

Chapitre VI

HISTOIRE DE LA MÉCANIQUE.**I. L'ANTIQUITE & LE MOYEN ÂGE.****I. 1. La physique aristotélicienne.**

A l'époque d'Aristote (au IV^{ème} siècle avant J.C), l'univers était expliqué par un système géocentrique¹. La Terre est une sphère fixe² et se trouve au centre de l'univers : la lune, les planètes, le soleil, et les étoiles se déplacent par rapport à la Terre.

Aristote de Stagire (-384 /-322) explique l'immobilité de la Terre par l'argument du "lancer vertical" :

Un corps lancé verticalement vers le haut revient à son point de départ.

Par contre, si la Terre se déplaçait, le corps retomberait derrière le lanceur.

Les grecs ignoraient le "mouvement relatif" et la notion de *repère*.

L'explication de ce phénomène sera donnée au seizième siècle par Giordano Bruno (Voir § III).

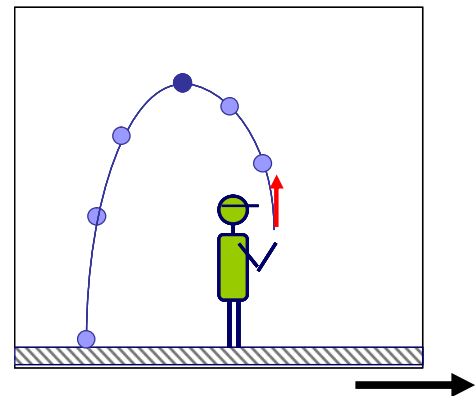


Figure VI.1

Dans cet Univers, Aristote distingue deux mondes: l'un terrestre (le monde sub lunaire) et l'autre céleste (le monde supra lunaire). Les lois de la physique ne sont pas les mêmes dans ces deux mondes.

1°) Le monde sub-lunaire.

Constitution de la matière.

Aristote reprend la conception d'Empédocle d'Agrigente³ proposée au siècle précédent. La matière est formée de quatre éléments :

La terre, l'eau, l'air et le feu.

¹ Ce système géocentrique sera développé, au deuxième siècle après J.C, par Claude Ptolémée (§ I.3).

² La sphéricité de la Terre a été affirmée par Pythagore de Samos. Il pensait que le monde avait été conçu en harmonie avec les mathématiques, la Terre ne pouvait donc être que sphérique puisque la sphère et le cercle sont des figures géométriques parfaites. Cet argument sera repris par Platon. Aristote, quant à lui, s'est aperçu que la Terre est une sphère en observant les éclipses de la lune ("Traité du ciel" livre II.14). En outre les grecs avaient remarqué que les mâts des navires, arrivant de loin, apparaissaient, en premier, au dessus de l'horizon.

³ Voir Bendaoud *Histoire des sciences* L1.

Il attribue, à chaque élément, des qualités de:

Chaud, froid, sec et humide

La terre est froide et sèche, l'eau est froide et humide, l'air est froid et sec, et le feu est chaud et sec.

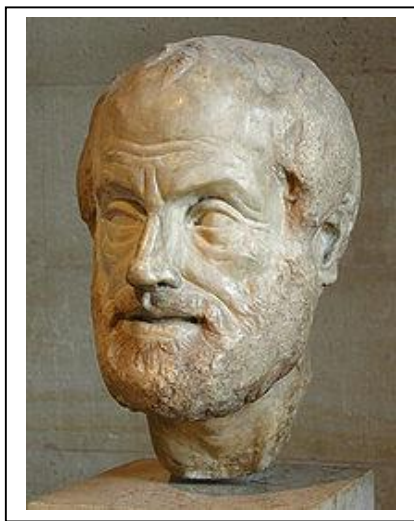
Le mouvement.

Il y a deux types de mouvements :

a) Les mouvements naturels. Chaque corps a tendance à rejoindre son lieu naturel :

Ceux qui se dirigent vers le haut : la fumée s'élève vers le ciel.

Ceux qui s'orientent vers le bas : la chute d'un corps par exemple.



Aristote de Stagire

Aristote est né en - 381 à Stagire, en Macédoine, et il est mort en - 322 à Chalcis. Il fut le disciple de Platon à l'*Académie* et fonda, en 335 avant J.C sa propre école, le *Lycée*. Ce nom vient du fait que cette école se trouvait près du portique consacré à Apollon Lycien. Aristote dispensait son enseignement, à ses élèves, en marchant, c'est la raison pour laquelle on les appelait les "*péripatéticiens*". Il fut le précepteur d'Alexandre le Grand.

Aristote est considéré comme le fondateur de la logique, la physique, et la métaphysique. Sa logique est jusqu'à présent au programme de l'enseignement secondaire et sa physique, qui va être exposée dans ce qui suit, a régné pendant vingt siècles.

Les quatre éléments sont alors classés, en fonction de leur "*densité*", du plus lourd au plus léger. La terre est plus lourde que l'eau, par conséquent une pierre tombe dans l'eau. L'eau est plus lourde que l'air, ce qui explique pourquoi la pluie tombe. Le feu est plus léger que l'air d'où le mouvement ascendant de la fumée.

Aristote exprime la chute des corps sous forme de lois :

La vitesse d'un corps est proportionnelle à la "force"⁴ qui lui est appliquée⁵.
Les corps lourds tombent plus rapidement que les corps légers.

La Physique [] Livre VII Ch. 5.

Ces deux résultats seront rejetés, au XVII^{ème} siècle, par Galilée. En fait, la deuxième loi est valable dans l'air et, plus généralement, dans les fluides⁶.

⁴ Le concept de force a été introduit par Newton au XVII^{ème} siècle (Voir § II.5)

⁵ Cette loi serait formulée actuellement par : $F = k V$ où k est un paramètre indépendant de la vitesse..

⁶ C'est la loi de Stokes en régime laminaire : $F = k V$ où : $k = 6\pi\eta R$ dans le cas d'une sphère de rayon R qui se déplace à la vitesse V dans un fluide de viscosité η .

b) Les mouvements forcés : Ce sont des mouvements violents et finis de corps corruptibles. L'élément moteur est dans l'air ; selon cette théorie, aucun mouvement n'est possible dans le vide.

Aristote nie l'existence du vide.

D'autre part, le mouvement étant fini, il s'arrête, dès que l'élément moteur cesse d'agir :

Les grecs ignoraient le principe d'inertie

2°) Le monde supra-lunaire.

Ce monde céleste (lune, planètes, soleil, étoiles) est composé d'*éther*, qui constitue un cinquième élément. Ces corps sont *incorruptibles*. Leur mouvement est circulaire, donc parfait, et éternel ; et l'élément moteur est une divinité.

