

# Chapitre 1 - Les trois lois de Newton

Les trois lois de Newton constituent le cœur de la mécanique newtonienne. Énoncées dans les *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (les *Principia*), elles fournissent tous les outils nécessaires pour poser et analyser un problème physique, par exemple pour prédire le mouvement d'un corps et l'évolution des forces qui s'exercent sur lui. Pour être mises en œuvre correctement, ces lois doivent être manipulées en s'appuyant sur une méthode rigoureuse.

L'objet de ce chapitre introductif est de présenter les lois de Newton, de préciser leur signification et les concepts physiques mobilisés dans ces lois. Ce chapitre évoque aussi la façon dont ces concepts ont pu évoluer dans le temps. On présente ensuite, sur un exemple concret, la méthodologie à suivre pour traiter un problème physique simple.

## I. Les *Principia* de Newton

Dans ses *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (les *Principia*), Isaac Newton pose les bases d'une nouvelle physique qui va révolutionner notre compréhension du monde. Il pose aussi une méthode d'analyse rationnelle fondée sur l'expérimentation et non sur des idéologies énoncées par principe. Il pose enfin les bases d'une théorie de la gravitation universelle, dont la puissance prédictive sera la source de découvertes considérables, notamment en mécanique céleste.

La mécanique céleste joue d'ailleurs un rôle essentiel dans la gestation des *Principia*. Le jeune Newton fait déjà le lien entre le mouvement de la Lune autour de la Terre, vu comme une chute perpétuelle de notre satellite autour de notre planète, et la chute des corps à la surface de la Terre. Cette intuition initiale permettra à Newton de comprendre que la trajectoire de la Lune illustre une situation limite de la chute d'un corps dans le champ de pesanteur terrestre. La révolution copernicienne, l'observation des trajectoires planétaires par Tycho Brahé, à partir desquelles Johannes Kepler découvrira ses trois célèbres lois<sup>1</sup>, elles-mêmes appliquées au mouvement des satellites galiléens de Jupiter, fournissent à Newton des ingrédients

---

<sup>1</sup> Première loi : les planètes décrivent une trajectoire elliptique dont le Soleil occupe l'un des foyers. Deuxième loi : le segment reliant une planète au Soleil balaie des aires égales en des temps égaux. Troisième loi : le quotient du cube du grand-axe et du carré de la période de révolution d'une planète autour du Soleil est identique pour toutes les planètes du système solaire.

conceptuels, théoriques et observationnels essentiels à son œuvre. Ultérieurement, la mécanique newtonienne et la théorie newtonienne de la gravitation permettront de calculer la trajectoire des comètes, de modéliser les marées, de déterminer la forme de la Terre, avec une précision extraordinaire, venant confirmer (et couronner) l'œuvre monumentale de Newton.

L'histoire nous dit qu'en janvier 1684, Edmund Halley exposa à Christopher Wren et à Robert Hooke une conséquence très importante de la troisième loi de Kepler : cette loi implique que la force d'attraction exercée par le Soleil sur une planète est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance planète-Soleil. Un pari s'ensuivit : une récompense d'une valeur de 40 shillings serait versée par C. Wren à celui qui démontrerait qu'une telle force en «  $1/r^2$  » implique que la trajectoire des planètes est elliptique. R. Hooke échoua dans cette entreprise mais E. Halley soumit la question à Isaac Newton. Par son rôle de stimulateur, de critique et de soutien (incluant une contribution décisive à l'impression et à l'édition des *Principia*), E. Halley joua un rôle crucial dans la diffusion de cette œuvre monumentale.

Les *Principia* comportent trois « livres » précédés de deux sections. La première, intitulée « Définitions », pose les concepts fondamentaux de la mécanique newtonienne (masse, quantité de mouvement, force, etc.). La seconde, intitulée « Axiomes, lois du mouvement », énonce les trois lois de Newton.

Ces lois, déduites essentiellement d'un certain nombre d'expériences menées notamment par Galilée, permettent de comprendre et de prédire le comportement d'une multitude de systèmes physiques. Passons en revue ces lois.

