisation d'une preuve reposant sur la « *reductio ad absurdum* ». Ce principe largement utilisé par Archimède se plaçait en général en seconde partie d'une méthode dite d'exhaustion, principe méthodologique inventé par Eudoxe et amélioré

par Archimède que nous avons déjà introduit. Tandis qu'Eudoxe se contentait d'approcher une valeur par la méthode de compression inférieure, il la conjuguait à une méthode de compression supérieure pour encadrer la même valeur, on parlerait aujourd'hui de construction de suites adjacentes. Ce raisonnement se terminant par l'application d'un raisonnement par l'absurde pour justifier de l'existence de la valeur ou de la représentation recherchée ; en définitive nous pouvons l'interpréter en tant qu'une méthode de raisonnement analytique composée en deux sous parties, il l'utilisera pour encadrer la valeur π dans « De la mesure du cercle ».

Retenons que Chasles lui attribua la paternité de « géométrie de la mesure », avec des calculs d'aires de volumes et de surfaces de coniques plus spécialement. L'interaction entre pratique et théorie fut telle qu'Einstein évoquera « la géométrie pratique » d'Archimède. On rajoutera que les termes de convexité, concavité, plus court chemin entre deux points, quadratures (dont la fameuse quadrature de la parabole) furent définis par le savant de Syracuse. Nous nous proposons de présenter une description du mécanisme de formalisation en s'inspirant de ses travaux.

2.1.3 La dialectique formelle

Formaliser implique de se représenter le monde, l'interpréter pour en tirer des concepts, des définitions, des réifications, des principes. On y déclare alors un ensemble de termes métathéoriques qui sont présents dans toutes les sciences. Nous reprendrons des exemples de ce que nous affirmerons avec la découverte du principe d'Archimède tiré de la mécanique des corps flottants. Puis nous modéliserons un schéma de production d'une méthode formelle en mécanique.

Définition 5 (Métathéorie). *On appelle terme métathéorique des mots d'une théorie de la connaissance indépendants de la sphère du sujet traité par la théorie.*

Termes de la métathéorie d'une arkhéctonique

“Qu'est-ce qu'un mot ? la représentation sonore d'une excitation nerveuse dans les phénomènes”.

F.Nietzsche, *Le Livre du philosophe*.

Concept Dans « Le livre du philosophe », Nietzsche définit ainsi : « Tout concept naît de l'identification de l'identique et du non-identique ». On s'aperçoit immédiatement de la portée de composition néguentropique que nous pouvons attribuer à tout concept. D'un point de vue concret un concept met en relation deux choses, deux figures de la réalité par exemple sous une tournure telle que l'une d'elles puisse s'en déduire de l'autre et

inversement par le passage au concept. Dans le cadre d'une structure infra-algébrique appliquée au langage on retiendra qu'un concept est une mise en relation de correspondance entre deux familles d'éléments définies sur des domaine et co-domaine, le premier domaine pouvant représenter une réalité formalisée en langage naturel ou d'observation et le co-domaine étant une représentation dans un langage formel. Des ensembles d'éléments tombant sous le même concept peuvent alors se déduire l'une de l'autre par des passages au patron canonique. L'avantage est de pouvoir procéder à une réduction entropique de la représentation des familles du domaine. Si en termes de représentation on crée de l'entropie relative à la classe de toutes les familles d'éléments tombant sous le concept, en prédiction par le jeu des relations : méthodes et fonctions au sein du langage formel sur le co-domaine on se retrouve dans une position relativement néguentropique, la sommation des effets menant à une néguentropie relative des familles d'éléments sur une restriction du domaine et quelques fois sur le domaine en général.

En cela la conceptualisation réduit l'entropie par effet de composition, ainsi toute connaissance par l'usage du concept permet de réduire l'entropie. Bien entendu il peut aussi exister de mauvais concepts qui ne permettront pas d'avoir les effets escomptés par le système formel du co-domaine. Il semble peut-être plus naturel de considérer le concept sous la réciproque, les répercussions semblent surtout être au niveau analytique autour de la position de l'entité qui interprète par rapport au monde : interprété si le réel constitue le co-domaine et découvert si le réel constitue le domaine. Des concepts en physique se rencontrent assez peu, car en général dans les sciences on tend à les transformer en définitions conceptuelles que nous allons décrire ci-après, qui marquent un stade plus avancé et une progression structurelle d'une théorie. Notons que nous puissions pas cependant définir une notion de temps au-delà de toutes ses représentations (absolue, bidirectionnel, unidirectionnel, continu, ...) ou d'espaces au sens large. Elle en reste au stade du concept pur.

Le prolongement du concept apparaît dans la définition conceptuelle qui appartient à la classe définatoire, autrement dit de l'ensemble des définitions.

La définition Une définition est une mise en relation de deux énoncés, le premier est relatif à ce que l'on souhaite définir (il peut se réduire à un énoncé atomique, voire à un mot) et le second est un énoncé qui détermine à quoi l'on se réfère. En tant que mise en relation de deux énoncés on déterminera des entropies dont découlera une variation entropique.

Hempel distingua deux types de définitions [7], tout s'abord les définitions qu'il nomma stipulatives qu'on pourrait appeler alias au niveau linguistique, qui assurent une quasi-conservation de l'entropie entre les deux énoncés. Elles symbolisent le degré zéro de l'analytisme, l'équivalent d'une tautologie mais bien utile pour économiser des longueurs dans les démonstrations. Es-

quissons en ce sens une définition d'un stylo plume comme un stylo qui contiendra un réservoir d'encre permettant à celui-ci de percoler dans une plume adaptée à l'écriture sur du papier. On n'apprend rien de plus sur l'objet, et il est utile lorsqu'on souhaite diminuer la longueur des phrases pour faire référence à quelque chose de précis.

Ensuite Hempel évoqua un deuxième type de définition, elle se trouve alors dans le prolongement du concept, elle va plus loin dans le sens où elle pose, codifie l'existence, et nomme le concept. On précisera qu'on peut très bien avoir un concept non défini, pour prendre des cas il suffit de regarder l'émergence des nouveaux mots en physiques, ils n'apparaissent pas en général spontanément, ils étaient dans l'esprit du temps. Ainsi la chimie de Lavoisier va définir la notion d'atome qui fut une idée philosophique déjà abordée par Épicure, Démocrite et Lucrèce ; par ailleurs lorsque Newton postula un temps et un espace absolus, il définit des termes qui dérivèrent dans une certaine mesure de la notion préexistante d'absolu. Néanmoins la richesse de cette définition est palpable, elle se risque dans la logique de la méthode formelle léguant un caractère néguentropique à la représentation du monde et une visée concrète sur le monde interprété par le système formel.

Si Quine écrivit : « En tout état de cause une définition se contente d'enregistrer des synonymie attestée », cela reste un degré zéro de la définition, pour Grothendieck ou Gromov [19] elle doit se révéler l'éclairage d'une construction, elle est une pièce très importante dans une méthode formelle.

Un problème important relatif à la définition est celui de son existence, qu'on retrouve en mathématique. On peut se questionner par exemple si tel objet défini existe ? ou si telle démonstration est juste compte tenu qu'elle ne construit pas l'objet visé, cela implique de concevoir une définition de ce qui est vrai en termes démonstratifs. Cette dernière question agita la sphère mathématique à l'époque du constructivisme, qui donna naissance au courant intuitionniste, pour qui ce qui était vrai pouvait nécessairement se construire. On peut assurément dire que cette époque représenta une réminiscence antique. Le centre de gravité, concept défini par Archimède illustre un passage, ce dernier se posait la question de son existence (dans sa généralité) en référence à des valeurs prises dans certains volumes qui étaient fonction de π . Or π appartenait aux nombres incommensurables dans la représentation numérique du monde grec. Cette problématique l'amena à travailler sur la mesure du cercle : l'enjeu se portant au final sur l'existence ou non d'un centre de gravité pour tous les corps. La détermination de π par la méthode de compression inférieure et supérieure l'autorisa à justifier l'existence de π et d'un centre de gravité pour tout solide.

Définition 6 (Définition). *Une définition est une mise en relation de correspondance entre un élément d'un domaine formalisé d'une arkhéctonique et des éléments d'un co-domaine donné qui représentera une restriction du*

monde réel.

Nous voyons bien qu'Archimède introduisait des termes spéciaux pour reprendre le vocabulaire d'Hempel, mais il sembla aller plus loin qu'une simple volonté de définir, il définit un objet du monde réel interprété, en ce sens il procéda à une choséification particulière qu'on appellera réification pour reprendre le terme de Lukács.

La réification Si nous pouvons définir un concept qui ne représente pas une chose matérielle comme pourrait l'être le concept de sacré, la réification va matérialiser une définition, à fortiori un concept. Au sens strict la définition lukácsienne de la réification : « Le fait qu'un rapport, une relation entre personnes prend le caractère d'une chose » s'inscrit dans la sphère sociologique qu'on opposera alors à l'aliénation qui est une choséification de l'individu résultant d'un rapport de production particulier. Les deux termes s'inscriraient de fait dans une logique de domination sociale. On remarquera qu'on aurait pu remplacer le terme logique par celui de mécanique, au-delà de la symbolique sociale cela nous indique un enjeu plus profond de la réification, qu'on a capacité de porter au-delà du champ sociologique.

