Chapitre 3

Dynamique

Après avoir décrit les mouvements, nous allons nous intéresser aux causes qui les produisent. Notre but est d'énoncer les règles qui régissent les mouvements.

La dynamique, déjà introduite par Galilée, fut développée plus tard par Newton qui associa l'existence de forces à la modification de la vitesse d'un objet. La mécanique de Newton se fonde sur trois lois ou principes : le principe d'inertie, la loi fondamentale de la dynamique et le principe des actions réciproques.

Avant d'entamer l'étude des lois de Newton, nous allons nous intéresser à une grandeur importante en dynamique : la quantité de mouvement. Cette grandeur fut introduite par Newton et fait l'objet d'une loi de conservation.

3.1 La quantité de mouvement

3.1.1 Étude expérimentale

Considérons les interactions entre deux chariots se déplaçant sur un banc à coussin d'air horizontal. Dans ces conditions, les interactions entre les chariots lors des collisions sont les seules à pouvoir modifier les mouvements des chariots.

Nous mesurons les masses des deux chariots ainsi que leurs vitesses avant et après l'interaction, c'est-à-dire dans l'état initial et dans l'état final. Les vitesses sont des valeurs algébriques, le sens positif étant choisi vers la gauche.

Choc élastique

Expérience 3.1 Le chariot 2 est initialement au repos (figure 3.1). Le chariot 1 va entrer en collision avec le chariot 2. Après le choc, les deux chariots repartent séparément.

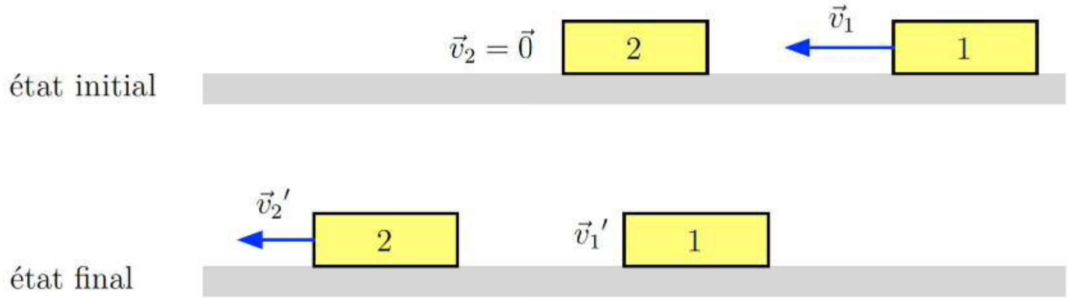


FIGURE 3.1 – Choc élastique

Tableau des mesures :

m_1 (kg)	m_2 (kg)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	v_1' (m/s)	v_2' (m/s)

Choc inélastique

Expérience 3.2 Le chariot 2 est initialement au repos (figure 3.2). Le chariot 1 va entrer en collision avec le chariot 2. Après le choc, les deux chariots repartent en restant collés l'un contre l'autre.

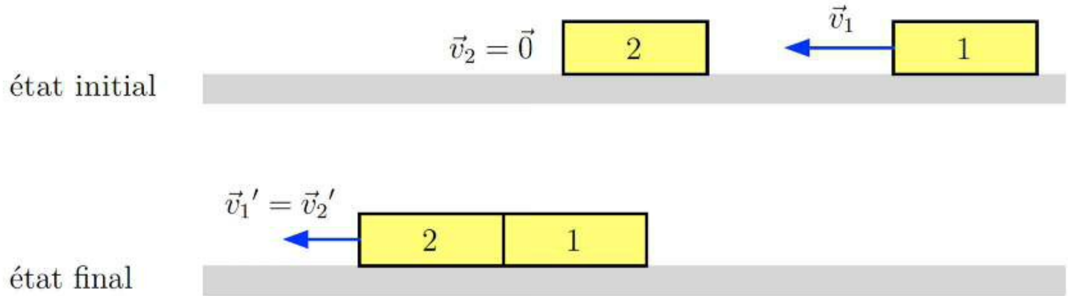


FIGURE 3.2 – Choc inélastique

Tableau des mesures :

m_1 (kg)	m_2 (kg)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	v_1' (m/s)	v_2' (m/s)

Explosion

Expérience 3.3 Un ressort est fixé entre les deux chariots initialement au repos (figure 3.3). Après avoir comprimé le ressort, on relâche les chariots.