## II. La première loi : inertie et mouvement rectiligne uniforme

La première loi de Newton peut être formulée ainsi :

*Un corps persiste dans son immobilité ou dans son mouvement de translation rectiligne et uniforme dès lors qu'il n'est soumis à aucune force externe.*

### II.1. Inertie, mouvement naturel d'un corps

Cette loi reprend la **loi de l'inertie**, formulée antérieurement par Galilée pour des mouvements horizontaux à la surface terrestre, puis amendée et généralisée par Descartes. Jusqu'à cette époque, on croyait qu'il faut appliquer une force à un corps pour qu'il persiste dans son mouvement (de translation par exemple), en vertu notamment d'un principe énoncé par Aristote : « partout où il y a mouvement, il y a une force externe à l'origine de ce mouvement ». Ce principe aristotélicien se comprend dans la mesure où toutes les situations observées sur Terre, à cette époque, indiquaient qu'il faut agir sur un corps pour le faire se mouvoir. Le tour de force de Galilée et de Newton a été de dépasser ces situations concrètes pour imaginer une

situation idéale, jamais observée sur Terre, pour laquelle un corps n'est réellement soumis à aucune force externe.

La première loi redéfinit ainsi le mouvement naturel d'un corps, en l'absence de toute influence externe, en invoquant la notion d'**inertie**, qui est la tendance d'un corps à résister à tout changement de mouvement. La deuxième loi de Newton introduira une quantité décrivant quantitativement cette capacité de résistance au changement.

## II.2. Force, action exercée sur un corps

En outre, la première loi porte en elle la notion de **force** ou d'influence **externe**, définie par Newton comme une action exercée sur un corps pour modifier son état d'immobilité ou son mouvement de translation rectiligne et uniforme. Les formes revêtues par cette action sont variées, comme le souligne Newton dans la définition n°4 des *Principia* : « la force imprimée peut avoir diverses origines, choc, pression, force centripète ». La notion d'action externe est très intuitive lorsqu'on parle de force de contact : force de traction, de réaction d'un support, de frottement, etc. Elle l'est moins lorsqu'il s'agit d'une force agissant à distance, par exemple de la force de gravité qui s'exerce entre la Terre et la Lune : comment la Lune peut-elle « savoir » que la Terre exerce sur elle une force gravitationnelle ?

En tout état de cause, une force est caractérisée par un vecteur : elle a une direction, un sens et une intensité. Les forces appliquées sur un corps se combinent selon le principe de superposition et de la force « nette » : l'effet de plusieurs forces sur un corps est la somme des effets de chacune des forces appliquées. On reviendra sur la notion de force dans le cadre de la deuxième loi.

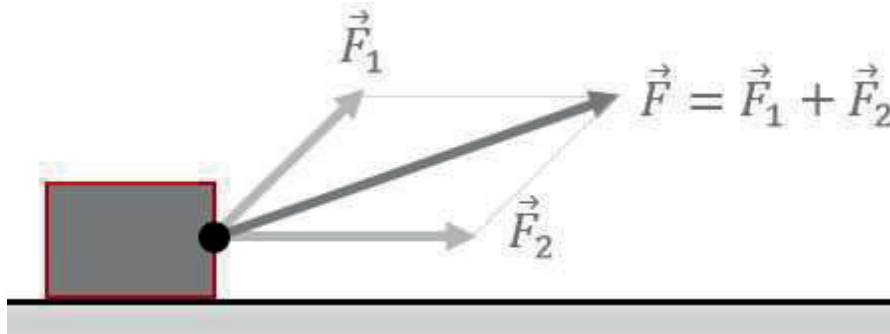


Figure 1-1 (principe de superposition) : l'effet cumulé des deux forces  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  est identique à l'effet d'une seule force  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ .

## II.3. Référentiels inertiels

La première loi requiert implicitement l'usage d'un **référentiel**, mais comment définir celui-ci ? Pour déterminer si un corps est immobile ou en mouvement, il faut rapporter sa position à un système de référence « faisant foi ». Dans certains

référentiels, la première loi n'est pas satisfaite. Par exemple, imaginons être à bord d'un bus en accélération sur une route plane et horizontale, et posons un ballon, sans lui donner de vitesse initiale, sur le plancher de ce bus : le ballon se met à rouler sur le plancher de ce bus, alors que dans le référentiel fixe par rapport au bus, ce ballon ne subit aucune force externe<sup>2</sup>. Ce référentiel n'est donc pas adapté à l'usage de la première loi de Newton.

Newton introduit deux notions : l'**espace absolu**, fait de vide et distinct de tous les corps matériels, et le **temps absolu**, qui s'écoule uniformément et indépendamment de tout événement survenant dans l'Univers. Newton distingue, d'une part, ces deux entités absolues et, d'autre part, les mesures de longueur et de durée que nous réalisons dans la vie quotidienne, qui relèvent selon Newton d'entités distinctes, les espaces et les temps relatifs. Autrement dit, lorsque nous effectuons de telles mesures, nous nous référons à des repères relatifs (c'est-à-dire à des objets matériels qui nous servent de points de repère pour nos mesures) et non à un référentiel absolu : nous ne mesurons donc qu'un mouvement relatif des corps, et non leur mouvement absolu par rapport à l'espace absolu.