Elle s'esquisse en médecine lorsqu'on parle d'une pathologie clinique. La naissance de la biologie moléculaire s'est réalisée avec la réification de la cellule et la détermination d'ensembles microscopiques qui ont pu être choséifiées par l'usage du microscope. Notons que le rapport de domination qu'on pouvait retrouver dans la logique lukácsienne se retrouve, mais il est supporté par la volonté de domination de l'homme dans sa relation avec la nature. Voici quelques termes définis dans la sphère de la mécanique qui apparaissent comme des réifications : la masse, la distance, l'énergie, le point matériel ou la fonction ponctuelle, voire la quantité en mouvement si importante dans l'œuvre de Newton qui représente une chose quelconque animée d'une vitesse. Sous l'angle philosophique on ira jusqu'à postuler qu'une réification peut s'interpréter par une abduction d'un genre particulier, puisqu'elle va introduire l'hypothèse explicative dans la choséification de la matière, et non pas seulement dans le domaine des idées comme l'avait entendu initialement Pierce. On identifie alors une relation entre la pensée et la chose dont la valeur sera la conformité aux éléments du réel prédits ou expliqués.

Définition 7 (Réification). *Une réification est une mise en relation de correspondance entre une définition et un complexe matériel.*

On utilise ici le terme important de complexe pour ne pas tomber dans un isomorphisme entre un objet du réel et un objet réifié, en héritant des propriétés des concepts parents. La force illustre l'ambiguïté de la réalité d'une réification. On ne la retrouve pas dans le monde des sens à un instant donné, même si lorsqu'on s'élance vers le haut, la force de gravité nous rappelle vers

le sol terrestre. Par contre elle se représente par une dynamique (une impression) de choses dans la théorie Newtonienne, elle est associée à une action, qui elle même induit une réaction. Classiquement on la représentera par un vecteur s'appliquant au point dit d'application, orienté en direction et sens, possédant une intensité. Changeons de cadre formel, dans la théorie mécanique des champs la force ne sera plus une réification, elle deviendra une mise en relation de correspondance entre une charge exerçant un champ dans un espace donné et un point matériel de l'espace possédant une capacité suivant le même type de charge, qui définira alors un potentiel.

À partir de cette définition se posera la question de l'existence des réifications ou de leur statut fictif n'est pas le sens premier, en effet les réifications s'inscrivent dans un système formel qui forme une interprétation du monde en relation avec le monde, elles n'ont pas vocation à exister au-delà d'une dimension pragmatique de compréhension du monde. Il devient alors possible d'envisager un monde de réification suivant toutes les modalités de la relation d'une entité au monde, que nous n'aborderons pas ici.

Exemples de formalisation Un aspect central de l'œuvre d'Archimède résida dans les interactions constantes entre les domaines mathématiques et mécaniques. Un très bon exemple serait la notion de centre de gravité qu'on reliera autant à des propriétés physiques qu'à des propriétés purement mathématiques, les aller-retour entre le monde réel et le monde de la représentation mathématique semblent incessants

Une conceptualisation : la jauge Nous nous proposons de montrer un concept mécanique pour jauger une distance en fonction d'un corps simple de masse donnée, ce sera le concept de jauge. S'il n'a pas conduit à une définition, à fortiori une réification, il reste d'un emploi très pratique pour la défense de la ville.

En 213 av.J. – C. lors du siège de Syracuse par la flotte Romaine commandait par Marcellus, se dressa un moyen redoutable de défense qui sauva dans un premier temps la ville. On peut préciser que les troupes Romaines pénétrèrent dans Syracuse dans un second temps en apprenant que les gardes de la ville n'étaient plus effectuées ... Le problème qui nous intéresse ici est d'expliquer comment la ville fut initialement sauvée. On rapporta que la sauvegarde ne fut l'œuvre que d'un seul homme : Archimède de Syracuse [35]. Pour la défense des villes portuaires, l'usage de catapultes était efficace, elles permettaient d'envoyer un bloc de pierre pouvant aller jusqu'à une masse de 250 Kg en direction des navires ennemis qu'on pouvait repérer sur un plan par un quadrillage du théâtre des opérations. Archimède utilisa alors une batterie de catapultes toutes différentes les unes des autres, qui permettaient d'atteindre n'importe quelle position d'une cible, et qui n'offrait aux navires de la flotte romaine aucune solution de repli efficace. Il maîtrisait

donc les variables pour envoyer un projectile sur une cible donnée 19 siècles avant la découverte de la cinématique par Galilée, puis celle de la dynamique par Newton. Bien entendu, le savant de Syracuse utilisait une heuristique en associant de manière proportionnelle la force de propulsion d'une catapulte et la distance de la cible à atteindre, ce facteur était le volume de la catapulte, équivalent à sa masse vu qu'elles étaient constituées d'une même nature. D'autre part l'aspect de la dynamique s'identifiant à une trajectoire parabolique (nous savons qu'Archimède maîtrisait largement le domaine des coniques), la précision des tirs peut s'expliquer.

Voilà ce qu'on peut appeler la résolution pratique d'un problème, dont-on n'a pas une représentation fondamentale (dans le sens d'une systématisation formelle indépendante des objets sur lequel elle se pose) par l'usage d'une jauge. Bien qu'à ce stade il ne soit pas encore question de méthodes formalisée au sens plein du terme, on peut toutefois parler d'heuristique ou méthode semi-formalisée pour la jauge présentée, qui fonctionne, possède un sens très pratique. Voyons un cas plus complet de construction d'une méthode formelle avec la poussée d'Archimède.

Une formalisation plus stricte : la poussée d'Archimède Vitruve nous relate qu'Archimède s'écria « Eurêka ! Eurêka ! » lorsque plongé dans son bain, il eut l'intuition d'un principe de poussée qu'il exposa par la suite dans « Les corps flottants » [41]. Peut-on croire qu'il s'agisse là d'un dévoilement sans ombre d'une vérité cachée, n'est-ce pas davantage l'articulation épistémologique entre l'intuition, la mise en place du système formel et des applications qui viendront vérifier l'archéctonique.

Voici comment on pourrait imaginer le cheminement du principe de la poussée d'Archimède, en partant d'une expérience de pensée du savant sur une question soulevée par Hiéron II.

1. « [...] ce prince avait fait remettre à un orfèvre une certaine quantité d'or pour en faire une couronne, mais l'artiste infidèle retint une partie de cet or, et lui substitua un égal poids d'argent. On remarqua la fraude, et comme on ne voulait pas gâter l'ouvrage qui était d'un travail exquis, Archimède fut consulté sur les moyens de découvrir la quantité d'argent substituée à l'or [...] » [10].
2. L'intuition heuristique fut-elle apocryphe nous la mentionnons : « [...] Il y songea et voilà dit-on qu'étant dans son bain, la solution du problème se présenta à lui d'un coup » [10]. Formulons cette intuition en un langage moderne suivant notre interprétation :
 - (a) L'or est d'une densité ρ_o supérieure à celle de l'argent ρ_a , elle pèse donc plus pour une même unité de volume.
 - (b) On utilise un récipient dont le volume de liquide est V et le niveau d'eau sans corps plongé est L . En plongeant un solide dans le récipient, s'il est complètement immergé, il exercera une pression

sur le liquide qui vaudra son poids, le niveau du liquide L' aura augmenté de telle sorte que le nouveau volume défini sera égal à celui du liquide plus celui du solide. On déduit alors que la densité du volume d'eau située entre les niveaux L et L' vaudra la masse volumique du solide ρ .

- (c) Expérience : on plonge une quantité d'or de masse m_o ; on remarque que le niveau d'eau du récipient s'est déplacé de telle sorte que $L_o > L$, soit le volume d'eau déplacé par la quantité d'or plongée est $\Delta V_o = V_o - V$, la densité du volume d'eau déplacé valant $\rho_o = \frac{m_o}{\Delta V_o}$.
- (d) Si on plonge une quantité de d'or et d'argent de masse $m_{o\wedge a} = m_o$ alors elle est associée à un volume de quantité d'or et d'argent immergées, qui font que le volume d'eau déplacé : $\Delta V_{o\wedge a} > \Delta V_o$, soit $L_{o\wedge a} > L_o$.
- (e) En plongeant la couronne réalisée par l'artiste, de masse m_c , on constate que le niveau d'eau dans le récipient devient L_c qui correspond à un volume d'eau déplacé de $\Delta V_c > \Delta V_o$. On peut donc supposer que la couronne n'est pas entièrement réalisée en or.
- (f) Pour calculer le préjudice Archimède eut recours à l'hypothèse que la couronne était constituée d'une quantité d'or de masse m_o et d'argent de masse m_a de telle sorte que $m_o + m_a = m_c$. Ensuite il calcula le volume d'eau déplacé par une masse d'argent équivalente à celle de la couronne m_c , qu'on appelle $\Delta V_a = V_a - F$.
- (g) Soient ρ_c, ρ_o, ρ_a les densités de la couronne, des quantités d'or et d'argent rapportées à la couronne. Alors :

$$\begin{aligned}
\rho_c &= \rho_o + \rho_a \\
&= \frac{m_c}{\Delta V_c} \\
&= \frac{m_o}{\Delta V_c} + \frac{m_a}{\Delta V_c} \\
&= \frac{m_o}{\Delta V_o} \times \frac{\Delta V_o}{\Delta V_c} + \frac{m_a}{\Delta V_a} \times \frac{\Delta V_a}{\Delta V_c} \\
\Leftrightarrow m_c &= \rho_o \times (V_o - V_c + V_c - V) + \rho_a \times (V_a - V_c + V_c - V) \\
&= \rho_o \times (V_o - V_c) + \rho_a \times (V_a - V_c) + \Delta V_c \times \rho_c \\
&= \rho_o \times (V_o - V_c) + \rho_a \times (V_a - V_c) + m_c \\
\text{Soit } \rho_o \times (V_o - V_c) + \rho_a \times (V_a - V_c) &= 0 \\
\Leftrightarrow \frac{\rho_o}{\rho_a} &= \frac{V_a - V_c}{V_c - V_o}.
\end{aligned}$$

Comme ces composants volumiques appartiennent à un même volume composé, alors on peut passer aux ratios des masses :

- (h) On obtient le coefficient de proportionnalité des quantités d'or et d'argent de la couronne :

$$\boxed{\frac{m_o}{m_a} = \frac{V_a - V_c}{V_c - V_o}} \quad (1)$$

On précisera qu'expérimenter cette méthode est presque impossible, ce qui suggère qu'elle ne puisse correspondre qu'à une intuition qui permit à Archimède de procéder à une expérience pour vérifier à la fois le principe qu'il en déduit et ce qu'on lui demandait.

