Chapitre V : LA RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE

4.1 Au delà des causes premières : la tradition mécanique

4.1.1 Galilée (1564, 1642)

4.1.1.a Éléments biographiques

Né à Pise dans une famille aisée, Galilée était destiné par son père à devenir médecin. Pendant ses études de médecines, il commence à s'intéresser aux mathématiques et particulièrement à Archimède. Le père de Galilée ne voit pas d'un très bon oeil cette passion, qu'il espère passagère. Après tout, les revenus d'un médecin sont 30 fois plus élevés que ceux d'un mathématicien. Néanmoins, la décision de Galilée est bientôt prise. Il se consacrera aux sciences.

En 1581, âgé de 17 ans, il remarque, lors d'un tremblement de terre, que les candélabres de la cathédrale de Pise oscillent à une fréquence régulière. Pour mesurer le temps entre le début de chaque oscillation, il se sert de son pouls. En 1586, il développe une balance hydrostatique qui lui apporte une certaine renommée.

Son étude de la supernova de 1604 confirme ce que Tycho-Brahé avait montré trente ans auparavant, que la supernova ne se déplace pas parmi les étoiles. Elle fait donc partie du monde céleste. Galilée devient un copernicien convaincu. Ses travaux lui cause des ennuis et il va se réfugier à Venise où il bénéficie d'une protection et où il lui est possible de continuer ses travaux.

La publication de son *Messager céleste* en 1609 provoque des remous. Il y décrit ce que la lunette qu'il a pointée vers le ciel lui a permis de voir. [Voir l'article de Stengers et Gilles]

Très conscient de la valeur des résultats de ses travaux ainsi que de la brèche qu'ils font dans le système aristotélicien, Galilée décide de se faire missionnaire de sa vision du monde. En 1611, il va à Rome où il tente de montrer que la Bible recèle des passages en accord avec le système de Copernique. Mais, malgré sa verve, ou peut-être cause d'elle, il a peu de succès. En 1616, le pape Pie V déclare le système de Copernique une hérésie. Galilée doit se faire moins tapageur.

En 1632, Galilée publie son *Dialogue sur deux grands systèmes du monde*. Pour certains, le livre a le défaut d'être écrit en italien. Mais Galilée est confiant. Il se croit protégé par le pape. Les systèmes de Copernique et de Ptolémée y sont discutés, mais l'auteur préfère clairement le premier. Galilée a bien mal calculé les réactions de la curie romaine. D'autant plus que le pape se sent personnellement attaqué lorsqu'il constate qu'un des arguments qui est ridiculisé dans le livre ressemble étrangement à un de ses propres arguments, qu'il avait opposés à Galilée lors d'une conversation quelques années auparavant.[1] Galilée s'était fait d'autres ennemis. Ainsi, les jésuites du *Collegio Romano*, pourtant à l'origine favorables aux travaux de Galilée, avaient été

---

1 Le pape était alors cardinal. Dans le *Dialogue...* , l'argument en question était présenté par Simplicius, un personnage qui soutenait la cosmologie aristotélicienne et le système de Ptolémée.

détournés de lui à la suite de manoeuvres malheureuses de Galilée lui-même. Au cours de cette période de sa vie, Galilée, avec son caractère peu amène, se nuit souvent à lui-même.

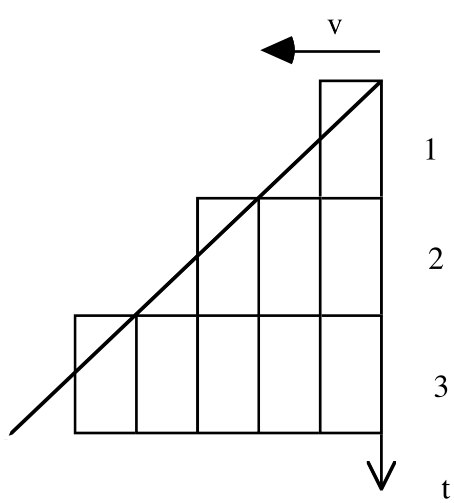
On intente un proçès en 1633. Galilée doit renoncer publiquement au système de Copernique. Il est placé en résidence surveillée près de Florence. Il y restera jusqu'à la fin de sa vie. On lui permet néanmoins de continuer ses travaux. C'est ainsi que maintenant aveugle, il dicte un très grand livre, le *Discours sur deux nouvelles sciences* publié en 1638. Galilée meurt en 1642, l'année de la naissance de Newton.