..... ; on a pu avec toute raison regarder comme divin le corps qui jouit d'un mouvement éternel et appeler par conséquent ce corps Ether, à cause de cette propriété qui le fait si différent de tous les corps que nous voyons.

Aristote Météorologie Livre II, Chapitre III, § 4

Les successeurs d'Aristote, à la direction du Lycée, Théophraste (-372, - 287) et Straton de Lampsaque (-338, - 269) enseignèrent sa théorie tout en formulant quelques critiques.

Le premier, qui dirigea le Lycée pendant 32 ans, apporta quelques modifications à la physique d'Aristote dont celle, qui se rapporte à la nature du feu, est fondamentale. Dans son traité " du feu", il prouve que le feu n'est pas un élément constituant de la matière comme les trois autres ; car ces derniers "

ne requièrent aucun substrat, alors que le feu en requiert un. Il paraît absurde de le considérer comme un élément premier, puisqu'il ne peut exister sans matière" ⁷.

Straton de Lampsaque, qui assura la direction du Lycée durant 18 ans, contribua à l'étude de la chute des corps. Il mit en évidence le mouvement accéléré d'un objet lâché à partir d'une certaine hauteur. Il a montré que la vitesse, en fin de course du corps, augmente avec la hauteur de la chute. En effet la trace laissée sur le sol par le corps est d'autant plus profonde que la hauteur est grande.

I. 2. Les autres théories.

1°) La théorie atomique.

Une cinquantaine d'années plus tôt, Leucippe de Milet introduit une théorie atomique qui sera développée par son élève Démocrite d'Abdère. La matière est discontinue, elle est formée d'atomes et de vide. Les atomes⁸ sont des corpuscules indivisibles, trop petits pour être vus et en nombre infini. Ils se composent d'une substance homogène et sont en mouvement incessant dans

⁷ " Du feu" cité dans une histoire de la science grecque Lloyd page 185

⁸ le mot atome (*atomos* en grec), signifie indivisible ou insécable

un vide illimité. Ils ne diffèrent que par la nature de leur mouvement, leur taille et leur forme. Ils peuvent être sphériques, pointus, ou crochus, ce qui leur permet de s'associer les uns aux autres pour former des objets matériels. Cette théorie est rejetée par Aristote, car, pour lui, le vide n'existe pas.

2°) La théorie héliocentrique.

Quelques années après la mort d'Aristote, Aristarque de Samos (-310, -230) élève de Straton de Lampsaque, propose un système héliocentrique :

« Aristarque de Samos a publié certains écrits sur les hypothèses astronomiques. Il fait l'hypothèse que les étoiles et le Soleil sont immobiles. Quant à la terre, elle se déplace autour du soleil sur un cercle ayant son centre dans le Soleil. ⁹ »

Mais cette hypothèse fut rejetée jusqu'à la révolution scientifique au seizième siècle.

Remarque : La physique d'Aristote est basée sur l'observation à partir de laquelle il émet une hypothèse, puis il aboutit à une conclusion qu'il exprime sous la forme d'une loi. Si on compare cette méthode à celle (OHERIC)¹⁰ qui sera péconisée par Claude Bernard au XIX^{ème} siècle, on constate l'absence de toute expérience, mesures, résultats dont l'interprétation conduit à une loi.

La physique d'Aristote a servi de référence pendant près de deux mille ans du IV^{ème} siècle avant JC jusqu' au XV^{ème} siècle. Voici ce que pensait, le grand savant arabe Ibn Rochd

Aristote a fondé et achevé la Logique, la Physique et la Métaphysique. Je dis qu'il les a fondées, parce que tous les ouvrages qui ont été écrits avant lui sur ces sciences ne valent pas la peine qu'on en parle, et ont été éclipsés par ses propres écrits. Je dis qu'il les a achevées, parce qu'aucun de ceux qui l'ont suivi jusqu'à notre temps, c'est-à-dire pendant près de quinze cents ans, n'a pu rien ajouter à ses écrits, ni y trouver une erreur de quelque importance.

Rapporté par Pierre Duhem, «*Système du monde*» tome 2 p139

I. 3. L'école d'Alexandrie.

Après Athènes, Alexandrie devient le centre culturel et scientifique du Monde grec.

Claude Ptolémée¹¹ (100/170), savant de l'école d'Alexandrie, perfectionne le système géocentrique. Il élabore une théorie mathématique pour décrire le mouvement des astres par rapport à la Terre. Celle-ci est immobile au centre de l'Univers, le soleil et la lune décrivent des trajectoires circulaires¹², il en est de même des planètes. Cependant les astronomes avaient observé, bien avant Ptolémée, une rétrogradation dans le mouvement des planètes.

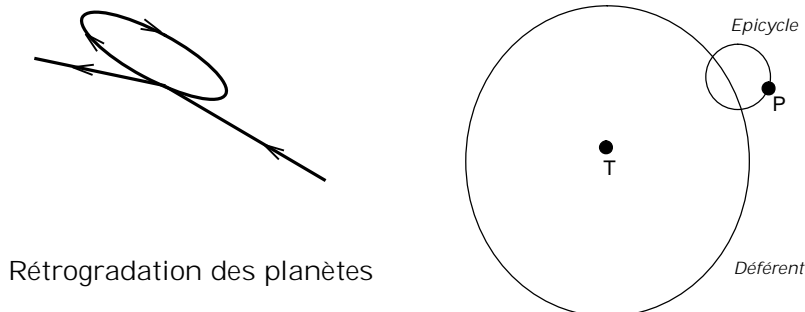
⁹ Archimède: Préface du traité L'arénaire

¹⁰ Voir Ch III.

¹¹ Ne pas confondre avec Ptolémée 1^{er} (-368/- 283), roi d'Égypte, fondateur d'Alexandrie.

¹² Dans le monde supra lunaire d'Aristote, le mouvement des astres est parfait, donc circulaire. Le cercle représentait, chez les grecs, la figure géométrique parfaite.

Pour expliquer ce mouvement rétrograde, Ptolémée suppose que la planète décrit un cercle, l'*épicycle*, dont le centre se déplace le long d'un autre cercle, le *déférent*, centré sur un point proche de la Terre, l'*équant*.



Figures VI.2

A la fin de l'antiquité, le savant grec Jean Philopon d'Alexandrie émet une hypothèse au sujet du mouvement des corps dans le monde sub-lunaire : Dans le cas du mouvement forcé, l'élément moteur n'est pas dans l'air, comme le préconise Aristote, mais il est communiqué au projectile par le lanceur. C'est cet "*élan*" qui permet au mobile de poursuivre son mouvement.