Principe 1 (Principe d'Archimède [2]). « *Les grandeurs plus lourdes qu'un liquide (sc. de même volume), abandonnées dans ce liquide, descendent vers le bas jusqu'à ce qu'elles aient atteint le fond et elles seront allégées dans le liquide du poids du liquide contenu dans un volume égal au volume de la grandeur solide* ».

Bien entendu nous avons montré cet exemple pour symboliser la formalisation, avec ses différentes séquences. Au-delà en arrière-plan nous décelons la présence d'un concept de jauge : celui qui permet de jauger le ratio des masses d'un corps composé de deux substances distinctes.

Interprétation L'idée que la densité est le concept le plus matérialisable est confirmée par le commentaire de Rival « la masse volumique d'un corps est le rapport de sa masse à son volume et sa densité est le rapport de sa masse volumique à celle de l'eau, prise à une température standard de 4°C ». La mise en relation de la densité au poids, et donc à la quantité de matière relative est immédiate. Voici alors l'expression du principe d'Archimède telle qu'on peut la trouver à date :

Principe 2 (Principe d'Archimède). *Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume déplacé, cette force est appelée pression d'Archimède.*

qu'on traduira en termes vectorielles par :

$$\vec{P}_A = -M_t \times \vec{g} = -\rho \times V \times \vec{g}.$$

2.2 De la synthèse Copernicienne à la mesure

“L'habitude est de dire que la Mécanique moderne est née le jour où la méthode expérimentale détrôna les méthodes à priori des Scholastiques”.

P.Painlevé, *Les axiomes de la mécanique*.

Au XVII^e siècle il ne fallait pas bon être astronome ou philosophe et s'opposer aux doctrines officielles de l'église, traditionnelle ou réformée. On brûla Bruno sur la place publique de Rome en 1600, les hérétiques étaient excommuniés, ou torturés, voire purifiés par le feu. La religion s'appuyait sur les théories de *La physique* d'Aristote et l'astronomie telle que Ptolémée la professa dans *L'Almageste*⁶. On ne pouvait retenir que deux types de mouvements pour les astres à la lecture d'Aristote, les mouvements rectiligne et circulaire. Si la théorie de Ptolémée proposait la théorie des épicycles, son système restait fondamentalement géocentrique. Certes nous avons là des théories empreintes d'anthropomorphisme, mais surtout elles soutenaient l'ordre de l'église en des temps troublés.

Malgré tout l'inflexion de termes usés devait faire face à l'émergence d'observations, d'expériences complétées par la construction d'instruments techniques plus puissants, la mesure émergeait en tant que terme métathéorique. La catégorie Aristotélicienne de la quantité peut se représenter comme l'ancêtre de la mesure et formera une catégorie privilégiée pour remettre en cause les théories de l'a priori. Elle s'en distingue car elle peut s'appuyer sur d'autres catégories comme la qualité : la longueur d'un segment de droite donnera une quantité différente suivant la qualité de la surface sur lequel on le mesure. En tant que telle la mesure un changement de paradigme métathéorique dans les sciences.

Définition 8 (Une mesure). *Une mesure est un procédé de quantification.*

Elle se compose donc de trois termes :

1. un procédé qui s'apparente à des règles formelles pour la prise de mesure,
2. une quantification qui nécessite un domaine de définition,
3. une unité qui sera exprimée par les dimensions de la mesure.

2.2.1 Copernic (1473-1543)

Le chanoine polonais proposa un nouveau système héliocentrique où la terre était toujours dans un mouvement de rotation circulaire autour du soleil, tandis qu'elle possédait un mouvement de rotation sur elle-même pour expliquer les alternances du jour et de la nuit. Si son œuvre majeure : « *De Revolutionibus* »⁷ parut en 1543, après sa mort, sa correspondance permit de voir qu'il avait formulé depuis longtemps des idées déjà communiquées à des amis par son texte *Commentariolus* [27]. Néanmoins « *De Revolutionibus* » lui offre l'opportunité d'interroger dans sa préface la plus haute

6. Ptolémée définit alors un paradigme qui dura quatorze siècles, notons qu'il inventa la trigonométrie sphérique donc à fortiori la trigonométrie, qu'il posa de nouvelles méthodes de calcul, sa théorie des épicycles restant relativement complexe.

7. Le titre complet *De Revolutionibus orbium coelestium* qu'on traduit par « De la révolution des orbes célestes ».

autorité de l'église : le pape Paul III. Constatons que la théorie de Bourdieu se vérifie aussi en sociologie des sciences, Copernic voua sa vie à l'obscurité céleste, il appartenait au corps ecclésiastique et dans le même temps il était astronome. On savait qu'il lui préexistait des précurseurs dans les théories héliocentriques, ainsi Aristarque de Samos qui vécut à Alexandrie, même si ce dernier jugé fou s'attira les foudres des autorités et en définitive du quitter sa ville. Le chanoine et savant polonais reste reconnu aujourd'hui non seulement comme l'inventeur du système héliocentrique mais comme son découvreur de fait. Sans doute est-ce là l'une des plus grandes révolutions symboliques : la terre et à fortiori l'homme n'étaient plus au centre de l'univers. Nous percevons à découvert et a posteriori les prémisses d'une nouvelle mécanique des astres qui conduira à la mécanique analytique de Lagrange et la mécanique céleste de Laplace. On retrouvera sur la figure 10 le système héliocentrique de Copernic tel que put le représenter Doppelmayr en 1742⁸.

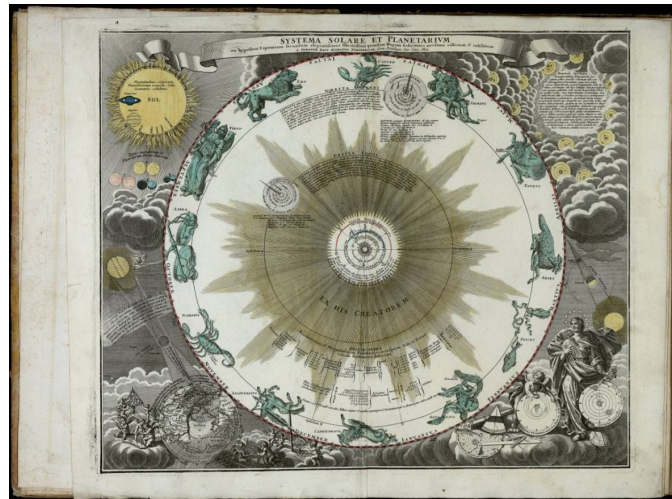


FIGURE 10 – Représentation du monde Copernic par Doppelmaier (1742) - source Wikipédia.

2.2.2 Tycho Brahé (1546-1604)

Astronome danois, il récolta d'énormes quantités de mesures qu'il compila dans son système théorique. Malgré leur réalisation à l'œil nu, elles étaient si précises et complètes qu'on utilisa ses données plusieurs siècles après sa mort. Il ne croyait pas au système de Copernic, lui préférant celui de Ptolémée, tout en trouvant la théorie des épicycles trop complexe pour s'appliquer. Il s'assura les services de Kepler comme assistant, qui fut chargé après la mort de Brahé de constituer un recueil des données prises

8. Atlas coelestis. Systema solare et planetarium, Ioh. Gabriele Doppelmaier.

publiées dans *Les tables Rodolphines* (Brahé fut de son vivant astronome du roi Rodolphe).

2.2.3 Kepler (1561-1630)

Kepler possédait une formation de mathématicien. Il s'intéressa à beaucoup de sujets, en particulier chercha à concevoir un univers suivant des assemblages en forme de polyèdres ou fonda l'optique géométrique par son œuvre *Dioptrae* [12]. Il était alors dans la capacité d'expliquer le fonctionnement de la lunette de Galilée [12] alors que ce dernier se « contentait » de la fameuse preuve heuristique lorsqu'il s'exclamait : « Voyez-donc ! ».