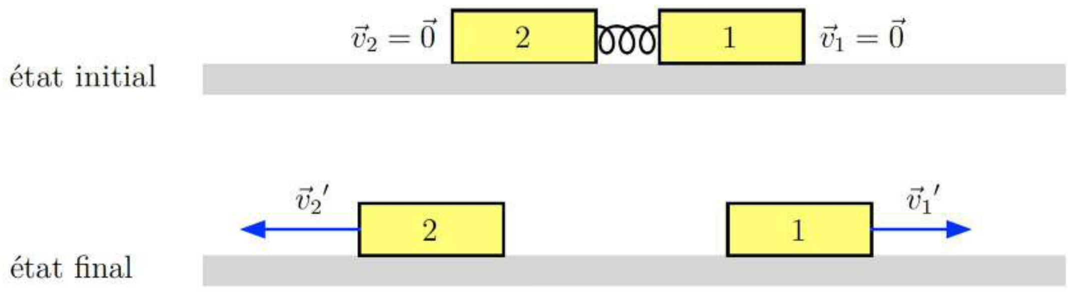


FIGURE 3.3 – Explosion

Tableau des mesures :

m_1 (kg)	m_2 (kg)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	v_1' (m/s)	v_2' (m/s)

3.1.2 Exploitation des mesures

Nous constatons que lors des chocs élastique et inélastique une partie de l'« élan » du chariot 1 est transféré au chariot 2. Cette quantité transférée, que nous allons appeler *quantité de mouvement*, dépend de la vitesse et de la masse du chariot.

Dans le cas de l'explosion, la quantité de mouvement est initialement nulle. Un transfert a pourtant eu lieu car un des chariots a reçu une quantité de mouvement négative et l'autre une quantité de mouvement positive ! Le chariot avec la masse la plus grande va acquérir la vitesse la plus faible.

Ces remarques nous suggèrent que le produit de la masse par la vitesse est une mesure de la quantité de mouvement d'un chariot. C'est une valeur algébrique que nous calculons pour les deux chariots avant et après leur interaction :

$m_1\,v_1$ (kg m/s)	$m_2\,v_2$ (kg m/s)	$m_1\,v_1'$ (kg m/s)	$m_2\,v_2'$ (kg m/s)

On constate que la somme des produits est, aux erreurs expérimentales près, la même dans l'état final que dans l'état initial :

$$m_1\,v_1 + m_2\,v_2 = m_1\,v_1' + m_2\,v_2'.$$

Il en suit que la quantité de mouvement est en partie transférée d'un chariot à l'autre tout en restant conservée lors des interactions.

3.1.3 Définitions

Dans le cas d'un mouvement dans l'espace à trois dimensions, les valeurs algébriques doivent être remplacées par des vecteurs. La quantité de mouvement est, comme la vitesse, un vecteur.

Définition *Le vecteur quantité de mouvement $\vec{p}$ d'un corps est le produit de la masse m du corps par le vecteur vitesse $\vec{v}$ du centre d'inertie de ce corps.*

$$\boxed{\vec{p} = m\,\vec{v}} \tag{3.1}$$

L'unité S.I. de la quantité de mouvement est le *kilogramme mètre par seconde* (kg m/s).

Pour un système formé de plusieurs solides, on définit la quantité de mouvement totale.