Les notions d'espace et de temps newtoniens, qui paraissent très intuitives, n'allaient pas de soi dans le passé. De l'antiquité jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, de nombreux penseurs (dont Platon, Aristote, Leibniz et Berkeley) ont considéré que l'espace et le temps en tant qu'entités en soi n'existent pas et que l'Univers est un continuum matériel. Pour eux, l'espace absolu en tant qu'entité faite de vide est une fiction commode pour mesurer la position des corps constituant ce continuum. De même, le temps n'existe que par les changements qui se produisent dans l'Univers : le temps n'est donc qu'une mesure de ces changements.

Pour étudier le mouvement relatif des corps, Newton utilise une famille de référentiels particuliers, en mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à l'espace absolu : les **référentiels inertiels** ou **galiléens**. Ces référentiels sont précisément ceux dans lesquels la première loi de Newton est satisfaite. Mais, concrètement, comment vérifier expérimentalement qu'un référentiel est bien galiléen ?

De façon pragmatique, tout dépend de l'expérience de physique réalisée. Pour étudier le mouvement d'un corps soumis à des forces, on supposera en général que le référentiel utilisé est galiléen si, en l'absence des forces jugées importantes pour décrire correctement l'évolution du corps, ce dernier est immobile ou en mouvement de translation rectiligne et uniforme. Par exemple, si l'on étudie la chute d'un corps dans un laboratoire de petite taille, à l'intérieur d'un bâtiment, on pourra supposer que le référentiel lié au laboratoire est galiléen, alors même qu'il est lié à la Terre, en rotation autour de son axe. En revanche, si le corps est lâché dans le puits d'une mine, d'une profondeur de 158 mètres (expérience de Reich, 1833), on constate une

---

<sup>2</sup> Mis à part la force de réaction du support, qui ne contribue pas à la mise en mouvement du ballon.

déviations de 28 mm vers l'est du point de chute, qui révèle le caractère non galiléen d'un référentiel fixe par rapport à la surface terrestre.

Une famille de référentiels privilégiés, les référentiels galiléens, dans lesquels la première loi de Newton est valable, est ainsi mise en avant. Ces référentiels sont en mouvement de translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres.

Pour changer de repère, on invoque les transformations galiléennes, en vertu desquelles les coordonnées  $(x, y, z)$  et  $(x', y', z')$  d'un même événement, observé dans deux repères galiléens  $(\mathcal{R})$  et  $(\mathcal{R}')$ , sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}x' &= x - Vt \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}\quad (1-1)$$

où le repère  $(\mathcal{R}')$  se déplace à la vitesse  $V$  constante, parallèlement à l'axe des  $x$ , par rapport à  $(\mathcal{R})$ . Dans ce cadre, le temps est absolu. Enfin, si un corps se déplace le long de l'axe des  $x$ , à une vitesse  $v$  (resp.  $v'$ ) relativement à  $(\mathcal{R})$  (resp.  $(\mathcal{R}')$ ), ces vitesses sont liées par la relation :

$$v' = v - V \quad (1-2)$$

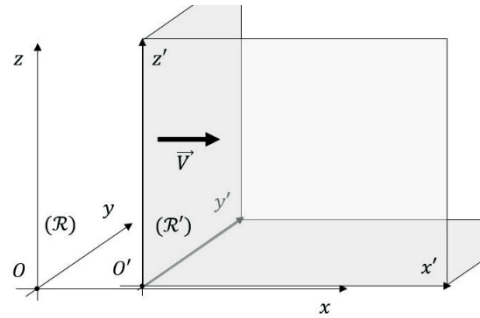


Figure 1-2 : deux repères galiléens en mouvement l'un par rapport à l'autre.

Cette famille de référentiels privilégiés possède une caractéristique particulière : les lois de la mécanique newtonienne sont invariantes par changement de référentiel galiléen.

Les notions d'espace et de temps absolus seront remises en cause à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècle. Une nouvelle théorie « cadre », formalisant les concepts d'espace et de temps relatifs, sera développée en 1905 (théorie de la relativité restreinte).