Les talents de Kepler lui permirent de retraiter l'ensemble des données de Brahé dans un système héliocentrique. Il formula alors une nouvelle théorie des orbes en étudiant celle de la Terre, puis de Mars (qui fut décisive pour réfuter l'hypothèse d'un mouvement circulaire soutenue par Copernic) et de Mercure. Ses calculs qui aboutirent à ce qu'on appella les trois lois de Kepler qu'on peut retrouver *Astronomia nova* (1609) et *Harmonices Mundi* (1618), où il montra que les orbes des planètes décrivent des ellipses autour du soleil. Voici ce qu'Einstein rapportera de cette nouvelle théorie : « Les lois de Kepler apportent une réponse complète à la question de savoir comment les planètes tournent autour du soleil (trajectoires elliptiques, égalité des surfaces balayées en temps égaux, relation entre la dimension du grand axe et la période de révolution). Mais ces lois ne satisfont pas à l'exigence de causalité. Ce sont trois lois indépendantes les unes des autres du point de vue logique, ne révélant aucune cohérence interne » [15].

On rapportera qu'en 1596 Kepler eut l'idée novatrice de représenter les planètes par un couple où seraient associées la planète et sa masse qu'il définit comme le produit de la densité par le volume. Cette pondération ne trouvera un écho que plusieurs siècles plus tard dans les représentations de la théorie du potentiel par Laplace. Kepler vécut à la même époque que Galilée avec lequel il entretenait une relation épistolaire, à l'époque on peut préciser que la durée de transport d'un courrier entre Florence et Prague prenait une semaine.

2.2.4 Galilée (1564-1642)

Si Galilée était mathématicien de formation comme Kepler, il fut aussi un grand astronome et à ce titre pouvait comprendre les théories révolutionnaires de Copernic et Kepler. En 1597 il mentionna déjà à Kepler son soutien pour la conception héliocentrique de Copernic. En revanche il ne suivit pas les résultats de Kepler sur les orbes elliptiques des planètes, sans le contredire. Galilée fit d'importantes découvertes en astronomie dont on pourra citer la découverte des quatre astres de Jupiter ou plus spécialement celle des phases de Vénus qui le confortèrent dans le bien fondé des idées de Copernic. Et ce

bien que les idées du savant polonais furent interdites dès 1516. Galilée perfectionna aussi du matériel instrumental comme la lunette inventée par les hollandais, bien qu'on puisse considérer qu'il fit d'une longue vue une véritable lunette astronomique permettant de voir des objets invisibles à l'œil nu. L'instrument de Galilée (1610) pouvait avoir un intérêt pour ses recherches tout autant que pour la société : à titre d'exemple on pouvait voir arriver les bateaux à plus de deux kilomètres des terres Vénitiennes. Son appui aux thèses de Copernic qu'il afficha dans *Le dialogue sur les deux systèmes du monde* le conduisit à être jugé en 1632-1633 par le tribunal du Saint-Office à Rome pour hérésie. Les thèses de Copernic censurées et fermement réprimées par l'église l'obligèrent à abjurer sous la menace de la torture. Condamné à être emprisonné dans la prison du Saint-Office, son livre fut alors interdit. Il vit sa peine commuée par le pape à vivre en résidence surveillée, tout d'abord sans recevoir de visites, puis avec un assouplissement par la suite [31]. Il passa les dix dernières années de sa vie malgré la maladie emprisonné en résidence surveillée. Des analyses de ces événements tragiques nous montrent qu'au mépris de ses résultats, démonstrations et preuves, on lui reprocha au cours du procès d'avoir été un traître ou encore un diable [5]. Bien longtemps après le Concile Vatican II défendit Galilée en reconnaissant que les chrétiens n'avaient pas alors à s'immiscer dans le domaine scientifique tandis qu'en 1992 le pape Jean-Paul II, lors des académies pontificales des sciences reconnut les erreurs de certains théologiens dans l'affaire Galilée. Malgré le fait d'être en résidence surveillée, Galilée réussit à soumettre à son éditeur un travail qui deviendra *Le discours sur deux sciences nouvelles* aussi appelé le « Discours », où il critiqua la théorie Aristotélicienne du mouvement des corps pesant et proposa une nouvelle mécanique. Galilée inventa la cinématique ou science du mouvement indépendamment des causes qui lui ont donné naissance. Son premier ouvrage sur le mouvement fut cependant écrit alors qu'il se trouvait en poste à l'université de Pise en 1590-1591. Il avait pour titre « De motu » dans lequel il reprit la théorie de l'impétus de Buridan. À la lecture d'Archimède il se rendit compte que l'action à prendre en compte lors d'un mouvement de chute libre était le poids de l'objet pour lequel il fallait tenir compte de la résistance du milieu qui s'opposait au mouvement (qu'on ne pourrait soustraire que dans le vide), qui représentait l'effet de la poussée d'Archimède. Plus tard dans le *Dialogue sur les deux systèmes du monde* il fera intervenir un protagoniste nommé Salviati pour poser le principe de la chute libre en ces termes : « Les variations de vitesse qu'on observe entre les mobiles de poids spécifiques différents n'ont pas pour cause ces poids spécifiques mais dépendent de facteurs externes, et notamment la résistance du milieu, en sorte que celle-ci supprimée, tous tomberaient à la même vitesse » [18]. La théorie de Galilée juste sur le plan mathématique nécessita une preuve

expérimentale qui fut apportée en 1971 lorsque David Scott⁹ en mission sur la lune fit l'expérience de lâcher simultanément un marteau et une plume qui arrivèrent dans le même temps sur le sol lunaire. La figure 11 représente une page de travail du savant sur les trajectoires de chute libre avec une vitesse initiale¹⁰, qu'il communiqua à partir de 1604.

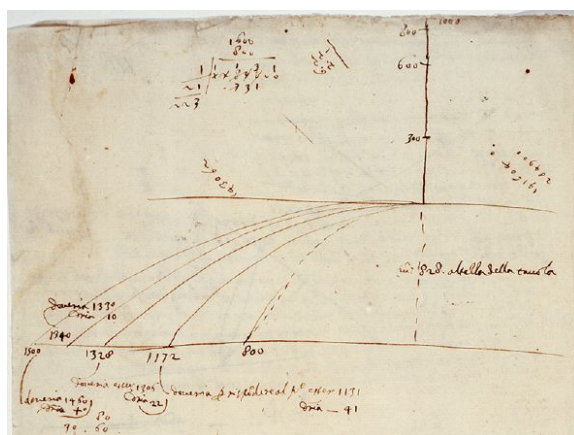


FIGURE 11 – Schéma de travail de Galilée sur une chute en demi-parabole.

Il faudra attendre le « Discours » [29] pour lire une formalisation de sa théorie du mouvement :

Théorème 1 (Théorème I (Galilée) [29]). « *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* ».

Théorème 2 (Théorème II - Proposition II (Galilée) [29]). « *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 des carrés de ces temps* ».

Théorème 3 (Théorème III - Proposition III (Galilée) [29]). « *Si un même corps, partant du repos, tombe sur un plan incliné, puis le long d'une verticale, la hauteur étant la même dans les deux cas, les temps des mouvements seront entre eux comme des longueurs respectives du plan incliné de la verticale* ».

9. Référence du film : http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/image/featherdrop_sound.mov.

10. Référence : http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Galileo_Prototype/HTML/F116_V/M116_V.HTM.

Les recherches qu'il mena sur la chute libre témoignèrent de son grand talent d'expérimentateur. À titre d'illustration on relatera les expériences du mouvement des billes sur un plan incliné où il utilisa un système de mesure des temps de chute avec des clepsydes, dans le but de comparer par la suite les temps de parcours des billes relativement entre elles (c'est à dire qu'il compara et explicita les mouvements des billes par rapport au mouvement d'autres mouvements de billes et non pas par rapport à l'usage d'une jauge temporelle extérieure). Grossièrement on peut dire que le concept de jauge permet avec le mouvement de A de signifier l'équivalence ou un ordre par rapport à B . Pour être clair il utilisa une jauge propre à ce qu'il expérimenta. Cette méthode s'inscrivait parfaitement dans ce qui restera une de ses plus grandes découvertes : « la relativité galiléenne » qu'il aborda dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* où il écrivit que les lois de la physique étaient les mêmes sur un bateau en mouvement qu'à l'arrêt, ouvrant la place au concept de référentiel.

Une légende raconte encore que Galilée observant le grand chandelier de l'église de Pise osciller, aurait compté les battements de son pouls entre chaque oscillation, comme ce fut toujours le même il en conclut que ce pourrait-être une bonne manière de mesure le temps [8]. Cette expérience marqua le point de départ d'une révolution dans l'horlogerie avec la perspective d'un temps pendulaire isochrone, sujet qui fut largement approfondi par Huygens. Mais au-delà de cette application nous pouvons interpréter ce mécanisme de compatibilité entre une jauge mécanique et une jauge biologique pour définir une notion de jauge de capacité entre deux domaines qui auraient pu paraître déconnectés. Alors la jauge de A a capacité à servir de jauge pour les phénomènes (B_i).

Une autre expérience sur les billes lorsqu'il adjoint un second plan incliné lui permit d'observer que celles-ci poursuivaient leur trajectoire, en imaginant ce qui pourrait se passer sur un plan horizontal où rien ne puisse affecter le mouvement il en déduisit une autre grande idée qui deviendra le principe d'inertie. Mais on attribue véritablement à Huygens la formalisation de ce principe qui sera repris par Newton, marquant le passage du concept à la définition. [« Principe d'inertie » (Huygens) [29]] « Si la gravité n'existait pas et qu'aucune résistance d'air ne s'opposait au mouvement des corps, chacun d'eux continuerait son mouvement avec une vitesse uniforme suivant une ligne droite ».