Lorsqu'on imprime à une pierre, en la lançant, un mouvement forcé, est-ce en poussant l'air à l'arrière de la pierre que l'on contraint celle-ci à se mouvoir?
Ou bien le lanceur imprime-t-il une force motrice à la pierre?
S'il ne le fait pas à quoi sert que la pierre soit en contact avec la main¹³

Ce concept sera repris au XI^{ème} siècle en pays d'Islam par Ibn Sina et au XIV^{ème} en Europe par Jean Buridan et Albert de Saxe, et donnera naissance par la suite au concept d'*impétus* qui préfigure l'impulsion.

I. 4. Le Moyen âge.

En pays d'Islam, Ibn Sina (Avicenne)¹⁴ introduit le concept de '*mayl*' (inclination). Selon Djebbar¹⁵, Avicenne considère trois genres de "*mayl*" :
Inclination naturelle: Tendance d'un corps à rejoindre son lieu naturel par la gravité ou la légèreté
Inclination violente: qui crée le mouvement. C'est l'*élan* de Philopon
Inclination psychique: à l'origine du mouvement des êtres animés

D'autre part il donne une formulation du principe de l'inertie :

Un corps au repos résiste à tout ce qui a tendance à le mettre en mouvement .

Abu'l-Barakat al-Baghdadi¹⁶ se situe dans la lignée d'Avicenne. Il propose une explication de l'*accélération des corps en chute libre* par l'accumulation des augmentations successives de la vitesse¹⁷

¹³ Cité dans Lloyd page 358

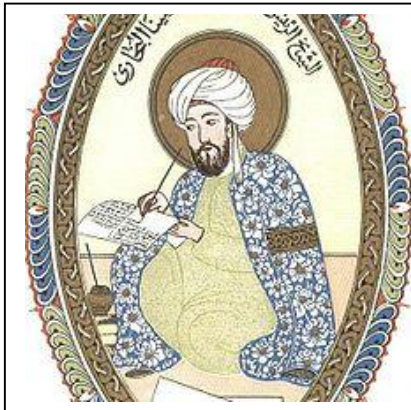
¹⁴ Ibn Sina : Né en 980 à Boukhara et décédé en 1037 en Iran

¹⁵ Djebbar page 256

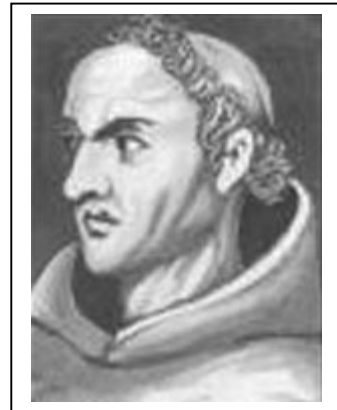
Selon S. Pines¹⁸, Al Baghdadi rejette la loi d'Aristote sur le mouvement et préconise que *la "force" est proportionnelle à l'accélération et non pas à la vitesse*. C'est le Principe Fondamental de la Dynamique qui sera clairement formulé au XVII^{ème} siècle par Isaac Newton avec l'introduction du concept de masse.

Al-Baghdadi a également introduit la notion de *mouvement relatif* lorsqu'il dit que:

" Il n'y a mouvement que si les positions relatives des corps considérés changent"¹⁹



Ibnu Sina (980-1037)



Jean Buridan (1292-1363)

En Europe, Jean Buridan (1292-1363), recteur de l'université de Paris, conserve la séparation de notre univers en monde sub lunaire et supra lunaire mais il rejette, dans le premier cas, le rôle moteur dû au milieu. Le moteur est dans le mobile, c'est l'impétus, introduit par Philopon.

Tandis que le moteur meut le mobile, il lui imprime un certain impetus, une certaine puissance capable de mouvoir le mobile dans la direction même où le moteur meut le mobile...

Plus grande est la vitesse avec laquelle le moteur meut le mobile, plus puissant est l'*impetus* qu'il imprime en lui...

Plus un corps contient de matière, plus il peut recevoir de cet impetus²⁰;

On voit naître le concept d'*impulsion* (ou quantité de mouvement²¹ qui est une grandeur proportionnelle à la masse et à la vitesse.

Dans le monde supra lunaire, l'impétus, imprimé par Dieu, se conserve indéfiniment.

Dieu, lorsqu'il a créé le Monde, a mu comme il lui a plu chacun des orbes célestes, il a imprimé à chacun d'eux un impétus qui le meut depuis lors²³.

¹⁶ Abu'l Barakat Hibat Allah Al-Baghdadi (1080 - 1165) : philosophe et physicien arabe, né près de Mossoul

¹⁷ A. C. Crombie, *Histoire des sciences de St Augustin à Galilée* (2 tomes) PUF 1959

¹⁸ S. Pines (1970). "Abu'l-Barakāt al-Baghdādī, Hibat Allah". Dictionary of Scientific Biography. New York:

¹⁹ Langermann, Y. Tzvi (1998), "al-Baghdadi, Abu 'l-Barakat" *Islamic Philosophy*, Routledge Encyclopedia of Philosophy,

²⁰ Cité dans Rosmorduc, page 35

²¹ Le concept de "quantité de mouvement sera introduit par Descartes au XVII^{ème} siècle. (voir § II. 4)

II. LA MÉCANIQUE AU XVII^{ème} SIÈCLE.

Au XVI^{ème} siècle l'astronome polonais Copernic propose un système solaire héliocentrique, qui finit par être adopté par la communauté scientifique, malgré une forte résistance de l'église ²². Dans ce système, les planètes, dont la Terre, tournent sur des cercles centrés sur le soleil. Pour Copernic comme pour Aristote, les trajectoires ne peuvent être que circulaires.