4.1.1.b La Terre tourne-t-elle ? (1632 : Dialogue sur les deux systèmes du monde)

Voir l'article d'Isabelle Stengers et de Didier Gilles.

4.1.1.c Le mouvement accéléré : quantification du mouvement.

Voir l'extrait no. 9. (*Discours sur deux nouvelles sciences*, 1638)



La théorie mathématique qui sous-tend l'expérience de Galilée décrite dans le texte est simple. Elle repose sur un principe énoncé par Oresme, un collègue de Buridan. Ce principe, juste, dit que la distance parcourue en un temps donné par un mobile dont la vitesse augmente uniformément est égale à la distance parcourue par un autre mobile dont la vitesse est constante et égale à la vitesse du premier mobile à mi-temps de sa course. Dès lors, pour un corps qui accélère uniformément, la distance parcourue après une unité de temps est égale à la vitesse après la moitié de l'unité de temps multipliée par l'unité de temps. (Voir la figure ci-dessus) Autrement dit, la distance parcourue en une unité de temps est égale à l'aire du rectangle dont la base correspond à une unité de temps et la hauteur à la vitesse après une demi-unité de temps.[2] Répétant ce raisonnement pour le temps 2, puis le temps trois, etc., on voit que la distance

---

[2] Plus généralement, la distance parcourue par un mobile est égale à la surface sous la courbe de la vitesse : $s = \int v dt$.

parcourue après un temps t est proportionnel à la série 1 + 2 + 3 + ... + (2t-1). Or, la somme des n premiers nombres impairs est égale à n^2.[3] Dans le langage des proportions utilisée à l'époque de Galilée, la loi devient:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}.$$

Caractéristiques du nouveau style scientifique :

- Mesures quantitatives et donc importance des instruments de mesure
- Contrôle des variables :
  Ceteris paribus ,
  Répétition un grand nombre de fois d'une même expérience,
  Description précise des expériences pour qu'elles puissent être reprises à volonté.
- Expériences planifiées (elles ont un ou des buts prédéterminés)
- Les lois sont descriptives et ne sont pas "explicatives".
  (Par exemple, la loi du rapport des distances et des carrés des temps)

On peut résumer la méthode expérimentale de Galilée par le diagramme suivant :

Expériences et observations

↓

Généralisation
(Principes physiques)

↓

Modèle mathématique
(Théorie déductive)

Mathématiques, le langage
de la nature

↓

Prédictions

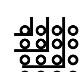
↓

Probabilité accrue de l'adéquation
entre la réalité et le modèle physique.
Justesse "psychologique".

Vérification expérimentale

L'approche de Galilée se démarque de celles des traditions organique et mystique (magique). Certes l'importance de la mesure rappelle l'importance des nombres dans la tradition magique. Toutefois, Galilée ne cherche pas à aller au-delà de la description des relations numériques entre

---

3 Ce résultat se démontre facilement en utilisant le diagramme pythagoricien suivant:  . On y voit que le nième nombre carré est formé de la somme des n premiers nombres impairs.

les variables numériques qui permettent une description numérique du phénomène. Il accepte ces relations pour ce qu'elles sont: une description. Il regarde les phénomène comme un ingénieur regarde une machine fonctionner. Il est un digne successeur d'Archimède. C'est pourquoi la nouvelle tradition qui émerge est appelée la tradition mécanique.