2.3 De la loi et du principe

2.3.1 Newton

D'un point de vue de l'histoire des sciences notons que si Galilée avait possédé l'outil d'intégration, il aurait pu démontrer les lois de la chute libre sans avoir recours à l'expérience puisque les formules se déduisent en

quelques lignes. Mais à l'inverse nous n'aurions pas eu toutes ces avancées sur les procédés d'expérimentation ou sur le jaugeage. Newton révolutionna la mécanique rationnelle par l'usage des dérivées et de l'intégration dont il fut le co-inventeur¹¹.

Les principes mathématiques de la philosophie naturelles

En Août 1684 alors qu'il se rendait en visite à Cambridge (UK), Halley interrogea Newton sur la nature d'une courbe qui serait décrite par les planètes si l'on supposait que la force d'attraction vers le soleil était proportionnelle à la réciproque du carré de leur distance à chacune d'elles. Newton répondit immédiatement que la trajectoire serait de nature elliptique. À cela Halley demanda une possibilité de motiver une telle réponse, ce que Newton justifia en deux temps, tout d'abord dans un opuscule qu'il destina à Halley, puis dans ce qui sera l'œuvre majeure de Newton : « Les principes mathématiques de la philosophie naturelle » [21] qui parut dans la première édition en 1687 (figure 12) sous l'égide de la Royal Society alors dirigée par Pepys. Que Newton ait pu répondre si rapidement à la question soumise n'est pas le fruit d'un éclair d'esprit, elle fut abordée antérieurement lors d'une réunion à la Royal society en 1684 avec Wren et Hooke [40], et également dans des précédents échanges épistolaires avec le Hooke.

Le livre fut entièrement rédigé en latin, il fallut attendre 1729 pour découvrir une première traduction en Anglais par Motte. Le titre put surprendre, le texte était destiné à répondre à Descartes auteur « Philosophie naturelle ». Il est clair que le sens de nature faisait référence au sens étymologique, que faire précéder le titre cartésien de « Principes mathématiques » fait prendre en considération une perspective méthodologique hypothético-déductive dans le domaine de la nature. C'est en définitive ce que nous disait déjà Galilée : le langage de la métathéorie était mathématique.

11. Nous reviendrons par la suite sur la controverse au sujet de la découverte de ces outils mathématiques.

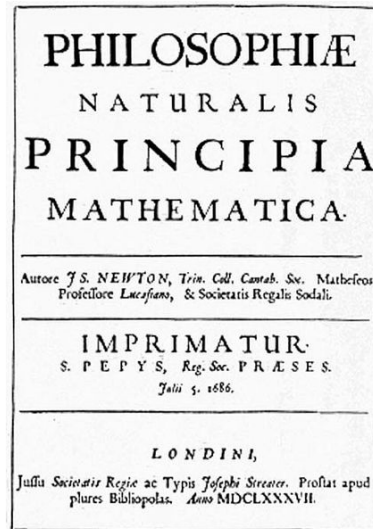


FIGURE 12 – Couverture des « Principia » (1^{re} édition).

Cette idée se confirme par le contenu qui exposa sous forme quasi-axiomatique dans l'esprit d'Euclide mais aussi d'Archimède, avec une théorie de la mécanique qui permettait de retrouver toutes les lois de Kepler et celle de la chute libre de Galilée. On y retrouve les trois lois fondamentales alors que la première avait le statut de principe depuis qu'elle fut formalisée par Huygens, bien que conceptualisée la première fois par Galilée.

Organisation du livre. On se référera à ce niveau à la version de la marquise du Châtelet qui réalisa la première traduction de l'ouvrage de Newton entre 1745 et 1749¹². Le livre est structuré en cinq parties : Les

Catégorie	Titre	Pages
Définitions		23-39
Axiomes		40-59
Livre I	Du mouvement des corps	60-66
Livre II	Du mouvement des corps (fluides)	67-73
Livre III	Du système du monde	74-117

TABLE 2 – Structure « Principia »

chapitres regroupent des sections de définitions, de scholies, de propositions et de théorèmes qui rappellent la structure de *L'éthique* de Spinoza, malgré tout on constate une inversion entre la causalité divine invoquée par Newton à la fin de l'ouvrage et la causalité divine introduite au début de l'éthique

12. On retrouvera dans la partie théorique des traductions plus contemporaine de ces lois par Biarnais [34].

par Spinoza. Maintenant cela reste assez logique compte-tenu que l'ouvrage de Newton restait à caractère scientifique et qu'il mettait un terme à une physique de l'a priori.

Outre les lois qui ont valeur axiomatique tellement la couverture des faits se révèlent exacte, on retrouve dans les « Principia » des définitions de termes existants : masse grave, masse d'inertie, ... autant que des nouveaux concepts : quantité de mouvement...

« Axiomata sive leges motus » [Axiomes ayant valeur de loi]

Ces lois s'articulent à partir de la loi d'inertie : [1° Loi de mouvement (Newton)] Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état. La deuxième loi formulait bien entendu la relation fondamentale de la dynamique. [2° Loi de mouvement (Newton)] Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, et le font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée. Tandis que la troisième définissait le principe de l'action et la réaction. [3° Loi de mouvement (Newton)] L'action est toujours égale et l'opposé 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. Outre ces trois lois du mouvement, Newton établit la loi de la gravitation universelle qu'il associa avec l'existence d'une constante G déjà appréhendée dans « De motu corporum in gyrum » (1685) qu'il appela constante de gravitation universelle. [Loi de la gravitation universelle (Newton)] 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 ». Si Gilbert suggéra le premier que la force de gravité était proportionnelle aux masses, en 1645 l'astronome Boulliau affirma lui que l'action attractive du soleil était centrale et sa dimension était en $\frac{1}{r^2}$ (une référence d'ailleurs citée par Newton dans les « Principia »). Les forces en $\frac{1}{r^2}$ étaient donc connues d'autres scientifiques comme Hooke¹³, bien qu'en 1660 il n'évoqua qu'une fonction de la distance r . Le miracle de la formule de Newton fut que cette loi lui permit de retrouver les lois de Kepler par l'expression analytique de la loi de la gravitation universelle :

$$\|\mathbf{V}_{1/2}\| = \left\| \frac{m_1 \times m_2}{r^2} \times G \right\|$$

Puis en guise d'applications Newton y rendit compte entre autres du phénomène des marées qu'il expliqua par l'attraction lunaire qui conjuguée à celle du soleil sur la terre, ou la trajectoire des comètes qu'il éclaircissait par l'attraction du soleil.

13. Hooke était le découvreur de mouvements linéaires à force centrale par l'étude du ressort.

De la masse et du poids dans les « Principia » où Newton distingua quantité de matière d'un corps qu'on appellera masse m , la masse inertielle m_i et la masse grave m_g .

Définition 9 (La quantité de matière (Newton)). *La quantité de matière est la mesure que l'on tire à la fois de sa densité et de son volume.*

Si la masse inertielle m_i se définissait par une qualité de la matière au repos qui s'opposait au mouvement, Newton définit la masse d'inertie comme la force à communiquer à un corps au repos pour lui communiquer un mouvement caractérisé par une accélération donnée. Newton apporta une solution constructive par l'application de la relation fondamentale de la dynamique $\mathbf{F} = m_i \times \boldsymbol{\gamma} = m_i \times \dot{\mathbf{v}}$. Le grand Carnot dénommera alors la force inertielle comme ce qui allait s'opposer au mouvement, plus exactement la réaction d'une force pour lui communiquer le mouvement. Comme la force est ce qui s'imprima pour transmettre ou modifier le mouvement, il s'établit une relation implicite d'identité entre la masse d'inertie et la quantité de matière par la relation $\mathbf{F} = \dot{\mathbf{q}}$. Newton définit donc la quantité de mouvement par « le produit de la masse par la vitesse », autrement dit $\mathbf{q} = m \times \mathbf{v}$. On voit qu'il est toujours très difficile quand on part d'une déduction analytique d'essayer de trouver un chemin synthétique qui aurait pu servir d'une méthode de type synthétique au niveau formel, on s'est ici essayé à trouver cet hypothétique chemin. À l'opposé il reste toujours très délicat de croire que ces formules aient pu « tomber du ciel ».

La masse grave m_g d'un corps devient la masse du corps engagé dans un champ de gravitation conduisant à l'expression du poids ou force exercée par le champ de gravitation.

Proposition 2 (Proposition VII-Théorème VII (Newton)). *La gravité appartient à tous les corps, et elle est proportionnelle à la quantité de matière que chaque corps contient.*

Par cette proposition il montra que la masse grave était équivalente à la masse du corps, de la sorte on conclut que $m_g = m_i = m$. La décomposition du mouvement selon Newton montra la décomposition d'un mouvement soumis à une force centrale et une action d'inertie (cf. figure 14). On pouvait ainsi imaginer que la force centrale était l'expression d'une force de gravité exercé par une masse pesante agissant sur un grave.

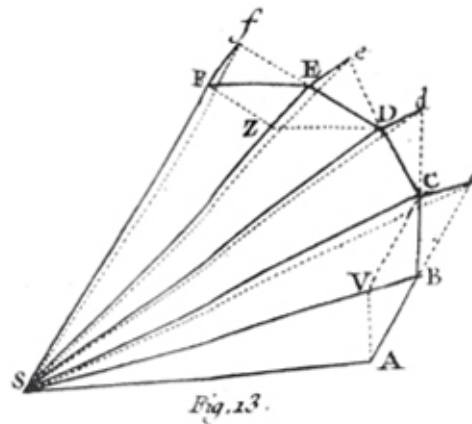


FIGURE 13 – La décomposition du mouvement selon Newton.

