

# L'EXPERIENCE DE CAVENDISH

## I - De l'observation astronomique à l'expérience de laboratoire

**Marie-Laure Spagnol**

Observatoire de Lyon

**Résumé** : Dans cette série d'articles nous allons retrouver le cheminement qui a conduit à la détermination de la constante de la gravitation universelle  $G$ .

Dans ce premier article, nous verrons comment les astronomes sont arrivés lentement à l'idée de l'existence d'une force d'attraction entre tous les corps. Dans les articles suivants, nous décrirons l'expérience de Cavendish et l'expérience de Boys qui toutes deux conduisirent aux premières déterminations de cette constante fondamentale. Nous relaterons aussi notre réalisation de cette expérience qui est d'une difficulté extrême.

**Mots-clefs** : GRAVITATION - EXPERIENCE - HISTOIRE

## Introduction

Les constantes universelles régissent toute la physique. Leurs valeurs, exprimées dans les unités fondamentales, sont imposées aux physiciens par la nature. Elles sont capitales dans l'homogénéisation et dans la quantification des lois de la physique. La constante de gravitation universelle  $G$  fait partie de ces constantes fondamentales. Elle établit l'homogénéité dans la loi de I. Newton entre la force, les masses et les distances.

La gravitation est partout ; en tout point de la Terre nous ressentons ses effets et observons ses conséquences. C'est elle qui nous fait garder les pieds sur Terre. Elle est aussi responsable de la forme des trajectoires des astres célestes.

Aujourd'hui, cette force universelle nous paraît évidente. En réalité elle n'a été comprise quanti-

tativement qu'à partir du XVII<sup>e</sup> siècle par I. Newton qui bouscula ainsi la vision de l'univers de l'époque basée sur des explications philosophiques et des résolutions géométriques. Mais, comment la théorie de Newton et toutes ses conséquences, se sont-elles imposées face aux modèles implicites de l'antiquité ?

La physique est une science exacte fondée sur une confrontation des théories avec l'expérience. La loi de la gravitation de Newton décrit parfaitement des observations faites à l'époque mais son auteur ne chercha pas à la quantifier plus précisément.

Il faut attendre environ un siècle pour que Henry Cavendish détermine le paramètre reliant la force d'attraction au produit des masses divisé par leur distance au carré, c'est-à-dire la constante de la gravitation universelle  $G$ .

Cette mesure requiert un dispositif expérimental complexe qui sera amélioré par la suite mais le principe novateur restera.

On peut s'interroger sur les raisons de cette expérimentation tardive. La raison tient sans doute à l'extrême difficulté d'une telle mesure. La valeur précise est encore mal connue et sa détermination suscite encore l'intérêt des physiciens.

## Ebauche d'une théorie par Aristote et ses successeurs.

Les premières interrogations sur l'origine des forces remontent à l'antiquité, lorsque les Grecs commencent les premières réflexions sur la chute des corps et sur les lois qui en découlent, régissant l'univers.

Les corps célestes sont classés en trois catégories : les *Lumineux*, comme la Lune ou le Soleil, les *Planètes* dont le mouvement est circulaire et les *Etoiles* qui sont fixes sur la sphère céleste.

Par simple observation du ciel, les astronomes constatent que les corps célestes ont un mouvement 'circulaire'.

Aristote (Stagire 384 avant J.-C. – Chalcis 322 avant J.-C.), dans une œuvre de plusieurs dizaines de volumes, aborde des domaines très variés de la science, comme la physique, la botanique, la médecine. Il va développer un modèle basé sur l'observation et le raisonnement intuitif.

La grande préoccupation de l'époque est la chute des corps. Aristote postule de manière subjective, que les corps les plus lourds sont ceux qui subissent la plus grande attraction de la part de la Terre.