4.1.2 Descartes (1596, 1650)

4.1.2.a Le *Discours de la méthode* (1637)

Extrait du *Discours de la méthode* (1637) :

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

Remarquons la tendance à ordonner les connaissances pour les intégrer dans une structure de type axiomatique. Le besoin de diviser les problèmes pour mieux les étudier pointe par ailleurs vers une spécialisation progressive de la recherche.

4.1.2.b Importance des mathématiques et explications mécaniques

Voir le texte 8.*Principia Philosophiæ* (1644)

La méthode expérimentale de Descartes reprend celle de Galilée, mais avec une plus grande importance donnée à la modélisation mathématique et une conscience plus explicite du rôle des mathématiques dans la production de prédictions qui seront à vérifier expérimentalement.

Descartes voit le monde comme une immense machine. De ce fait, il accepte mal l'idée mise de l'avant par Kepler qu'il y a des actions à distance. Il revient à la position grecque voulant que les actions se font par contact. Dès lors, il reprend l'affirmation d'Aristote que le vide n'existe pas. Dans cette voie, il édifie une théorie dite des tourbillons qui tente d'expliquer mécaniquement le mouvement des planètes par la combinaison de tourbillons de matière subtile interplanétaire. Descartes se démarque de Galilée dans le sens que, contrairement à ce dernier, il ne se satisfait pas toujours d’un modèle mathématique. Il a des relents d’aristotélisme en cherchant à remonter à des causes premières, comme avec les tourbillons. Il faut dire que dans sa théorie des tourbillons Descartes ne donne pas aux mathématiques la place qu’il annonce, dans ses écrits sur la méthodologie, devoir lui réserver.

4.2 Le grand amphibien : Isaac Newton (1642, 1727)

4.2.1 Éléments biographiques

- Comme enfant, il ne manifeste aucune qualité intellectuelle particulière.
- À 8 ans, il est retiré de l'école et travaille à la ferme de sa mère.
- Son oncle, professeur au Trinity College de Cambridge, remarque le jeune Isaac.
- 1660. Newton va au Trinity College.
- 1665. Il termine ses études sans distinction spéciale.
- 1665. La peste se répand à Londres. Newton retourne donc à la ferme de sa mère. Il y restera deux ans.
- Au cours d ces deux années, il développe sa théorie de la gravitation universelle, commence à mettre au point son calcul différentiel et intégral et fait des expériences d’optique.
- 1667. Il revient à Cambridge. Néanmoins il parle peu de ses nouvelles idées.
- 1668. Il fabrique son premier télescope (un miroir parabolique, et non des lentilles, agrandit l'image). Le télescope le fait connaître et lance véritablement sa carrière.
- 1669. Son professeur, Barrow, lui cède sa chaire de mathématiques. Newton la gardera jusqu'en 1696.
- 1684. Son collègue Halley[4] apprend que Newton peut montrer que les orbites elliptiques du système de Kepler peuvent être calculées à partir de la loi disant que la force d’attraction entre deux corps est inversement proportionnelle au carré de leur distance. Il convainc Newton de publier sa théorie. Newton commence à s’intéresser à la théologie et au problème de la transmutation des métaux en or.
- 1687. Publication de *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* . Ce livre, l’un des plus importants de l’histoire des sciences, est écrit dans un style purement géométrique, conformément au style de la majorité des livres mathématiques de l’époque. Ce conformisme souligne le tempérament très prudent du grand homme.
- 1689. Il est élu à la chambre des communes.
- 1692. Il passe par une période dépressive.
- 1696. Il quitte l’université pour travailler à la Monnaie. Il y améliore les procédés de fabrication. En 1699, il devient Maître de la monnaie.
- 1704. Il publie L’*Optique* .