Définition *Le vecteur quantité de mouvement totale $\vec{p}$ d'un système formé de plusieurs corps 1, 2, ... s'obtient en faisant la somme vectorielle des vecteurs $\vec{p}_1$, $\vec{p}_2$, ... des différents corps.*

$$\boxed{\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \cdots = \sum_i \vec{p}_i}$$

3.1.4 Loi de conservation de la quantité de mouvement

Les expériences ont montré que la quantité de mouvement d'un système est conservée, c'est-à-dire qu'elle est la même à l'état final qu'à l'état initial. Il est important de noter que les seules interactions étaient celles entre les deux chariots.

Définition *On appelle système isolé un ensemble de corps qui n'interagissent qu'entre eux et qui ne sont pas soumis à des forces extérieures.*

Les chariots sur le banc à coussin d'air ne constituent pas un système isolé. Ils sont soumis aux forces d'attraction terrestre, dont les actions sont toutefois compensées par les réactions du banc.

Définition *On appelle système pseudo-isolé un ensemble de corps qui n'interagissent qu'entre eux et pour lesquels la résultante des forces extérieures est nulle.*

Pour un système isolé ou pseudo-isolé nous pouvons formuler la *loi de conservation de la quantité de mouvement.*

Énoncé *La quantité de mouvement totale d'un système isolé est conservée. Soient respectivement $\vec{p}$ et $\vec{p}\,'$ les quantités de mouvement totales du système à l'état initial et à* *l'état final, alors :*

$$\boxed{\vec{p} = \vec{p}\,'}$$

3.1.5 Exercices

Exercice 3.1 Un jeune garçon de masse $M = 30\,\text{kg}$ réalise les opérations suivantes avec sa planche à roulettes dont la masse est $m = 5\,\text{kg}$.

1. Il est sur sa planche et l'ensemble est initialement immobile. Décrire le mouvement de la planche et calculer sa vitesse lorsque :
   (a) le garçon saute de la planche avec une vitesse horizontale de valeur $v = 2\,\text{m/s}$, dirigée suivant l'axe de la planche et vers l'avant ;
   (b) le garçon saute perpendiculairement à l'axe de la planche.
2. Le garçon est sur la planche et l'ensemble a un mouvement rectiligne et uniforme à la vitesse $v' = 1\,\text{m/s}$. Il quitte alors sa planche en sautant avec une vitesse pratiquement horizontale et dans la direction du mouvement. La vitesse avec laquelle il quitte la planche est $v'/2$, vitesse évaluée par rapport à la planche.
   Quelle est la vitesse de la planche après le saut dans les deux cas suivants :
   (a) le garçon saute vers l'avant ;
   (b) le garçon saute vers l'arrière.

Exercice 3.2 Un cosmonaute dans son fauteuil de l'espace évolue à proximité du vaisseau spatial qui constitue sa base, et à très grande distance de tout astre. Sa masse (avec l'équipement complet) est $M = 120\,\text{kg}$; il est initialement immobile par rapport au vaisseau et lui fait face.

1. Pour regagner le vaisseau, il expulse vers l'arrière une masse $m = 100\,\text{g}$ de gaz ; la vitesse du gaz par rapport au cosmonaute est $25\,\text{m/s}$.
   (a) Quelle sera sa vitesse après l'éjection des gaz ?
   (b) Quel temps mettra-t-il pour regagner le vaisseau s'il est initialement à $15\,\text{m}$ de celui-ci ?
2. En arrivant à proximité du vaisseau, le cosmonaute doit s'arrêter. Dans ce but, il doit réaliser une nouvelle éjection de gaz.
   (a) Cette éjection doit-elle être faite vers l'avant ou vers l'arrière ?
   (b) Du fait de la baisse de la pression dans les réservoirs, la vitesse d'éjection des gaz n'est plus que $v' = 10\,\text{m/s}$. Quelle masse de gaz devra-t-il éjecter pour arriver au repos ?