En 1881 une expérience menée par Eötvös prouva l'égalité de la masse grave et de la masse inertielle à 10^{-12} près.

La loi La loi Newtonienne est une loi qui se montre, se révèle à l'homme et n'en reste pas moins non démontrée. D'ailleurs une loi démontrée serait un théorème et non pas une loi. En tant que relevant de la mécanique elle s'intègre dans les lois de la nature. Habituellement l'adjectif empirique est souvent juxtaposé ou tout au moins généralement sous-entendu concernant les sciences de la nature. Mais tel n'est pas le cas ici puisque Newton titre le chapitre où il va énumérer les lois : « Axiomata sive leges motus », l'auteur nous dirige vers une partie purement axiomatique. L'utilisation du terme « Lex » nous incline davantage à penser au droit romain, on retrouve son usage par Descartes dans ses « Principae Philosophiae » (1644). L'idée de loi de la nature engage dans une nature qui a pouvoir sur l'homme et plus généralement sur les entités qu'elle régit.

Dans « La grammaire de la science » [28] Peirce nous indique la définition d'Austin de la loi : « C'est une règle établie pour qu'un être intelligent soit guidé par un être plus intelligent que lui ayant pouvoir sur lui. » Le lecteur de « Principia » retrouvera cette ordonnance en deux temps où les lois revoient aux lois de la mécanique et l'être intelligent au sens du « grand ordonnateur », à Dieu. En fin de compte, à l'appréciation des travaux des prédécesseurs de Newton il apparaît un mouvement antagoniste : en premier chef il prolongea, améliora et généralisa les théories de Copernic, Kepler et Galilée sur des bases extrêmement robustes, mais il soumit l'expression de sa découverte à une autorité supérieure divine. Certes Kepler affirma déjà que les « planètes avaient une âme » mais il nous semble que Newton va plus loin et consenti à tracer une voie moyenne entre l'ordre ecclésiastique

en place et une découverte aussi spectaculaire que prometteuse.

Si nous revenons au concept de loi, terme métathéorique en sciences, toutefois on discernera un abord catégorique : la loi scientifique, orale, divine, d'une approche dichotomique : la loi naturelle et positive suivant la distinction de Montesquieu. Austin dira que la loi scientifique n'étant pas originelle, lui précède les lois d'organisation de la cité, de la morale, d'ailleurs il ne laissa même pas la place au sens scientifique dans la source originelle de la loi. À l'opposé le philosophe Hegel voulut s'inspirer du caractère intangible de la loi scientifique pour construire les lois civiles et morales dans « La philosophie de la loi ». En définitive on pourrait se poser les questions suivantes :

1. Trouve-t-on une place pour la loi en science ?
2. Si elle renvoie à l'expression d'un ordre, doit-on y voir l'expression d'un ordre en place ou d'une conciliation à l'image d'un Prométhée porte-feu entre la nouvelle théorie et l'ordre en place.

On retrouve en fin de compte une formulation pratique soulevée par le mythe de Prométhée, bien entendu qu'il y a la place pour une loi en science quoique nous puissions imaginer que la théorie mériterait d'être améliorée pour la transformer en un théorème d'une théorie hypothético-déductive. La seconde question cache une question tout aussi profonde, c'est l'argumentation de la causalité. Retenons un argument critique de Feynman : « Lorsque nous avons discuté les lois de Newton, nous avons expliqué que ces lois constituaient une sorte de programme dont le mot d'ordre serait "Cherchez les forces" et que Newton ne nous avait indiqué que deux choses concernant la nature des forces [...] Voilà à quoi se bornait tout le savoir de Newton concernant la nature des forces : la loi de la gravitation et le principe de l'égalité de l'action et de la réaction ; des détails, il ne savait rien. ». On prend alors conscience de l'arrière-plan de la théorie auquel le physicien reste autant attaché qu'à la valeur prédictive ou explicative d'une théorie. Einstein se montra moins sévère, peut-être parce qu'il fut aussi le grand pourfendeur de la mécanique Newtonienne sous le côté relativiste, il vit dans l'utilisation des différentielles l'émergence d'une causalité. Sans rentrer dans une vision néoplatonicienne, sous un angle pragmatique il faut bien convenir que ce fut là une découverte utilisée magistralement par Newton : l'application d'un langage métathéorique source de la causalité de termes métathéoriques.

2.3.2 Le principe de moindre action

De l'origine au principe variationnel. Le principe se révèle très important, il appartient aux termes métathéorique premier dans « La métaphysique » d'Aristote. Bien que plus profond, il partage la même propriété que la loi, autrement dit ils constituent des énoncés explicatifs satisfaits empiriquement à la source de dérivations déductives. À partir de cet énoncé Lagrange concrétisa une nouvelles formulation de la mécanique newtonienne mais si distincte par

sa présentation qu'il la qualifia à juste titre de mécanique analytique. Elle allait ouvrir une méthode d'exposition des résultats mécaniques plus abstraite, généralisant l'utilisation du langage mathématique conformément au mot d'ordre de Galilée.

Sur le fond on retrouvait déjà l'idée du principe de moindre action dans la pensée de Héron d'Alexandrie : « La nature agit toujours pas moindre dépense ». Mais on doit à Fermat le principe de moindre temps, concept source pour corriger une erreur de Descartes en optique concernant les effets de mirages (inférieur et supérieur) qui restaient alors inexpliqués. Fermat écrivit en 1637 : « La nature agit toujours par les voies les plus courtes ». En 1740 Maupertuis le définit sous son nom actuel : « le chemin qu'elle emprunte est celui par lequel la quantité d'action est moindre ». Il l'étendit de l'optique à la mécanique en 1744, alors que l'argumentation relative à cette extension fut l'objet de sévères critiques car elle reposait sur une argumentation théologique. Sans aucun doute les échanges entre Maupertuis et Euler stimulèrent le développement de ce concept encore assez vague et immature, ce fut l'œuvre d'Euler avec l'invention d'un outil mathématique adéquat : les fonctionnelles, qui définit un principe mathématique correspondant appelé principe variationnel (qui était analytique et à fortiori calculatoire). Lagrange porta ce principe à un fondement de la mécanique qui offrait bien davantage qu'une alternative à la représentation Newtonienne.

Lagrange : l'aube d'une révolution s'annonce avec la *Mécanique analytique* publiée en 1788 (cf. figure 14), cette œuvre marqua incontestablement une rupture épistémologique qui dépassa le cadre strictement de la mécanique. Dès le début du texte Lagrange se montra d'une grande clarté envers le lecteur : « On ne trouvera point de figures dans cet ouvrage. Les méthodes que j'y expose ne demandent ni constructions, ni raisonnements géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une machine régulière et uniforme. Ceux qui aiment l'analyse, verront avec plaisir la mécanique en devenir une nouvelle branche, et me sauront gré d'en avoir étendu le domaine » [26]. Hamilton qui reformula en 1834 le principe de moindre action qualifia le texte de Lagrange de « poème scientifique écrit par le Shakespeare des mathématiques ». Il allait dès lors exister une nouvelle branche des mathématiques s'occupant de la mécanique classique : la mécanique analytique qui reposait sur l'analyse fonctionnelle. Ce fut le nouveau terrain d'expression de la mécanique dite rationnelle, elle progressait vers un cadre hypothético-déductif sur le modèle des mathématiques, bénéficiant des avancées de cette science purement rationnelle.

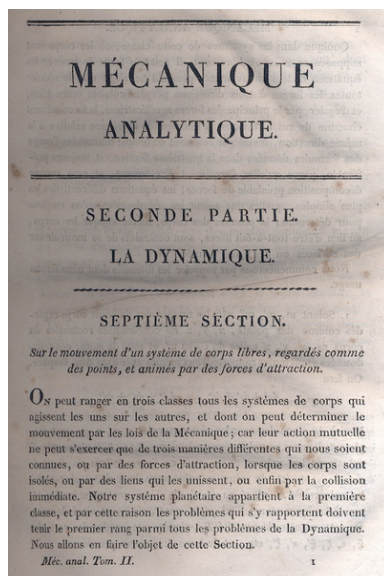


FIGURE 14 – La mécanique analytique de Lagrange.

Lagrange y trouva des applications dans le problème de la stabilité du système solaire, les systèmes dynamiques dans leur généralité. La succession de son œuvre menée par Laplace aboutit à la formulation d'un quasi nouvel-ordre, moins providentiel que l'ordre divin, mais toujours soumis à l'idée d'un déterminisme absolu qu'on se représentera dans sa fameuse citation : « Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux ». [17]

À un niveau théorique nous avons avec Lagrange le point de départ de l'expression de la mécanique classique telle que nous l'aborderons dans la partie théorique. Certes les événements historiques qui se succédèrent ont réduit son champ d'action, par contre le socle théorique resta intact - on mentionnera simplement le perfectionnement du principe de moindre action.