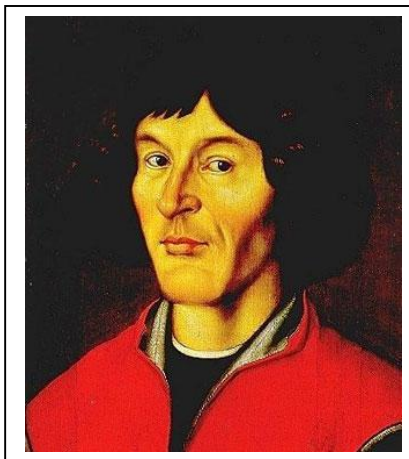
A partir de cette vision du monde et des observations de l'astronome danois Tycho Brahé, Johan Képler a pu dégager les lois du mouvement des planètes :

Première loi (Loi des aires) (1609): *Le rayon vecteur balaie des surfaces égales pendant des temps égaux*

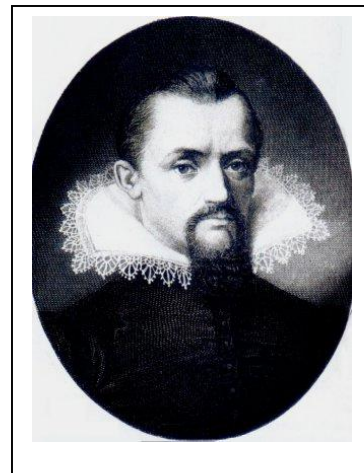
Deuxième loi (1609): *les orbites des planètes sont des ellipses dont le soleil occupe l'un des foyers* ²³.

Troisième loi (1618): *le carré de la période de révolution d'une planète est proportionnel au cube du demi grand-axe de l'orbite.*

La première loi explique l'inégalité des saisons. La seconde montre que les orbites des planètes ne sont pas des cercles, comme le pensaient les grecs et Copernic, mais des ellipses.



Nicolas Copernic 1473-1543



Johannes Képler 1571-1630

Le système héliocentrique de Copernic prouve que la séparation de l'univers en monde sub lunaire et supra lunaire n'a plus sa raison d'être. Une même théorie peut alors régir les mouvements des astres et ceux des corps sur terre. C'est à partir de ces travaux en astronomie et des résultats obtenus, au dix septième siècle par des savants, dont Galilée et Huygens, que Newton a pu construire une théorie complète de la mécanique. Cette théorie a été publiée, en 1687, dans un ouvrage intitulé " *Philosophiae naturalis principia mathematica*" (Principes mathématiques de la philosophie naturelle). Nous allons voir, dans ce qui suit, la contribution de ces savants à la construction de la mécanique newtonienne et les concepts, qu'ils ont introduits et qui seront, par la suite, utilisés dans cette branche de la physique.

²² Copernic n'a pas osé publier de son vivant le " *De revolutionibus orbium coelestium* " qui paraîtra l'année de sa mort en 1543

²³ Ces lois sont énoncées ici selon d'ordre historique. Actuellement dans l'enseignement on commence par la loi des orbites.

II. 1. La relativité du mouvement.

Giordano Bruno²⁴ (1548 -1600) aborde, dès 1584 dans "*le Banquet des cendres*", la notion de relativité qui eut une importance énorme dans l'histoire de la physique. La science avait très peu évolué depuis Aristote. Ce dernier explique l'immobilité de la Terre, et par conséquent le système géocentrique, par l'argument du "lancer vertical" (fig. VI.3). Giordano Bruno rappelle cet argument :

Selon Aristote, il serait impossible qu'une pierre jetée en l'air retombât suivant la même verticale. Le très rapide mouvement de la Terre devrait nécessairement la laisser loin derrière, du côté de l'occident²⁵.

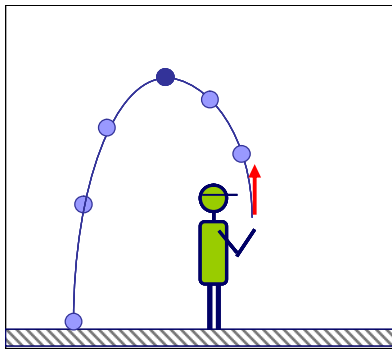


Figure VI . 3

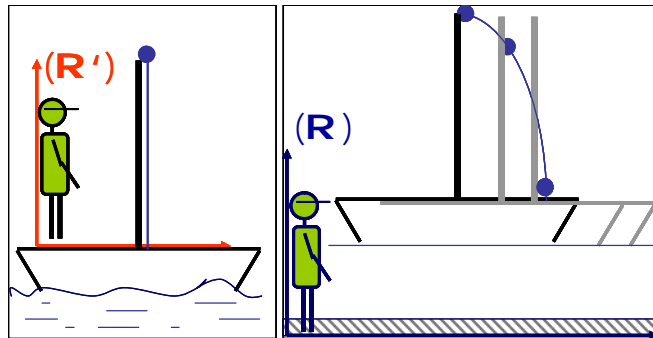


Figure VI . 4

Il réfute cet argument en faisant remarquer qu'Aristote néglige une donnée essentielle : le mouvement de la pierre a lieu sur Terre, or tout ce qui se trouve sur Terre se meut avec la Terre²⁶. De la même façon, dans un navire en mouvement

une pierre, lancée par quelqu'un qui se trouve à bord, retombera en suivant la même verticale, quelque soit la vitesse du navire et à condition qu'il ne donne pas de la gîte²⁷.

Comme dans le cas de la Terre, toutes les choses, qui se trouvent sur le navire, se déplacent avec lui à la même vitesse. Ainsi, l'argument d'Aristote, qui prouve l'immobilité de la Terre, ne tient plus.

Bruno aborde ensuite la notion de relativité : Il considère les mouvements de deux pierres lancées verticalement, au même instant, à partir d'un même point par deux personnes. Le premier lanceur se trouve sur le navire et le second sur la berge. Le lanceur, qui se trouve à bord du navire, verra la pierre, qu'il a lancée, retomber en suivant une même verticale, par contre, il verra la pierre, lancée par l'autre personne, retomber derrière lui.

Les deux mouvements sont décrits ici par rapport au navire : cette façon de décrire le mouvement va donner, par la suite, naissance au concept de référentiel. La figure IV. 4 montre le mouvement d'une pierre, lâchée du haut du mât, observée dans deux référentiels, le premier lié au navire et le second à la Terre.

²⁴ Giordano Bruno, (1548-1600) savant italien, accusé d'hérésie pour ses écrits, est condamné à être brûlé vif par l'Inquisition. On peut voir à Rome une statue de Giordano Bruno érigée en 1889 sur le lieu de son exécution.

²⁵ Giordano Bruno, "*le Banquet des cendres*" Trad Y. Hersant. Edition de l'Eclat Paris 2006 page 84.

²⁶ *ibid* page 85.

²⁷ C'est-à-dire : à condition que le navire ne subisse pas de secousses. La gîte : inclinaison transversale d'un navire.

Giordano Bruno remet en cause la science d'Aristote : la terre n'est plus le centre de l'univers, pas plus que le Soleil dans le système de Copernic. Car l'univers de Bruno est infini et dans un espace infini chaque point peut être considéré comme un centre. Le vide existe et facilite le mouvement. Il ne fait aucune distinction entre mouvement naturel et mouvement forcé, il rejette le concept de lieu naturel.