---

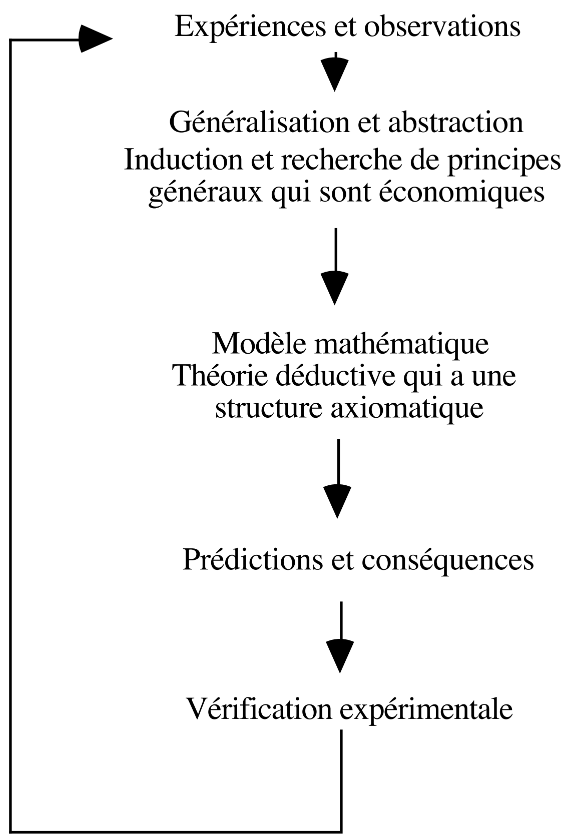
4 Celui de la comète de Halley.

4.2.2 La méthode de Newton

4.2.2.a La méthode de Newton : Théorie abstraite versus monde réel

La méthode de Newton reprend dans les grandes lignes celle de Galilée. Toutefois, Newton subit l'influence de Descartes. Le rôle des mathématiques y est encore plus accentué. Il raffine aussi l'interaction entre la théorie et les expériences visant à vérifier les prédictions de la théorie.

Le tableau suivant schématise la méthode de Newton.



Généralisation et abstraction :
Newton cherche à aller bien au-delà des apparences. Il veut construire un modèle qui soit économique, c'est-à-dire qui repose sur un petit nombre d'énoncés desquels il sera possible de déduire les propriétés du modèle. En édifiant sa théorie de la gravitation, Newton isole quelques variables qui lui sont apparues importantes à la suite d'observations et d'expériences et qui lui paraissent pouvoir jouer un rôle central dans un modèle mathématique. Il joue mathématiquement avec elles afin d'étudier les différentes façons d'établir des relations entre elles. Il peut alors pressentir la structure du modèle le plus économique. C'est au cours de cette étape que Newton a compris l'importance de l'inertie qui pourtant n'est pas quelque chose qui se voit. C'est aussi au cours de cette étape, étudiant les calculs de Kepler, que Newton a perçu le lien mathématique

entre la troisième loi de Kepler (le carré de la période de révolution d’une planète est proportionnel au cube du grand axe de son orbite) et la loi de la gravitation universelle.

Modèle mathématique à structure déductive :
Le modèle que suggère le travail préliminaire est alors mis en forme. La géométrie d’Euclide sert de paradigme à la structure du modèle à construire. Le modèle de la gravitation repose donc sur des définitions, trois axiomes de mécanique générale et un principe (la loi de la gravitation universelle) :

Axiomes
- Loi d’inertie,
- F = ma,
- Action égale réaction.

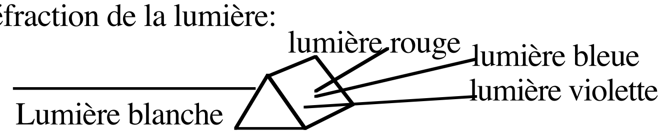
Loi de la gravitation universelle:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{d^2}.$$

De ces axiomes et de cette loi, Newton déduit les lois de Kepler et ainsi fait reposer la cosmologie sur quelques énoncés. Notons que tout cela aurait été impossible sans le calcul différentiel et intégral que Newton a développé précisément pour arriver ses fins.