Exercice 3.3 Un neutron vient frapper, à la vitesse $v_\text{n} = 10^6\,\text{m/s}$, un noyau d'hélium (particule α) immobile. Le noyau d'hélium est projeté dans le sens de $\vec{v}_\text{n}$ à la vitesse $v_\alpha = 4 \cdot 10^5\,\text{m/s}$, tandis que le neutron rebondit dans le sens inverse, à la vitesse ${v_\text{n}}' = 6 \cdot 10^5\,\text{m/s}$.

Quelle relation peut-on en déduire entre la masse m_α du noyau d'hélium et la masse m_n du neutron ?

Exercice 3.4 Deux boules de billard de même masse progressent suivant des directions qui font un angle de 60° aux vitesses respectives $v_1 = 1\,\mathrm{m/s}$ et $v_2 = 0{,}8\,\mathrm{m/s}$.
Après le choc, la boule (2) part avec un angle de 45° par rapport à sa direction initiale, à la vitesse ${v_2}' = 0{,}6\,\mathrm{m/s}$.
Déterminez la vitesse (valeur et direction) de la boule (1) après le choc.

Exercice 3.5 Sur une voie horizontale, trois wagons identiques sont immobiles, distants de 10 m. Un quatrième wagon identique arrive sur eux avec une vitesse $v = 2\,\mathrm{m/s}$. Les wagons s'attachent les uns aux autres. Déterminez :

1. Les vitesses après chaque choc.
2. L'intervalle de temps entre le premier et le dernier choc.

Exercice 3.6 On considère deux patineurs immobiles sur la glace d'une patinoire. Leurs masses sont 70 kg. L'un d'eux envoie à son partenaire une caisse de masse 7 kg à une vitesse de 2 m/s par rapport au sol ; le partenaire l'attrape. Il y a 3 périodes :

1. au départ tout est immobile ;
2. la caisse glisse ;
3. le second patineur a attrapée la caisse.

Calculer la vitesse des patineurs pendant chacune des 3 périodes.

3.2 Les lois de Newton

3.2.1 La première loi de Newton : le principe d'inertie

Le centre d'inertie

Expérience 3.4 Lançons un solide sur une table à coussin d'air horizontale (figure 3.4). On observe le mouvement de deux points du solide : le point P situé à sa périphérie et son *centre de masse* G.

(a) photographie (b) schéma

FIGURE 3.4 – Solide en mouvement sur une table horizontale

Observation :

Le mouvement du point P est curviligne et non uniforme. Le centre de masse G se déplace toujours sur une ligne droite et à vitesse constante.

Interprétation :

Le solide est soumis à deux forces : son poids et la réaction de la table. Comme la table est horizontale, ces deux forces se compensent. Le seul point du solide pseudo-isolé qui effectue un mouvement rectiligne et uniforme est appelé le *centre d'inertie* du solide.

Définition *Dans le référentiel terrestre, le centre d'inertie d'un solide pseudo-isolé a un mouvement rectiligne et uniforme.*

Remarque : le centre de gravité d'un solide est confondu avec son centre d'inertie.

Exemple 3.1 Sur une plaque de verglas, le centre d'inertie d'une voiture a un mouvement rectiligne et uniforme.

Quel sera le mouvement du centre d'inertie d'un solide pseudo-isolé dans d'autres référentiels ?

Expérience 3.5 Prenons comme solide « test » une bille qui est initialement au repos sur une table horizontale dans différents référentiels.

Observations :

- Dans un train se déplaçant à vitesse constante sur un tronçon rectiligne, la bille va rester immobile.
- Dans un train accéléré ou freiné sur un tronçon rectiligne, la bille ne va pas rester immobile.
- Sur un manège en rotation autour d'un axe, la bille ne va pas rester immobile.

Interprétation :

Parmi les référentiels on distingue ceux dans lesquels le centre d'inertie d'un solide pseudo-isolé a un mouvement rectiligne et uniforme. Ils sont appelés *référentiels galiléens.*

Exemple 3.2 Les référentiels terrestre, géocentrique et héliocentrique sont des référentiels galiléens.