Il base sa réflexion sur deux qualités absolues : le lourd et le léger. Il distingue les corps légers, comme le feu, auxquels sont associés un mouvement vers le haut et les corps lourds, comme la Terre, dont le mouvement est dirigé vers le bas. Pour lui, tout corps possède un mouvement qui lui est propre, exprimant sa tendance à rejoindre son milieu «naturel».

Selon cette théorie, le monde possède deux parties distinctes :

- Le monde *sublunaire* (ou terrestre), imparfait et changeant, composé des quatre éléments : la Terre, l'eau, l'air et le feu.
- Le *cosmos* : représentant le monde céleste, parfait et éternel, constitué de la Lune, du Soleil, des planètes et des étoiles.

Ces deux mondes se différencient par leurs degrés de perfection et permettent de décrire avec cohérence l'univers par rapport aux observations faites à l'époque.

L'univers est basé sur cette séparation absolue entre les deux mondes mais aussi sur deux autres principes fondamentaux :

- La Terre est immobile au centre de l'univers.
- Les seuls mouvements célestes possibles sont des mouvements uniformes.

Aristote pense que le fait de ne pas ressentir les effets engendrés par le mouvement de la Terre, démontre qu'elle est immobile dans l'univers et que les astres se déplacent sur des sphères célestes tournantes centrées sur la Terre. Plus tard, l'église, grande puissance politique et culturelle, adopte la théorie d'Aristote. Contredire cette vision du monde, revient à combattre l'Eglise. C'est pourquoi la théorie d'Aristote fut si longtemps conservée.

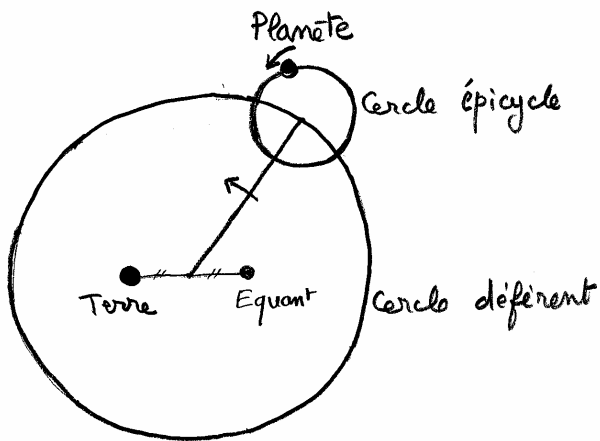
Certes, un astronome grec, Aristarque de Samos, eut l'idée, contradictoire par rapport à la théorie d'Aristote, que le soleil était au centre de l'univers et par conséquent que la Terre tournait autour de lui une fois par an. Il inventa même une méthode lui permettant de calculer les distances relatives de la Terre à la Lune et de la Terre au Soleil. Mais il fut conduit à conclure que le Soleil était plus gros que le Péloponnèse et pour cette raison il fut banni.

Par la suite, l'alexandrin Claude Ptolémée (100-170), encore un astronome grec, va s'appuyer sur la vision aristotélicienne de l'univers géocentrique pour obtenir la position des astres (comprenez des planètes). Il propose dans son «Almageste», une quantification précise des mouvements avec un système mathématique cohérent qui restera incontesté pendant près de quatorze siècles. Dans sa description de l'univers, les astres décrivent des grands cercles, les cercles *Déférents*, et afin de reproduire plus précisément le mouvement des

planètes, il ajoute des combinaisons de petits cercles, les épicycles.

Ce système lui permet de prévoir des phénomènes comme les éclipses de Lune et de Soleil.

Ce système sera amélioré mais aussi compliqué par augmentation du nombre d'épicycles afin d'être en accord avec les observations.



A.C. Ptolémée constate que la vitesse d'une planète n'est pas uniforme sur son orbite, il va donc placer les centres des cercles *Déférents*, à mi-chemin entre la Terre et un point particulier, le point d'*Equant*. Par conséquent le centre de l'orbite des planètes n'est plus rigoureusement la Terre. Ceci représente, de fait, une première contradiction par rapport au strict principe géocentrique de l'univers. Ce système permet néanmoins de construire des tables astronomiques précises pour la navigation et l'élaboration du calendrier.