2.4 Une idée venue d'ailleurs : les champs

2.4.1 Un concept de l'électrodynamique

Faraday fut un physicien exceptionnel que son parcours d'autodidacte singularise. Ici nous ne retenons qu'un seul éclairage de son œuvre immense, qui nous sera utile dans la partie théorique. Cela concerne ses recherches

expérimentales sur l'électricité tirées du « Experimental Researches in Electricity » publiées en trois volumes retraçant les vingt-neuf mémoires qu'il communiqua à Royal Society entre 1832 et 1852, nous nous concentrerons sur le phénomène d'induction électromagnétique qu'il découvrit en 1831. Rappelons préalablement qu'en 1820 (Ersted montra qu'un courant passant par un fil de platine placé au-dessus d'une boussole faisait dériver sa flèche, indiquant alors la création d'un champ magnétique induit par le courant.

Les expériences de 1831 que nous avons retenues sont celles réalisées premièrement à partir d'un anneau de fer sur lequel il enroula deux fils conducteurs face à face. L'un d'eux pouvant être connecté à une pile. Il constata qu'en reliant le fil conducteur à la pile, un courant surgissait dans le circuit non alimenté. En conséquences il interpréta que le courant dans le premier fil créait un champ magnétique dans le premier circuit et que la variation du champ magnétique dans le second circuit induisait la création d'un courant électrique dans le même circuit.

Secondement il réalisa une expérience où cette fois il déplaça une barre de fer à l'intérieur d'une bobine conductrice et constata alors un courant éphémère pendant le mouvement. Il conclut alors que la variation du champ magnétique par le déplacement de la barre en fer induisait un courant électrique. Il dénomma ce phénomène induction électromagnétique.

L'interprétation avec recul qu'il en fit en 1846 exposa une nouvelle représentation de l'espace, ce qu'on pourrait véritablement rapprocher d'un nouveau paradigme au sens de Kuhn qui est encore aujourd'hui source de compréhension et de construction tant il semble profond. A son sens les couches magnétiques préexistaient au déplacement de la barre de fer ou à celui du courant dans la première expérience. Il suggéra alors de représenter l'espace physique avec des champs matérialisés par des lignes et des points affectés de potentiels d'interaction avec les champs.

Dans le domaine électromagnétique sa théorie fut formalisée tout d'abord par Neumann ensuite généralisée par Maxwell qui déterminait les lois de la nature huit équation réduites à quatre au final. Nous mentionnerons que l'œuvre de Hertz, qui vérifia expérimentalement la validité des équations de Maxwell sur des grandes longueurs d'onde, refléta l'incessant va et vient entre théorie et expérience qui n'aura jamais vraiment cessé depuis Archimède. La preuve par la pratique restait de premier ordre.

Le concept de champ une fois défini permettait de réifier un espace d'un genre nouveau, à vrai dire le paradigme de champ et celui d'espace se recouvraient. Les travaux théoriques en mathématiques inaugurés par Gauss, poursuivis par Riemann permirent de créer des outils calculatoires adaptés à ces nouveaux espaces : les flux, distance, mathématisation du champ vecto-

riel, tenseurs, Le champ étendu à la mécanique conduisit la mécanique du potentiel et spécialement celle du potentiel Newtonien édifiée à partir d'un champ gravifique. Cette notion de champ gravifique allait permettre à Einstein de construire la théorie de la relativité générale.

2.5 Sisyphe au sommet de la montagne

2.5.1 Quelques autres faits à mentionner

Nous avons essayé de retracer une dimension archéologique à notre projet théorique sur la mécanique classique, nous avons éclipsé beaucoup d'autres moments forts, nous mentionnons trop rapidement dans ce paragraphe quelques événements marquants de l'histoire de la mécanique. Dans « La mécanique des corps solides » (1760) Euler définit l'important moment d'inertie dont Dugas écrit que cela aurait bien simplifié les raisonnements de Huygens. Alors que J.Bernoulli s'illustra sur la composition des forces, que d'Alembert forgea le principe des vitesses virtuelles, on dut à Stevin pour une première démonstration et Varignon (1688) ensuite la formalisation de la règle de composition des forces concourantes.

Rajoutons aussi le domaine de l'hydrodynamique dans lequel D.Bernoulli s'illustra par le célèbre traité « Hydrodynamica - De viribus et motibus fluidorum commentarii » (1738) qui perfectionna la construction des bateaux, domaine dans lequel Euler (1755) trouva d'autres résultats très importants. Cette science servait aussi pour améliorer le fonctionnement des jeux d'eau dans les palais, à l'image de « Sans-souci » ou de « Versailles ».

2.5.2 1900 : La fin de la mécanique ?

Le climat intellectuel parmi les physiciens se voulait radicalement optimiste sur l'état d'avancée de la science à l'image d'une géographie conquérante qui aurait délimité tous les territoires du globe terrestre, laissant entrevoir « l'édifice de la physique achevée ». Lord Kelvin déclara : « La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux, tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat de l'expérience de Michelson et celui du rayonnement du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance » [40]. L'aube du XX^e siècle allait marquer a contrario l'éclatement de la physique à ses limites : l'infiniment petit et l'infiniment grand¹⁴ ; le cadre paradigmatique allait éclater, non pas au sujet d'une flexion des termes mais plus radicalement autour de l'émergence de domaines minimalistes.

14. On retient ici un usage physique du terme infini.

3 De l'effondrement des ambitions au minimalisme

On séparera trois temps dans l'éclatement d'une mécanique classique unifiée démarqué par trois acteurs centraux : S.Carnot, Planck et Einstein.

3.1 S.Carnot

Si dans son *Essai sur les machines* L.Carnot précisait déjà qu'il ne croyait pas au mouvement perpétuel, ce sera son fils S.Carnot qui en apporta la démonstration. En définissant le mouvement perpétuel comme « un mouvement au sein d'un système sans apport d'énergie ou de matière, ni transformation irréversible du système » [30], nous pouvons le modéliser une suite de chemins systématique, qui par théorème verra son entropie augmenter. Ainsi cette perte qualitative d'une énergie mobilisable pour le mouvement conduisant inexorablement à l'impossibilité du mouvement perpétuel. Ce fut en 1824 que Carnot démontra son théorème sans en découvrir la véritable cause, il revint à Clausius d'introduire un nouveau concept : l'entropie, cela mena aux découvertes de Boltzmann et à la création d'une nouvelle branche de la mécanique : la mécanique statistique.

L'effondrement de la prétention à l'universalité s'effectua en particulier avec la prise de conscience de l'impossibilité de réaliser le mouvement perpétuel. On remarquera qu'à partir du moment où le temps reposait sur un mécanisme pendulaire, autrement dit sur une jauge mécanique qui définit la seconde par le marquage d'intervalles unitaire sur le battement d'un pendule, il devint de fait impossible de construire le temps absolu sans recours à des sources énergétiques extérieures au système pendulaire. Il ne subsistait du temps qu'une idée en soi et non universelle.

3.2 Planck

Si l'on doit à Einstein la définition du « photon » (1905), les concepts qualifiants les propriétés du grain de lumière remontent aux travaux de Planck sur le rayonnement du corps noir en 1900.

On appelle rayonnement du corps noir le rayonnement électromagnétique d'un corps chaud placé dans la cavité d'une enceinte supposée parfaitement absorbante suivant toutes les fréquences. L'expérience qui fut réalisée par Planck s'appuyait sur le concept d'onde lumineuse émise par un corps chaud. Si nous replaçons cela dans le contexte historique, cela faisait suite à la découverte par Hertz des ondes radio qui vérifiaient les équations de Maxwell, mais présentaient des longueurs d'ondes différentes de celle de la lumière. On doit aussi préciser que cette expérience se situa à l'intersection d'une expérience de spectroscopie et de thermodynamique. On rappelle qu'Herschel en 1800 relia la lumière et la chaleur par sa découverte des rayonnements infrarouges.

D'un point de vue étymologique le mot spectre provient du latin « spectrum » qui signifie voir, regarder, qui apparaît ou s'offre au regard. Avec Newton le mot s'associa alors à l'idée d'un champ d'action, il devint la qualité d'une chose : la lumière par exemple, d'un corps, pour en faire une signature. La spectroscopie devenant « l'ensemble des méthodes et techniques d'étude de rayonnements émis, absorbés ou diffusés par une substance, qu'ils soient formés de radiations électromagnétique ou de particules » [37]. Planck essaya donc de déterminer l'équation du spectre du rayonnement d'un corps noir.

Précisons que sa thèse qu'il réalisa en 1879 s'intitulait « L'entropie », il se trouvait idéalement placé pour aborder ce thème ; bien qu'on tenta de le dissuader de s'intéresser à ce sujet dans le contexte d'une physique déjà engagée dans un savoir total. Ce qu'on savait à l'époque précéder l'expérience relativement au rayonnement du corps noir se formulait par deux lois qui modélisaient le phénomène sur des segments, le point commun était que toutes ces lois se trouvaient indépendantes de la nature du corps.

1. La loi de Stefan-Boltzmann présentait une loi globale.
2. Les lois de Wien et Raleigh-Jeans formulaient une intensité lumineuse fonction de la fréquence et de la température.

L'expression de la loi de Raleigh-Jeans conduisait à une aberration pour les courtes longueurs d'onde où l'énergie spectrale tendrait vers l'infini, ce qu'on appela « catastrophe ultraviolette ». Par une remise en cause de l'hypothèse d'équipartition de Raleigh et en supposant que les systèmes absorbaient des quantités discrètes d'énergie (certains complexes ou états étant alors favorisés suivant l'approche de Boltzmann), Planck démontra que les échanges d'énergie se faisaient par paquet d'énergie qu'il nomma quanta. Mentionnons que la loi de Planck prédisait la loi de Wien pour les basses fréquences et celle de Raleigh-Jeans pour les hautes fréquences, son intégration par intervalle permettait de retrouver la loi de Stefan-Boltzmann. Ainsi l'expérience de Planck remettait en cause le rayonnement électromagnétique des équations de Maxwell qui prétendaient solder les phénomènes électrodynamiques. Cette expérience symbolisa l'acte de naissance de la mécanique quantique, Einstein dénomma les quanta de lumière les photons dans son célèbre article sur l'effet photoélectrique (1905), posa $E = h \times \nu$ ou h était une constante relative au rayonnement du corps noir appelée constante de Planck.