Pour Alexandre Koyré, G. Bruno a *opéré une véritable révolution de l'image traditionnelle du monde. Infinité de l'univers, unité de la nature, géométrisation de l'espace, négation du lieu, relativité du mouvement : Nous sommes tout près de Newton*²⁸.



Giordano Bruno 1548 -1600



Galilée 1554 -1642

Cette étude du mouvement est reprise en 1632 par Galilée (1554 -1642) dans le *"Dialogue sur les deux systèmes du monde"*. Comme Bruno, Galilée reprend le mouvement de la chute d'une pierre du haut d'une tour sur Terre et le même mouvement du haut du mât d'un navire. Mais pour Galilée, *"il y a une grande différence entre le cas du navire et celui de la terre"*. Comme Aristote, Galilée fait la distinction entre le mouvement naturel, donc circulaire, des astres, ici la terre, et le mouvement du navire qui est dû à un élément moteur. Galilée ne s'est pas débarrassé de toutes les idées aristotéliennes, alors que Giordano Bruno les a rejetées.

Puis Galilée aborde la notion de repère : Puisque tout ce qui se trouve sur Terre est emporté par le mouvement de la Terre, nous, habitants de la Terre, nous n'avons aucun moyen de détecter ce mouvement, *du moins tant que nous regardons les choses terrestres*. Pour savoir si la Terre est mobile ou immobile, nous devons nous référer *aux corps séparés de la Terre*, c'est-à-dire les astres (la lune, le soleil etc.). Mais alors, qui est-ce qui tourne, la Terre ou tout le reste ?

²⁸ Koyré : *Etudes galiléennes*, page 229

L'immense masse que constitue la sphère étoilée comparée à la petitesse du globe terrestre, incite Galilée à opter pour le mouvement de la Terre d'autant plus qu'il avait adopté le système héliocentrique de Copernic.

Selon Galilée, le mouvement est décelé ou repéré par rapport *''aux choses qui en sont privées''*.

Notons que, chez Galilée, la description du mouvement ne nécessite pas un repère fixe²⁹. Il suffit de choisir un référentiel qui, dans le cas du problème considéré, est privé de mouvement. Ainsi le mouvement de la terre est repéré par rapport au soleil qui, dans le cas du système solaire, est fixe.

Rappelons qu'au XII^{ème} siècle, Abu'l Barakat al Baghdadi avait remarqué que le mouvement n'existe que *si les positions relatives des corps considérés, changent*. (Voir § 1.4.)

La relativité galiléenne³⁰ ne prendra sa forme définitive qu'après les travaux de Newton. Elle sera remplacée en 1905 par la théorie de la relativité restreinte élaborée par Poincaré et Einstein.

II. 2. Référentiel d'inertie.

Dans le même ouvrage, Galilée introduit la notion de *''référentiel d'inertie''*. lorsqu'il considère des personnes, enfermées dans une cabine sous le pont d'un navire. Ces personnes constatent que *des petites bêtes qui volent, mouches, papillons, vont à la même vitesse dans toutes les directions de la cabine*, que le navire soit immobile ou en mouvement à vitesse constante. En outre, si ces personnes ont accroché au plafond *un seau dont l'eau coule goutte à goutte dans un autre vase à petite ouverture placé en dessous*, elles constatent que, dans les deux cas, *les gouttes qui tombent entrent toutes dans le vase placé en dessous*. Par conséquent ces personnes n'ont aucun moyen de savoir si le navire est en mouvement ou à l'arrêt.

Nous dirons, à présent, que la cabine constitue un *référentiel d'inertie* ou *référentiel galiléen*. Ainsi, par définition, *''un référentiel dont le mouvement ne peut être mis en évidence par aucune expérience de physique est un référentiel d'inertie''*. Notons que la Terre n'est pas un repère d'inertie, en raison de sa rotation diurne et de son mouvement autour du soleil. L'expérience du pendule de Foucault, qui sera réalisée en 1851 c'est-à-dire deux siècles après la mort de Galilée, mettra en évidence le mouvement diurne de la Terre.

II. 3. Le principe d'inertie.

La formulation moderne du principe³¹ de l'inertie, est :

''Tout corps libre, c'est à dire qui n'est soumis à l'action d'aucune force, est en mouvement rectiligne et uniforme.''

Les chinois avaient déjà énoncé ce principe depuis deux mille ans,³² mais ils ne l'avaient pas exploité. Les grecs ignoraient le principe de l'inertie. Un

²⁹ Fixe par rapport à quoi ? La théorie de la *''relativité restreinte''* montre qu'il n'existe pas, dans la nature, de repère fixe. On considère alors des référentiels d'inertie.

³⁰ En fait, la relativité a été amorcée, comme nous venons de le voir par Giordano Bruno.

³¹ Un principe ne se démontre pas. Comme un postulat ou un axiome, il est vérifié par ses conséquences. (Voir Ch. V)

³² Voir Bendaoud L1

énoncé du principe de l'inertie sera donné par le savant hollandais Isaac Beeckman (1588-1637).

Ce qui est mis en mouvement demeure en mouvement éternellement³³.

Galilée retrouve, en 1632, ce principe à partir d'une expérience de pensée³⁴, mais celle-ci n'est pas convaincante.

En effet Galilée avait imaginé dans le "*Dialogue sur les deux systèmes du monde*", le mouvement d'une boule *parfaitement sphérique et extrêmement dure sur une surface horizontale plane et polie comme un miroir. Si la boule est posée à l'arrêt sur le plan, elle doit naturellement rester arrêtée. Mais si elle reçoit de l'élan dans une certaine direction, elle irait dans cette direction avec un mouvement qui ne serait ni accéléré ni retardé, puisqu'il n'y a ni montée ni descente*, donc un mouvement uniforme. *Et si l'on supposait cet espace (le plan horizontal) sans fin, le mouvement sur cet espace serait également sans fin, c'est-à-dire éternel.*

Dans cet exemple, la boule n'est pas un "corps libre". Galilée ne fait pas, ici, abstraction de la force de gravité. Nous savons à présent que cette force est annulée par la réaction du plan lorsque les dimensions de celui-ci sont faibles par rapport à celles de la Terre. Mais Galilée considère un plan infini tangent à la Terre, comme la force de gravité est radiale elle ne sera pas annulée loin du point de contact entre le plan et la Terre, la boule ne sera plus libre. Galilée, devant ce problème, remplace le plan infini par une sphère. La force de gravité reste constante mais le mouvement n'est plus rectiligne. (Lire à ce sujet Koyré pages 161 à 165)

C'est Isaac Newton qui, dans les *principia* (1687), énonce clairement le principe de l'inertie³⁵ et l'attribue à Galilée.