La période du moyen âge, qui suivit, ne fit guère progresser la mécanique et la vision d'Aristote fut conservée.

## Les prémisses d'une nouvelle vision de l'univers

Il faut attendre Nicolas Copernic (1473 – 1543), un chanoine astronome polonais, pour révolutionner cette vision du monde.

Il s'intéresse au calendrier, mais aussi au problème du point d'*Equant*. Il est le premier à étudier le système héliocentrique qui simplifie les calculs. Mais pour expliquer l'alternance du jour et de la nuit il faut faire intervenir la rotation de la Terre sur elle-même. La Terre ne serait donc ni

immobile, ni au centre du monde. Contrairement à ce que l'on pense, il ne démontre pas l'héliocentrisme, son argumentation est simplement basée sur le fait que ce modèle est plus simple et plus logique.

Malgré toutes ces avancées, Copernic avait encore une grande question :

*Si la Terre tourne sur elle-même et se déplace à travers l'espace, pourquoi est-ce que nous ne ressentons rien ?* Pour répondre à cette question, il faudra attendre les grandes découvertes de Galilée. On comprend mieux pourquoi Galilée a introduit le principe affirmant que « *le mouvement est comme rien* ».

Copernic écrit un ouvrage «*De Revolutionibus Urbium Coelestium*» où il expose ses hypothèses d'un univers héliocentrique. Ce livre passe inaperçu, aux yeux de l'église mais aussi de la communauté scientifique, jusqu'à ce que certains savants voulant développer ses idées, le fasse connaître.

Parmi eux, Tycho Brahé (1546-1601), un grand observateur et constructeur d'instruments de grandes précisions, observe une conjonction entre Saturne et Jupiter. Il constate que les tables astronomiques de N. Copernic, fondées sur le modèle héliocentrique, prédisent le phénomène avec plus de précision que celles de Ptolémée. Avec l'aide de Kepler, il crée des tables astronomiques basées sur l'observation.

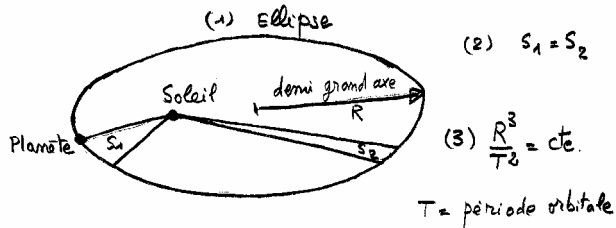
Il remet en cause les théories d'Aristote en observant une comète en 1577, où il constate que les sphères célestes n'existent pas car la comète n'appartient pas au monde sublunaire et son orbite coupe celles des autres planètes. Il met donc en défaut la théorie d'Aristote basée sur deux mondes distincts.

Képler (1546-1601) est un mathématicien doté d'un grand intérêt pour l'astronomie. Il impose un nouveau système héliocentrique où il introduit des polygones fondamentaux inscrits dans les sphères : il géométrise l'espace.

Il découvre, à partir des observations de Tycho Brahé, que les orbites des planètes ne sont pas des sphères mais des ellipses dont le soleil occupe l'un des foyers.

Il énonce ses trois lois célèbres :

- 1) Chaque planète décrit, dans le sens direct, une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers.
- 2) La ligne qui joint le Soleil à la planète balaye des surfaces égales en des temps égaux.
- 3) Le carré de la période de révolution divisé par le cube de la distance au Soleil est une constante. Elle est la même pour toutes les planètes :  $T^2/R^3 = \text{constante}$ .



Ces lois ne s'appliquent pas uniquement aux planètes en mouvement autour du Soleil mais aussi à la Lune qui tourne autour de la Terre (mais la constante de la troisième loi est alors différente).