3.3 Einstein

Ce fut également Einstein qui remit en cause la théorie de Newton reposant sur l'idée d'un temps et d'un espace absolus. Par la théorie de la relativité générale avec de prime abord une explication sur l'anomalie de mercure dont la précession du périhélie était anormale dans le système Newtonien. Ce qui lui valut une première reconnaissance, avant les éclipses totales du

soleil de 1919 et 1922 qui démontrèrent de manière décisive la justesse de ses prévisions et donc de sa théorie. Lors de l'éclipse de 1919 deux expéditions furent conduites au Brésil et sur une île au large de l'Afrique occidentale où Eddington avait pour l'occasion installé du matériel d'observation et de photographie. Les analyses des clichés montrèrent la déviation des rayons lumineux stellaires conformément à la théorie prédite par Einstein. Cela apporta la preuve expérimentale que les rayons lumineux étaient courbés par la matière, ou encore que l'espace ne se trouvait plus indépendant du temps, que l'espace-temps n'était pas Euclidien. En définitive il se présentait une application de la théorie des champs à la mécanique, la physique de Newton réduisant de nouveau son champ d'application.

Rappelons qu'Einstein eut deux apports magistraux sur le concept de masse tel qu'à pu le définir Newton, tout d'abord en le mettant en relation avec l'énergie et la vitesse de la lumière mais également dans ce qu'il appela « l'idée la plus heureuse de sa vie » (1933) qui s'inscrit comme pierre angulaire dans la genèse de la théorie de la relativité générale : « dans un champ de gravitation homogène, tous les mouvements se déroulent comme ils le font en l'absence de champ par rapport à un système de coordonnées uniformément accéléré ».

3.4 1919 : que restait-il de la mécanique classique ?

Suite aux travaux précurseurs de Poincaré¹⁵, il remarqua que des calculs sur des petites variations des conditions initiales d'un système pouvait conduire à des grandes variations sur le comportement dynamique, une nouvelle théorie allait s'attacher à étudier ces systèmes en pouvant démontrer des comportements chaotiques autant que stables : les systèmes dynamiques. Par ailleurs lorsqu'en 1902 il publia un livre de philosophie des science : « La science et l'hypothèse » il laissa transparaître un certain scepticisme sur les termes premiers de la mécanique classique : force, masse, accélération ... On retiendra néanmoins son approche méthodologique suivant les critères Kantiens de la connaissance. Par ailleurs il opta pour une définition plus empirique de la physique comme les britanniques l'entendaient, qui s'opposait au sens de la mécanique analytique qui fut le sillon pris par les continentaux. Si nous retiendrons les principes de Kant pour émettre une possibilité de justifier l'existence d'une connaissance synthétique à priori, néanmoins nous essaierons de poursuivre dans la voie de la mécanique analytique pour en faire une véritable théorie hypothético-déductive.

L'enjeu sera alors de démontrer des énoncés principiels et axiomatiques (qui légifèrent a fortiori) ce qui apparaîtra comme un bouleversement épistémologique. Les conclusions qu'on apportera en histoire des sciences ainsi qu'en philosophie seront de l'ordre de la nécessité au vu des résultats.

15. En particulier l'étude du problème des trois corps qui lui permit de remporter le prix du roi de Suède Oscar II en 1887.

Titre	Acteurs principaux
La mécanique antique	Archimède, Héron, Pappus ...
La mécanique au moyen-âge	Oresme, Buridan, Albert de Saxe...
La mécanique du solide	Stevin, Varignon
La chute des corps	Galilée, Torricelli
La mécanique des astres	Copernic, Brahé, Kepler
La mécanique newtonienne	Newton, d'Alembert
La mécanique analytique	Lagrange
La mécanique céleste	Lagrange, Laplace
La mécanique des fluides	Bernoulli, Euler, Navier-Stokes
La théorie des champs	Faraday, Maxwell
La mécanique statistique	Boltzmann, Maxwell
La mécanique quantique	Planck, Einstein
La mécanique relativiste	Einstein

TABLE 3 – Évolution de la mécanique classique.

Références

- [1] Archimède. *Œuvres complètes*, volume 1-2-3-4. Les belles lettres, 1971.
- [2] Archimède. *Œuvres complètes*, volume 3. Les belles lettres, 1971.
- [3] Toncelli R. Balibar F. *Einstein, Newton, Poincaré - Une histoire de principes*, volume 1. Belin, 1^o édition, 2008.
- [4] Toncelli R. Balibar F. *Einstein, Newton, Poincaré - Une histoire de principes*, volume 1, page 26. Belin, 1^o édition, 2008.
- [5] Allègre C. *Galilée*. Plon, 1^o édition, 2002.
- [6] Coulomb C. Théorie des machines simples. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1095299>, 1821. Lien fonctionnel en mai 2014.
- [7] Hempel C. *Éléments d'épistémologie*. Armand Colin, 2^o édition, 1966.
- [8] Rovelli C. Le temps n'existe pas. *La Recherche*, 442 :41–43, Juin 2010.
- [9] Collectif. Une calculatrice pour les marées. <http://mpt2013.fr/une-calculatrice-mecanique-pour-les-marees/>. Lien fonctionnel en mai 2014.
- [10] Collectif. Les géomètres de la grèce antique. *Les génies de la science - Pour la science*, 21 :14, Novembre-Février 2004.
- [11] Collectif. Mathématiques : Nouveaux défis et vieux casses-tête. *Les dossiers de la Recherche*, 20 :74–78, Aout-Octobre 2005.
- [12] G. de Véricourt Depondt P. *Kepler*. Éditions du Rouergue, 1^o édition, 2002.
- [13] Chambers E. Archimedean screw. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chambers_1908_Archimedean_Screw.png.

- [14] Chambers E. Cyclopaedia - a useful dictionary of arts and sciences. https://fr.wikipedia.org/wiki/Pluie,_Vapeur_et_Vitesse, 1728. Plate 11.
- [15] Balibar F. *Galilée, Newton lus par Einstein – Espace et Relativité*. 1° edition.
- [16] Braudel F. *civilisation matérielle, économique et capitalisme XV°-XVII°*, volume 3, page 470. Armand colin, 1° edition, 1979.
- [17] Laplace F. Essai sur les probabilités. In *Et dieu créa les nombres*. 1814.
- [18] Galilei G. *Dialogue sur les deux systèmes du monde*. 1° edition, 16.
- [19] Gromov-I. *Introduction aux mystères*. Actes Sud, 1° edition, 2013.
- [20] Hacking I. *The taming of chance*. Cambridger University Press, 2° edition, 2005.
- [21] Newton I. Principes de la philosophie naturelle. <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1040149v>.
- [22] Baudet J. *Penser le monde - Une histoire de la physique jusqu'en 1900*. Vuibert, 2006.
- [23] Cornette J. *Histoire de la France - Absolutisme et lumières (1652-1783)*, pages 232–234. Hachette Supérieur, 5° edition, 2008.
- [24] Desrosières J. *La politique des grands nombres*. La découverte, 2010.
- [25] Gimpel J. *La révolution industrielle du Moyen Age*. Éditions du seuil°, 2° edition, 1975.
- [26] Basdevant J.-L. *Principes variationnels et Dynamique*, page 52. Vuibert, 1° edition, 2005.
- [27] Verdet J.-P. *Astronome et Astrophysique*. Larousse, 1° edition, 1993.
- [28] Pearson K. La grammaire de la science. http://www.numdam.org/item?=JFS_1912__53__196_0, 1912. Lien fonctionnel en mai 2015.
- [29] Blay M. *La science du mouvement : De Galilée à Lagrange*. Histoire des sciences. Belin Sup, 1° edition, 2002.
- [30] N/A. Le mouvement perpétuel. <https://fr.wikipedia.org/wiki>.
- [31] N/A. Vie de galilée. <https://fr.wikipedia.org/wiki/galilee>.
- [32] N/A. Diderot. *La pensée*, 2013.
- [33] Newton. *Principe de la philosophie naturelle*. 1° edition, 1754.
- [34] Newton. *Principia mathematica*. 1° edition, 1985.
- [35] Reviel N. Noel W. *Le codex d'Archimède*. JC Lattes, 1° edition, 2007.
- [36] Locqueneux R. *Une histoire des idées en physique*. Vuibert, 2006.
- [37] Le Gars S. *Une histoire de la lumière - La spectroscopie*. Vuibert, 1° edition, 2010.
- [38] Strandh S. *Les machines*, volume 1. A.B. Nordbok, 1° edition, 1997.

- [39] Strandh S. *Les machines*, volume 1. A.B. Nordbok, 1^o edition, 1997.
- [40] Boudenot J.-C. Samuël J.-J. *Trente livres de Physique qui ont changé le monde*. Ellipses, 2007.
- [41] Vitruve. *De l'architecture*, volume IX,3. 1^o edition.