II. 4. La quantité de mouvement.

René Descartes (1596-1650), dont les travaux en mécanique ne furent pas aussi importants qu'en optique ou en mathématiques, a néanmoins introduit le concept de quantité de mouvement³⁶ et énoncé la loi de *conservation de la quantité de mouvement*

Puisqu'il (Dieu) a mu en plusieurs façons différentes les parties de la matière lorsqu'il les a créées, et qu'il les maintient toutes de la même façon et avec les mêmes lois qu'il leur a fait observer en leur création, il conserve incessamment en cette matière, une égale quantité de mouvement³⁷

René Descartes *Principes de la philosophie* (1644)

³³ Koyré : *Etudes galiléennes*, page 108

³⁴ Une expérience de pensée est une expérience que le savant imagine mais qu'il ne peut pas réaliser. Albert Einstein a posé, à partir d'une expérience de pensée (*Gedankenexperiment*), le postulat sur l'équivalence d'un champ de gravitation et d'un champ d'accélération. C'est sur ce postulat qu'est basée la théorie de la relativité générale.

³⁵ Voir la 1^{ère} partie du cours "*Epistémologie*" Ch III § 3.2.

³⁶ Ce concept a été ébauché par Buridan lorsqu'il a introduit "*l'impétus*" (Voir §1.4)

³⁷ Cité par Mach page 271. Selon Descartes, la quantité de mouvement est une propriété intrinsèque de la matière acquise au moment de la création du monde.

Cette façon d'expliquer la cause du mouvement fut critiquée par Leibniz et entraîna une controverse sur laquelle nous reviendrons.

II. 5. Les travaux d' Huygens.

Christian Huygens³⁸ (1629 -1695) poursuit les travaux de Galilée sur le mouvement pendulaire, donne la théorie de l'horloge à balancier et fait construire les premières horloges à échappement³⁹ (1657). Il étudie également le pendule conique.

En étudiant les petites oscillations d'un pendule quelconque, il met en évidence l'expression $\sum mr^2$ qu'Euler appellera par la suite "*moment d'inertie*" puis il trouve le théorème qui porte son nom. Le théorème d'Huygens s'exprime, avec les notations modernes, sous la forme :

$$I = I_G + a^2 M$$

où I est le moment d'inertie d'un corps de masse M par rapport à un axe Δ quelconque I_G son moment d'inertie par rapport à un axe parallèle à Δ et passant par le centre de gravité G ; a est la distance des deux axes.

Huygens découvre la *force centrifuge* (vis centrifuga) en donne l'expression mathématique⁴⁰ et explique la variation de l'accélération de la pesanteur g en fonction de la latitude du lieu. Cette variation est due à l'influence de l'accélération centrifuge qui résulte de la rotation de la Terre autour de son axe. Huygens aborde l'étude de la dynamique de plusieurs corps et s'intéresse en 1669 au problème des chocs ; il constate que la quantité mv^2 est conservée, quantité que Leibniz appellera "*force vive*".

Huygens n'accepte pas l'idée d'une action à distance instantanée de la force de gravitation découverte par Newton. Il pense que cette action se propage à travers un milieu intermédiaire⁴¹.

II. 5. La théorie de Newton : La gravitation.

Isaac Newton (1642- 1727) montre, à partir des travaux de Képler et de Galilée que la chute des corps sur terre et le mouvement des planètes ont une même origine : La *force de gravitation*, puis il donne la loi de la gravitation. En outre, il formule les principes de la mécanique classique: Principe de l'inertie, principe fondamental de la dynamique, et principe de l'action et de la réaction.

Dans les Principia..., "*sûrement l'ouvrage le plus important qui fut jamais écrit en physique* ⁴²", il commence d'abord par énoncer un certain nombre de

³⁸ Mach considère Huygens comme "l'égal de Galilée à tous égards" page 148

³⁹ La première montre à ressort spiral, conçue par Huygens, est fabriquée par Thuret en 1675 (Rosmorduc page 63)

⁴⁰ Elle permettra à Newton d'exprimer la loi de la gravitation.

⁴¹ De la même façon qu'un milieu intermédiaire (l'éther) lui est nécessaire pour expliquer la propagation de la lumière (Voir Ch VII)

⁴² Hawking : page 227. Dans le même paragraphe, Hawking fait une description peu flatteuse de l'homme qu'était Newton. Celui-ci passa une partie de sa vie à se disputer avec d'autres savants dont l'astronome John Flamsteed et Leibnitz. Newton et Leibniz avaient développé, à la même époque et indépendamment l'un de l'autre le calcul différentiel. Une querelle, au sujet de la priorité de cette découverte, éclata entre les deux savants. *Leibniz commit la faute d'en appeler à la Royale Society* dont le président n'était autre que Newton. Ce dernier désigna les membres de la commission d'arbitrage qui accusa Leibniz de plagiat. "*Après la mort de*

définitions : la masse⁴³, la quantité de mouvement, la force d'inertie (vis insista), la force imprimée (vis impressa), la force centripète, puis il donne les caractéristiques de cette force, fait la distinction entre le poids et la masse d'un corps et donne sa conception de l'espace et du temps.

Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément.

L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire et immobile.

Puis il énonce les trois principes et donne la loi de la composition des forces (règle du parallélogramme⁴⁴) introduit les repères d'inertie. Après avoir présenté l'outil mathématique qui sera utilisé, il résout un grand nombre de problèmes : le mouvement des planètes, l'étude des marées etc.. Newton fut l'un des plus grands savants de tous les temps ; voici ce que Albert Einstein, un autre génie, a écrit à son sujet :

Longtemps avant Newton, il y avait des esprits vigoureux qui pensaient qu'il devait être possible de donner, par des déductions purement logiques à partir d'hypothèses physiques simples, des explications concluantes de phénomènes perceptibles par nos sens. Mais Newton fut le premier à réussir à trouver une base clairement formulée, d'où il pouvait déduire un vaste champ de phénomènes, au moyen de la pensée mathématique, d'une manière logique, quantitative et en harmonie avec l'expérience.⁴⁵

II. 6. La mécanique de Leibnitz. La force vive.

Gottfried Leibnitz⁴⁶ (1646 – 1716) introduit en 1695 le concept de *force vive* (mv^2)⁴⁷ et de force morte, autrement dit la force telle que nous la concevons actuellement. Selon Leibniz, il y a deux façons de *former une infinité d'impressions continuées de la force morte*, c'est-à-dire d'intégrer une force⁴⁸ :

- par rapport au temps ce qui donne l'impétus (impulsion ou quantité de mouvement)
- par rapport au déplacement ce qui donne la force vive.