Dans ces lois, Kepler met en relation les paramètres de position et de vitesse. En réalité, il anticipe sur la notion de la gravitation sans l'établir car il lui manque des principes fondamentaux de la mécanique. Il est convaincu qu'une force d'attraction s'exerce entre deux corps, mais il ne sait pas l'expliquer car à cette époque la seule force attractive à distance connue est la force magnétique.

Mais, malgré ces avancées scientifiques qui confirment les observations, le système de Ptolémée reste en vigueur, car il est conforme à la doctrine de l'Eglise.

Galilée (Pise 1564 – Arceti 1642), est un physicien et un astronome Italien, que l'on reconnaît comme le père de la physique moderne. Il impose le rôle décisif de l'expérience et des mathématiques. Il enseigne l'astronomie officielle, conformément à la volonté de l'église, bien qu'il soit convaincu par la représentation de l'univers de Copernic et Képler. Il va chercher des arguments qui permettent de la démontrer et de la faire adopter. Il utilise la lunette astronomique, qui lui permet de faire des grandes découvertes en ce qui concerne le monde céleste. En observant la Lune et Jupiter il découvre trois petites étoiles qui gravitent autour (les satellites de Jupiter). Il obtient ainsi la preuve

que la Terre n'est pas au centre de tous les mouvements célestes et que sa nature n'est pas différente de celle de Jupiter. Il n'y a donc plus deux mondes distincts, c'est une contradiction au modèle d'Aristote.

Il étudie la chute des corps avec la célèbre expérience de la tour de Pise dont il déduit que le temps de chute est le même pour tous les corps quel que soit leur poids, leur taille et leur nature. C'est-à-dire que la vitesse de la chute libre est la même pour tous les corps. Il n'y a donc plus de léger ou de lourd, tous les corps possèdent un principe interne qui les dirige vers le bas et nous savons aujourd'hui qu'il s'agit de la gravité.

Par l'expérience, il découvre la notion de force et formule le principe d'inertie. Il a l'idée d'une force de frottement, en constatant que si l'on peut réduire les frottements, le corps conserve son mouvement. C'est ainsi qu'il fit la première formulation du principe d'inertie : Tout corps possède une certaine *inertie* qui l'oblige à conserver sa vitesse, à moins qu'une force extérieure, une force de frottement par exemple, ne l'oblige à arrêter le mouvement. C'est une loi capitale qui touche toute la physique et permet de faire des grandes avancées.

Il postule les mêmes lois sur la Terre et dans le ciel, ce qui révolutionne la physique et l'astronomie, mais ce qui lui valut les ennuis que l'on sait avec l'Eglise.



Pour avoir affirmé que la Terre n'est pas immobile, il fut jugé et assigné à résidence jusqu'à la fin de ces jours dans la banlieue de Florence. Néanmoins, il réussit à faire imposer le système Copernicien et ses grandes découvertes permettent la compréhension de la gravitation.

## Bouleversement de la mécanique par Newton

Dès la parution des écrits de Galilée «discours et démonstration mathématique concernant deux sciences nouvelles», René Descartes (1596 – 1650), lui reproche de ne pas avoir cherché les causes fondamentales des effets qu'il a observés mais qu'il a simplement pris des cas particuliers. Il défend un modèle plus unitaire, d'un monde entièrement mécanique et géométrique. Descartes explique le mouvement circulaire des planètes comme un équilibre entre une force attractive par le Soleil et une force répulsive, ce que l'on appelle aujourd'hui la force inertielle (ou centrifuge).

Depuis quelques années, une grande question anime le monde scientifique : Quelles est la force qui oblige les planètes à tourner autour du Soleil selon le mouvement décrit par les lois de Kepler ?