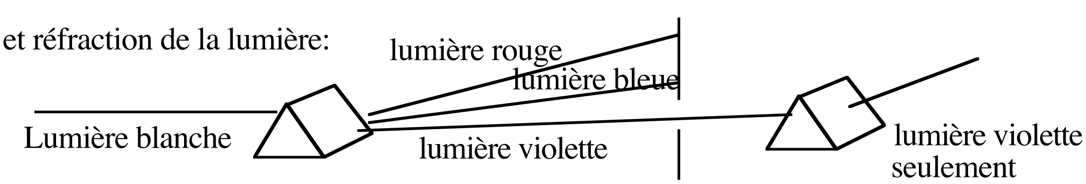
Prédictions et conséquences   et   **vérification expérimentale** :
La forme déductive du modèle permet d’exhiber clairement les liens entre les énoncés fondamentaux et les diverses conséquences logiques de ces énoncés. Ces conséquences, ou prédictions, devront être vérifiées expérimentalement. Ces conséquences ont d’autant plus d’intérêt qu’elles correspondent à des phénomènes non encore observés. Elles devraient idéalement pouvoir faire l’objet de mesures numériques. Un modèle aura d’autant plus d’intérêt qu’il aura permit de prévoir de tels phénomènes et que ceux-ci auront fait l’objet de vérifications. Pour préciser, voici un exemple, non numérique, tiré de l’*Optique* de Newton. Ce dernier veut vérifier sa théorie voulant que la lumière blanche soit composée de plusieurs lumières (théorie qui découle de la célèbre expérience du prisme de verre) et que chacune de ces lumières particulières est réfractée suivant un angle de réfraction qui lui est propre.

Prisme et réfraction de la lumière:



Cette hypothèse implique qu’une lumière pure ne saura pas diviser en plusieurs autres lumières. Pour vérifier, il faut prendre un rayon de lumière pure, disons la lumière violette, et lui faire subir une réfraction dans un prisme.

Prisme et réfraction de la lumière:



Le fait de vérifier que le phénomène prévu se produit vraiment ne veut toutefois pas dire que le modèle est juste ou vrai. Newton est conscient que plusieurs modèles peuvent reproduire adéquatement un même phénomène. Si on découvre une façon d'établir des liens entre des variables physique, cela n'exclut pas qu'il puisse exister d'autres manières d'établir ces liens.

4.2.2.b La méthode de Newton et les trois traditions

Newton est clairement un adepte de la tradition mécanique. Les modèles qu'il privilégie sont des modèles mathématiques dans lesquels les causes premières sont absentes. Par exemple, dans son *Principa Mathematica*, Newton est conscient qu'il ne peut connaître la nature de la force de gravitation.

La vision mécanique de Newton va plus loin que celle de Galilée. En effet, elle recherche la forme la plus économique possible, le mot économique étant pris au sens de minimiser le nombre de lois fondamentales et d'axiomes sur lesquels repose le modèle. Les mathématiques sont avant tout le langage des modèles et non pas celui de la nature. Au fond nous ne connaissons pas la nature, mais seulement les modèles qui nous permettent de prévoir certains de ses comportements. De ce point de vue, Newton est, jusqu'à un certain point de vue, un platonicien. La seule connaissance accessible aux hommes est celle des modèles, modèles qui n'existent pas dans la nature, dans le monde réel. Ces modèles, idéalement mathématiques, ne participent-ils pas aux Idées de Platon?

Mais Newton n'est pas un platonicien pur. Ses modèles sont le fruit des observations et des expériences. Les êtres abstraits qui constituent les modèles sont le fruit du travail des hommes. Voilà une perception très aristotélicienne du monde. D'ailleurs, la structure même des *Principia Mathematica* , avec ses définitions, axiomes, propositions, est celle proposée par Aristote deux mille ans plus tôt.

Newton est donc véritablement un grand amphibien. Il est à l'aise partout car il a su dépasser les frontières qui séparaient les trois traditions auxquelles il s'est abreuvé. Avec Newton, la science change profondément. Après lui, rien ne sera plus pareil.