A l'époque, le concept de travail n'existait pas.

Le mot travail désignant le produit d'une force morte par son déplacement, est utilisé en 1803 par Lazare Carnot qui n'en précise pas le sens et en 1829 par Coriolis qui en précise le sens⁴⁹.

Leibniz, on raconte que Newton déclara avoir éprouvé une grande satisfaction d'avoir brisé le cœur de Leibniz'' page 228. Hawking, né en 1942, a occupé en 1979, à l'Université de Cambridge, la chaire de "Lucasian Professor of mathematics" dont Isaac Newton a été le titulaire au XVII^{ème} siècle.

⁴³ "elle se mesure par la densité et le volume pris ensemble" Mach note que cette définition n'est pas claire.

⁴⁴ La règle de la composition des forces avait également été énoncée en 1668 par Gilles Personne de Roberval (1602-1675) l'inventeur de la balance qui porte son nom et, en 1687, par le père Lamy (1644-1679).

⁴⁵ Einstein : *Conceptions scientifiques* page 155.

⁴⁶ Huygens, Leibniz et Newton furent trois grands savants qui vécurent à la même époque. Newton et Leibniz ont découvert indépendamment l'un de l'autre le calcul différentiel. Huygens et Newton ont abordé l'étude de l'optique à partir de deux hypothèses contradictoires sur la nature de la lumière (voir Ch VII)

⁴⁷ Bélanger 1847 : impulsion (mv^2) et Coriolis force vive ($1/2 mv^2$)

⁴⁸ Rosmorduc page 94

⁴⁹ Locqueneux page 49

III. LA MÉCANIQUE AU XVIII^{ème} SIÈCLE.

A la fin du XVII^{ème} siècle, on disposait de la mécanique de Newton, théorie complète, basée sur le concept de force, qui permet de résoudre aisément la plupart des problèmes de mécanique mais qui devient moins facile à manier lorsque les problèmes se compliquent. Les mathématiciens et physiciens du dix huitième siècle, d'Alembert, Euler et Lagrange notamment, vont reformuler les lois de la mécanique, en utilisant le calcul intégral et différentiel qui a fait, depuis Newton et Leibniz, d'énormes progrès.

On disposait également des travaux de Leibniz, basés sur le concept de "force vive". C'est, d'après Leibniz, la force vive qui est conservée en mécanique, au cours d'un choc élastique par exemple, et non pas la quantité de mouvement comme l'a préconisé Descartes. Il en résulta une querelle entre les partisans de Leibniz et de ses adversaires.

d'Alembert⁵⁰ : met fin à la querelle des forces vives

Qu'on propose le même problème de mécanique à résoudre à deux géomètres dont l'un soit adversaire et l'autre partisan des forces vives, leurs solutions, si elles sont bonnes, seront toujours parfaitement d'accord. La question de la mesure des forces est donc entièrement inutile à la mécanique et même sans objet réel.⁵¹

En fait le problème est mal posé, en effet :

Le problème n'a aucune réalité physique, il porte sur une question de philosophie de la physique ... c'est à dire non sur le calcul et sur les lois mais sur la nature des entités en présence, en l'occurrence sur la nature des forces⁵² :

Or le concept de force n'était pas encore bien défini. Pour d'Alembert la force, dont l'existence ne peut pas être constatée et qui n'intervient que par ses effets, ne présente pas beaucoup d'intérêt ; il préfère introduire la force d'inertie et étudier le mouvement des corps, à l'aide d'un nouveau principe, le principe de d'Alembert, dont la formulation moderne est :

Dans un système matériel en mouvement, il y a équilibre, à chaque instant, entre les forces extérieures, les forces intérieures et les forces d'inertie des différents points matériels.⁵³

L'intérêt d'un tel principe est de ramener un problème de dynamique à un problème de statique. La valeur du principe de d'Alembert est, selon Mach, d'ordre économique⁵⁴.

⁵⁰ Les travaux de d'Alembert ont également porté sur les équations aux dérivées partielles, l'équation des cordes vibrantes et l'hydrodynamique

⁵¹ Discours préliminaire au traité de dynamique de d'Alembert (Ed 1758)

⁵² Michel Puech : *Kant et la causalité* page 257 Ed. Vrin 1990

⁵³ G. Bruhat : Cours de Physique Générale : Mécanique 5^{ème} Edition revue par A. Foch Ed. Masson Paris 1965 page 157.

⁵⁴ Ernst Mach a développé une philosophie des sciences basée sur l'idée que les théories physiques sont des modèles économiques des phénomènes naturels. " *La science peut être considérée comme un problème de minimum, qui consiste à exposer les faits aussi parfaitement que possible avec la moindre dépense intellectuelle*" Mach page 457. Les idées de Mach ont influencé Einstein.

La mécanique analytique, dont une grande partie a été élaborée au dix huitième siècle, constitue une méthode très puissante de résolution des problèmes de la mécanique, méthode qui a été généralisée à toute la physique⁵⁵.



Jean Lerond d'Alembert
1717 – 1783



Louis Moreau de Maupertuis
1698 – 1759

Maupertuis généralise en 1744 le principe de Fermat⁵⁶, énoncé dans le cas de la propagation de la lumière. Par analogie avec le chemin optique, il introduit une grandeur qu'il appelle l'action :

L'Action est proportionnelle au produit de la masse par la vitesse et par l'espace.

Soit : $S = m v l$ où S est l'action est l l'espace parcouru par le corps de masse m à la vitesse v .

Puis il énonce le principe de moindre action selon lequel l'évolution d'un système physique quelconque est celle qui correspond au minimum de l'action.

Maintenant, voici ce principe, si sage, si digne de l'Être suprême : lorsqu'il arrive quelque changement dans la Nature, la quantité d'Action employée pour ce changement est toujours la plus petite qu'il soit possible.

Il vérifie sa théorie en l'appliquant à l'étude des chocs⁵⁷.

Leonhard Euler généralise en 1753 l'action maupertuisienne sous la forme de l'intégrale :

$$S = \int m v dl$$

⁵⁵ Elle est utilisée en électromagnétisme (voir le cours de Maxwell) en relativité (Poincaré) et a permis de développement de la mécanique quantique.

⁵⁶ Voir Ch VII.