Isaac Newton mathématicien et physicien anglais (Woolsthorpe 1642 – Kensington 1727), bâtit toute une théorie qui répondra à cette question. Il est considéré comme l'un des plus grands scientifiques de l'histoire. C'est une rencontre avec Edmond Halley, astronome et mathématicien, qui l'encourage à reprendre ses recherches sur la gravitation universelle. Newton étudie la théorie cartésienne et parallèlement Robert Hooke travaille aussi sur le mouvement des planètes. Contrairement à ce que l'on peut penser, c'est Robert Hooke, qui, partant de l'idée d'une force répulsive, a l'idée d'une force attractive en  $1/R^2$ . Mais c'est Newton qui l'exploite et en tire toutes les conséquences. Après de nombreuses disputes entre les deux hommes, qui ne s'apprécient guère, Newton développe, non seulement le mouvement circulaire des planètes mais aussi sa théorie de la gravité universelle et de la mécanique.

Avant l'élaboration de sa théorie, il veut une confirmation expérimentale de la loi en  $1/R^2$ . C'est ce qu'il fait avec la célèbre et mythique anecdote de la pomme : obligé d'interrompre l'étude de sa théorie à cause de la peste de 1665 – 1667, Newton rentre chez lui à Woolsthorpe. En voyant une pomme tomber dans son jardin, il se pose la question : *Pourquoi la pomme tombe sur la terre alors que la lune ne tombe pas ?* C'est la force

d'inertie qui compense la chute (voir CC95 p. XVIII) et permet à la Lune de tomber vers la Terre sans jamais l'atteindre.

Newton publie en 1687 «Philosophia Naturalis Principia Mathematica» (principe mathématique de la philosophie naturelle). Ce livre marque un tournant dans l'histoire mais il est responsable d'incidents car Robert Hooke déclare que Newton lui a volé l'idée centrale : deux corps s'attirent avec une force inversement proportionnelle au carré de la distance.

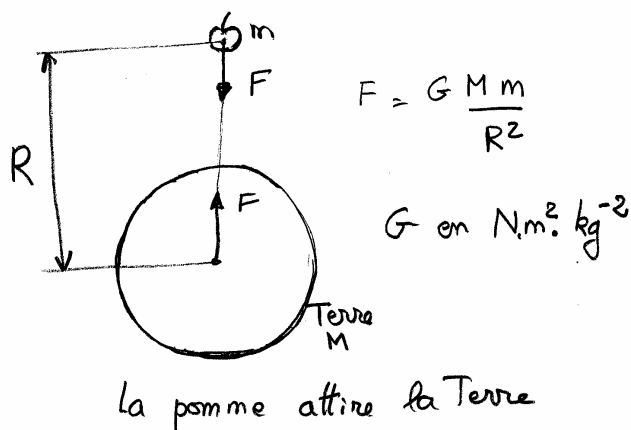
Newton en déduit les lois régissant le mouvement des objets célestes.

1) Première loi ou loi d'inertie : Tout objet en état de mouvement rectiligne et soumis à aucune force extérieure, conserve son mouvement, dans un repère galiléen.

Cette loi est la re-formulation du premier principe énoncé par Galilée. Elle implique que les planètes n'ayant pas un mouvement rectiligne, sont soumises à une force.

2) La relation fondamentale de la dynamique :  $F = m \cdot \gamma$  ( $\gamma$  est le vecteur accélération). La résultante des forces qui s'exercent sur un corps est égale au produit de la masse  $m$  par l'accélération.

3) Loi de l'action et de la réaction : si un corps A exerce sur un corps B une force  $F$  alors B exerce sur A une force opposée  $-F$ .