## II.4. Invariance

La notion d'**invariance** des lois de la physique, par changement de repère via des transformations de référence (par exemple, les transformations de Galilée), joue un rôle considérable, érigé au rang de principe. Une loi physique qui satisfait ce principe d'invariance est réputée décrire une réalité physique fondamentale, par le fait même que sa formulation s'affranchit du caractère particulier et tel ou tel référentiel. Disposer d'une famille de référentiels « faisant foi » et de transformations entre ces référentiels permet donc de tester la généralité d'une loi et de disposer d'une sorte de « juge de paix ». Les lois de la mécanique newtonienne sont invariantes par les transformations de Galilée, qui furent ces juges de paix jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Les équations de Maxwell, publiées en 1865<sup>3</sup>, se sont imposées comme des lois fondamentales de l'électromagnétisme classique. Pourtant, ces équations ne sont pas invariantes par les transformations de Galilée, dont le rôle de « juge de paix » fut alors remis en cause. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les transformations de Galilée seront supplantées par les transformations de Lorentz. Dans l'espace-temps quadridimensionnel de Minkowski, où le temps n'est plus absolu, sera développée la théorie de la relativité restreinte. Les lois de la mécanique relativiste et les équations de Maxwell sont invariantes par transformation de Lorentz.

### III. La deuxième loi : force, quantité de mouvement, masse et accélération

La deuxième loi de Newton est la loi centrale de la mécanique newtonienne. Grâce à elle, on peut écrire les équations qui régissent le mouvement d'un corps soumis à des forces et décrire quantitativement toutes les grandeurs physiques caractérisant la situation physique étudiée.

*Si l'on applique des forces externes  $\vec{F}_i$  à un corps, sa quantité de mouvement  $\vec{p}$  varie dans le sens et dans la direction de la force nette appliquée. Cette variation est d'autant plus élevée que l'intensité de la force appliquée est grande.*

*Mathématiquement,  $\vec{p} = m \vec{v}$  ( $\vec{v}$  est la vitesse du corps) et :*

$$\sum_{\substack{\text{Forces} \\ \text{externes}}} \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad (1-3)$$

La deuxième loi de Newton établit le lien entre la cinématique d'un corps (quel est son mouvement ?) et la physique à laquelle il est soumis (quelles forces subit-il ?). Le membre de droite de l'équation (1-3) porte le volet cinématique de la loi (quantité de mouvement, donc vitesse, donc trajectoire). Le membre de gauche en porte le volet physique (quelles sont les forces externes qui modifient le mouvement du corps ?). La deuxième loi révolutionne la physique en établissant une relation mathématique entre la force nette appliquée et la dérivée de  $\vec{p}$  (et non entre la force nette et la quantité de mouvement elle-même, comme on le pensait depuis Aristote). Si la masse totale du corps étudié est constante, l'équation (1-3) prend la forme simplifiée suivante :

$$\sum_{\substack{\text{Forces} \\ \text{externes}}} \vec{F}_i = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} \quad (1-4)$$

---

<sup>3</sup> Les équations de Maxwell furent réécrites sous leur forme définitive par O. Heaviside en 1884.

où  $\vec{a}$  est l'accélération du corps. L'équation (1-4) permet de reformuler la deuxième loi de Newton sous la forme suivante :

*Si l'on applique des forces externes  $\vec{F}_i$  à un corps de masse constante, celui-ci accélère dans le sens et la direction de la force nette appliquée. Cette accélération, notée  $\vec{a}$ , est d'autant plus élevée que l'intensité de la force appliquée est grande.*

*Le coefficient  $m$  de proportionnalité entre la force nette et l'accélération est appelée masse du corps.*

Pour un système à masse variable (une fusée, son combustible et son comburant, par exemple), la masse totale varie dans le temps et  $d\vec{p}/dt = m d\vec{v}/dt + \vec{v} dm/dt$ .

Le mouvement du corps est conditionné par la somme des forces externes  $\vec{F}_i$  appliquées sur ce dernier. Ces forces externes modifient la dérivée de sa quantité de mouvement, donc sa vitesse  $\vec{v}$ . Si la vitesse est constante, l'accélération est nulle et on peut conclure que la force nette appliquée est nulle. Réciproquement, si la force nette appliquée est nulle, il en est de même pour l'accélération : la vitesse du corps est constante. La deuxième loi de Newton généralise la première loi et l'inclut comme cas particulier. La position  $\vec{r}$  du corps est donnée par la relation  $\vec{v} = d\vec{r}/dt$ .