⁵⁷ Le calcul est donné par Mach en page 346, les résultats sont en accord avec le *théorème de la moindre contrainte* introduit en 1829 par Gauss.

Il introduit le calcul des variations et justifie le principe de moindre action dont l'énoncé compliqué a été simplifié par Lagrange.

En 1738, il étudie le mouvement du solide à partir du concept de force et établit en 1755 les équations de la mécanique des fluides.

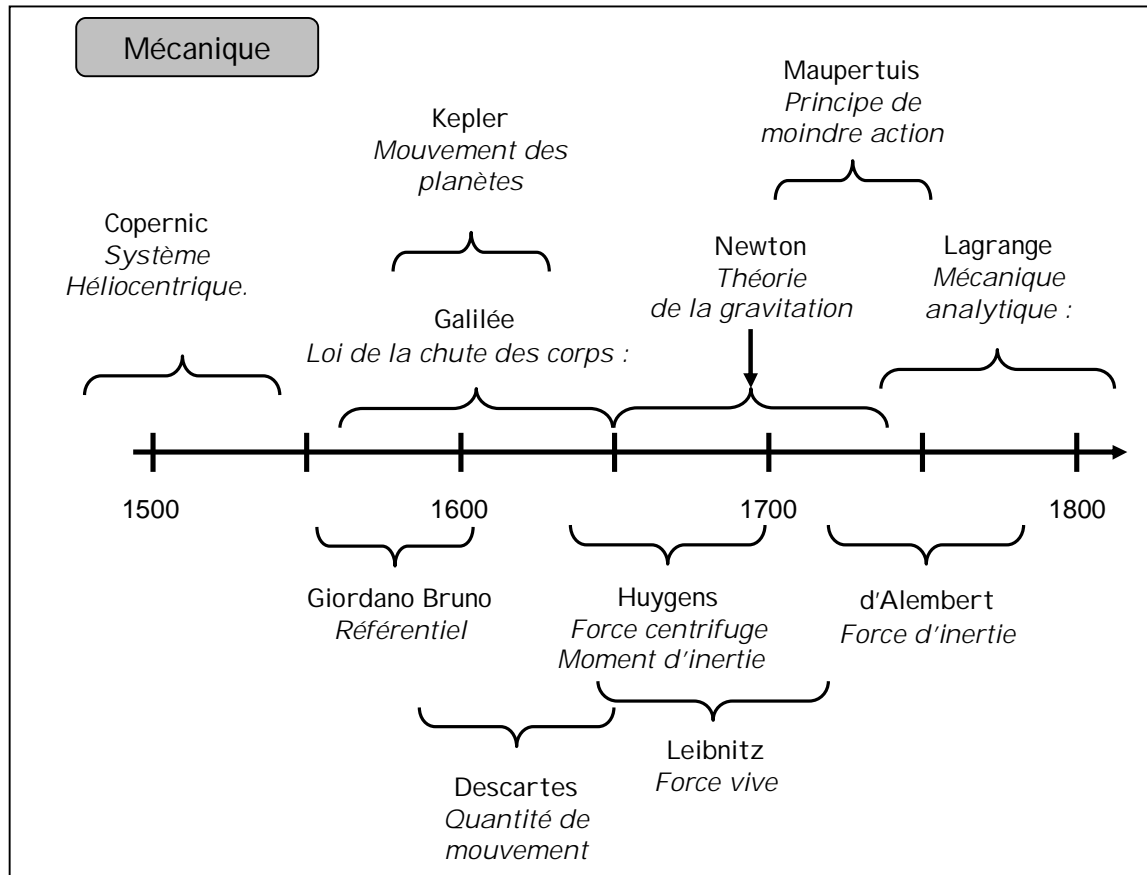


Figure VI . 5 Evolution des connaissances en mécanique de 1500 à 1800

Lagrange introduit en 1788 la mécanique analytique dont le but est de traiter l'ensemble des problèmes de la mécanique par une méthode purement analytique.

Au lieu de baser la mécanique sur le concept de force, qui s'avèrera par la suite inutile dans les théories de la relativité et de la mécanique quantique⁵⁸, Lagrange introduit deux fonctions : T et V , qui seront identifiées par la suite à l'énergie cinétique et à l'énergie potentielle ⁵⁹ et montre que leur somme

$$T + V = H$$

est une constante *laquelle renferme le principe des force vives*.

⁵⁸ Dans la théorie de la relativité c'est le concept de champ qui est le plus adapté, en mécanique quantique on considère les énergies.

⁵⁹ Lagrange appelle "*force vive*" l'énergie cinétique et n'utilise pas le terme d'énergie potentielle. Le mot "*énergie*" a été utilisé pour la première fois par Young en 1803 et c'est Rankine qui, en 1853, a introduit le concept d'*énergie potentielle*. Signalons que dans l'édition de 1965 du cours de mécanique de Bruhat le théorème de l'énergie cinétique est encore appelé "*théorème des forces vives*".

A partir du principe de moindre action, Lagrange montre que tous les problèmes sont ramenés à un seul type d'équation différentielle⁶⁰ que nous écrivons actuellement:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

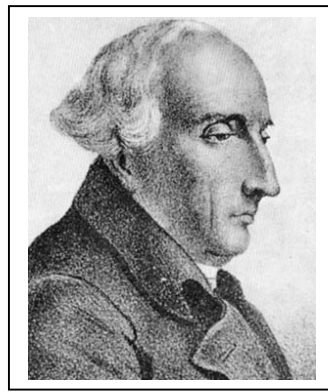
où q_i est une coordonnée quelconque et $L = T - V$ est la fonction de Lagrange qui sera introduite par la suite.

Là encore Ernst Mach trouve un exemple de théorie qui répond à sa philosophie

La mécanique de Lagrange réalise un progrès considérable dans l'économie de la pensée⁶¹.



Leonhard Euler
1707 – 1783



Joseph Louis Lagrange
1736-1818

Au milieu du dix neuvième siècle, Hamilton propose des équations, basées sur le principe de moindre action, qui ont l'avantage de se présenter sous la forme d'un système d'équations différentielles du premier ordre alors que celles de Lagrange sont du second ordre. Les travaux de Hamilton, Jacobi et Poisson achèveront la construction de la mécanique analytique.

⁶⁰ Lagrange utilise les coordonnées cartésiennes, alors que Euler considérait les coordonnées intrinsèques de la force, ce qui est moins simple. Le concept de vecteur et l'analyse vectorielle n'ont été introduits qu'à la fin du dix neuvième siècle par Gibbs et Heaviside. Maxwell et les savants anglais utilisaient les quaternions.

⁶¹ Mach page 436