Quant à la force de gravitation, dont le postulat de départ est sa forme en  $1/R^2$ , elle est caractérisée d'universelle car elle devrait être valable pour deux corps quelconques de masse  $M$  et  $m$  placés à une distance  $R$  l'un de l'autre. Sa forme finale est :  $F = G \cdot m \cdot M / R^2$ , où  $G$  est la constante de gravitation universelle exprimée en  $N \cdot M^2 \cdot kg^{-2}$  pour rendre l'équation homogène du point de vue

dimensionnel. A partir de cette force et avec les trois lois qu'il a énoncées, Newton peut retrouver les lois de Képler et décrire le mouvement des planètes. De nombreuses autres prédictions viendront progressivement conforter cette première théorie de la gravitation (mouvement de la Lune, explication des marées etc...). C'est le résultat de mille années de recherches, de controverses, d'affrontements. Cependant, nul n'est encore capable de prédire l'intensité de cette force car la constante  $G$  n'est pas connue.

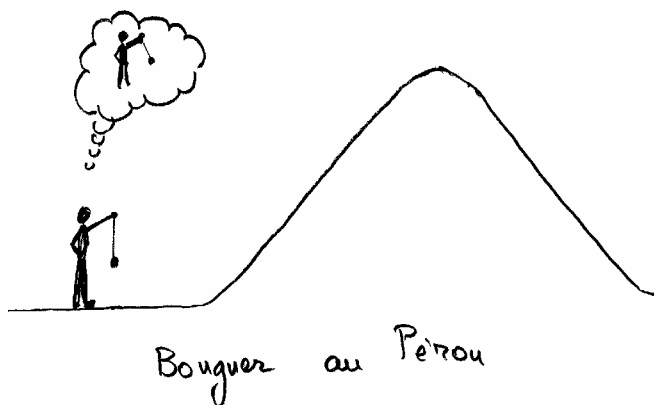
## Confirmation par l'expérience

Newton montre mathématiquement et «logiquement» sa théorie de la gravitation universelle, mais il ne la valide pas concrètement par l'expérience. En effet, Newton n'a pas pour but de quantifier la loi mais plutôt de faire des grandes avancées physiques. Il a quand-même pensé à deux méthodes qui permettent de mesurer la constante de gravitation universelle  $G$  :

- Par l'observation des perturbations que font, sur la gravitation, certaines portions de la Terre comme les montagnes.

- Par la création de ce qu'on appelait à l'époque une planète artificielle. Il s'agissait en fait simplement de deux masses dont on se proposait de mesurer l'attraction réciproque.

Le géophysicien Pierre Bouguer (1698-1758), essaye la première méthode préconisée par Newton. Il essaye de mesurer la faible variation de la position d'un fil à plomb au voisinage de la masse d'un volcan des Andes. C'est ce qu'il fait au péril de sa vie lors de l'expédition racontée par F. Tristram (voir CC95, p20). Cette expérience est un échec car les déviations obtenues sont trop faibles. Il est intéressant de constater que son but était de déterminer la densité de la Terre.



Cette méthode est reprise par deux anglais Nevil Maskelyne et Charles Hutton en 1755. Ils font des expériences concluantes au pied d'une montagne en Ecosse. Ils déterminent aussi la densité de la Terre et la trouve égale à 4,5 à 5. La force d'attraction entre deux masses est très faible, il faut donc attendre l'arrivée de nouveaux moyens techniques sensibles pour pouvoir mesurer cette force de très faible intensité. La vérification expérimentale commence grâce au travail de John Michelle qui est repris par Henry Cavendish (1798). Ce dernier, veut lui aussi trouver la densité de la Terre, mais, de fait, il prouve, par une expérience de laboratoire, la théorie de la gravitation énoncée un siècle auparavant par Newton. Par la suite, Sir Charles Vernon Boys, confirmera les expériences de Cavendish en montrant que la miniaturisation du montage, loin de faire perdre de la précision, permet au contraire d'améliorer les résultats. C'est ce que nous relaterons dans les prochains articles.

## Remerciements

Nous remercions B. Sandré et A. Petit qui nous ont communiqué de très précieux documents sur les expériences de Cavendish et de Boys. Je remercie également G. Paturol pour son aide dans la rédaction de cet article.