### III.1. Action à distance

La deuxième loi de Newton mobilise la notion de **force**, déjà évoquée pour la première loi. Cette notion est moins intuitive qu'il n'y paraît : on peut comprendre qu'une force exercée par contact sur un solide en modifie le mouvement, mais qu'en est-il pour une force exercée à distance, par un objet sans contact physique avec le solide. Comment expliquer cette « action à distance » ? Comment la Terre « sait-elle » que le Soleil exerce sur elle une force de gravitation et qu'il guide le mouvement de révolution de notre planète autour de notre étoile ? De façon plus générale, qu'est-ce qu'une force agissant à distance ? Par quel mécanisme physique, analysable expérimentalement, une force peut-elle s'exercer à distance entre deux corps ?

Isaac Newton s'interroge lui-même dans une correspondance privée<sup>4</sup> : « Comment un corps peut-il agir en un lieu où il n'est pas ? ». Newton introduit la notion de force centripète pour définir la gravitation universelle d'une manière neutre, qui dispense d'en spécifier précisément la cause. Cette façon de procéder ne satisfait cependant pas pleinement Newton qui écrit, dans la dernière page des *Principia* : « je n'ai pas encore réussi à donner la cause de la pesanteur ». Au XX<sup>e</sup> siècle, deux paradigmes vont émerger pour expliquer ce phénomène d'action à distance que peuvent subir des objets physiques.

Le premier est porté par la théorie de la relativité générale. Dans le cadre de cette théorie de la gravitation relativiste, l'espace et le temps sont rassemblés dans un objet géométrique quadridimensionnel (l'espace-temps), au sein duquel se déplacent tous

---

<sup>4</sup> Lettre à R. Bentley.



les objets physiques. L'espace-temps n'est pas « rigide » : un objet massif courbe l'espace-temps dans des proportions qui dépendent (notamment) de la masse de cet objet. Cette **courbure de l'espace-temps** matérialise le champ gravitationnel engendré par l'objet. La courbure engendrée par une source distante de gravité dicte localement la trajectoire d'un corps : on dit que ce corps suit une géodésique de l'espace-temps courbé.

Le second paradigme est porté par les théories développées, durant le XX<sup>e</sup> siècle, pour décrire les interactions fondamentales de la nature dans un cadre quantique. Dans ce cadre théorique, quatre « forces » fondamentales gouvernent l'ensemble des interactions entre les particules dans l'Univers : la gravitation, l'électromagnétisme, l'interaction faible<sup>5</sup> (responsable de la radioactivité) et l'interaction forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques). Les physiciens ont construit une théorie qui, pour ces trois dernières interactions, leur associe une ou plusieurs particules « médiatrices ». Une **particule médiatrice** est destinée à être échangée entre des particules en interaction. Si ces dernières sont en interaction électromagnétique, elles vont « échanger » la particule associée à cette force : le photon. Des particules en interaction faible vont échanger l'une des trois particules médiatrices spécifiques à cette force (boson  $W^+$ ,  $W^-$  ou  $Z_0$ ). L'interaction forte est assortie de huit particules médiatrices, les gluons. Les particules médiatrices échangées par des particules en interaction leur permettent de « savoir » selon quel type de force elles interagissent et surtout comment leur quantité de mouvement, leur énergie, etc., sont modifiées par la « force » qu'elles subissent. L'action à distance entre particules est donc expliquée par l'échange de particules médiatrices. La gravitation est, à ce jour, la seule à n'avoir pas pu être transposée de façon satisfaisante dans le monde quantique. On spécule cependant l'existence d'une particule médiatrice de la gravitation (le graviton).

### III.2. Masse inerte et masse grave

La forme (1-4) de la deuxième loi de Newton indique que l'accélération d'un corps et la force nette subie par ce dernier sont proportionnelles. Le facteur de proportionnalité est la masse du corps étudié, souvent qualifiée de **masse inertielle** ou de « **masse inerte** ». La masse inerte peut être comprise comme un coefficient de résistance au changement de trajectoire du corps. En effet, si l'on applique une force donnée à un corps de faible masse inerte, son accélération sera élevée (du fait que force = masse  $\times$  accélération) et donc son mouvement sera fortement modifié. Si la même force est appliquée à un corps de masse inerte élevée, l'accélération communiquée sera faible et son mouvement sera faiblement modifié. La masse inerte est une propriété intrinsèque du corps étudié : elle ne dépend pas de la nature des forces appliquées.

---

<sup>5</sup> Les interactions faible et électromagnétique ont été unifiées dans les années 1960 par S. Glashow, S. Weinberg et A. Salam, dans le cadre de leur théorie de l'interaction électrofaible.