Principe d'inertie

Première loi *Dans un référentiel galiléen, le centre d'inertie G d'un système pseudo-isolé a un mouvement rectiligne et uniforme.*

$$\boxed{\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0} \Longleftrightarrow \vec{v}_{\text{G}} = \textit{vecteur constant}}$$

Remarques :

- L'immobilité est un cas particulier du mouvement rectiligne et uniforme.
- Le principe d'inertie permet de distinguer référentiels galiléens et référentiels non galiléens.

3.2.2 La deuxième loi de Newton : le principe fondamental de la dynamique

Solide non pseudo-isolé

Lorsque, dans un référentiel galiléen, un solide est soumis à des forces extérieures dont la résultante ne s'annule pas, le vecteur vitesse n'est plus un vecteur constant : le vecteur accélération est non nul.

Expérience 3.6 Un chariot de masse m est accéléré sur un rail horizontal sous l'effet d'une force $\vec{F}$ (figure 3.5). On varie la masse et l'intensité de la force et on mesure l'accélération du chariot.

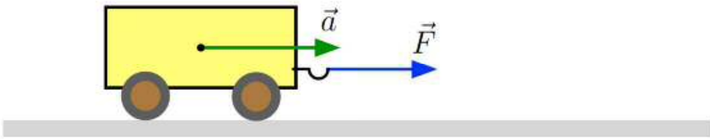


FIGURE 3.5 – Chariot sur un rail horizontal

Conclusions :

- Pour une masse donnée, l'accélération est d'autant plus élevée que l'intensité de la force est importante. Les mesures permettent de montrer :
$$a \sim F.$$
- Pour une force donnée, l'accélération est d'autant plus faible que la masse est grande. Les mesures permettent de montrer :
$$a \sim \frac{1}{m}.$$

En combinant ces deux résultats :
$$a \sim \frac{F}{m}$$
et en introduisant la constante de proportionnalité k :
$$a = k\,\frac{F}{m}.$$

L'unité de l'intensité d'une force est définie de sorte que pour accélérer de $1\,\mathrm{m/s^2}$ un corps de masse $1\,\mathrm{kg}$ il faut lui appliquer une force d'intensité $1\,\mathrm{N}$. Avec cette définition, la constante de proportionnalité doit être fixée à $k = 1$:
$$a = \frac{F}{m} \Longrightarrow F = m\,a.$$

Comme l'accélération et la force résultante ont même direction et même sens, il en résulte :
$$\vec{F} = m\,\vec{a}.$$

Principe fondamental de la dynamique

Deuxième loi *Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces extérieures appliquées à un système est égale au produit de la masse m du système par le vecteur accélération de son centre d'inertie G.*

$$\boxed{\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\,\vec{a}_{\mathrm{G}}} \tag{3.2}$$

Remarque :

Pour un système pseudo-isolé, le vecteur accélération est nul et on retrouve bien la première loi de Newton. On peut se demander quelle est l'utilité de la première loi puisqu'elle semble être une conséquence de la deuxième. En réalité, il n'en est rien. Énoncer la première loi, c'est affirmer l'existence des référentiels galiléens et ainsi définir le domaine de validité du principe fondamental.

Relation entre quantité de mouvement et force

La définition de l'accélération :

$$\vec{a} = \frac{\delta \vec{v}}{\delta t}$$

permet d'écrire :

$$m\,\vec{a} = m\,\frac{\delta \vec{v}}{\delta t}$$

$$m\,\vec{a} = \frac{\delta(m\,\vec{v})}{\delta t}$$

En tenant compte de la définition de la quantité de mouvement (3.1) :

$$m\,\vec{a} = \frac{\delta \vec{p}}{\delta t}.$$

Finalement, en comparant à la relation fondamentale de la dynamique (3.2) :

$$\boxed{\vec{F} = \frac{\delta \vec{p}}{\delta t}} \tag{3.3}$$

La chute libre

Considérons le mouvement d'un solide de masse m sous l'effet de son poids (figure 3.6).

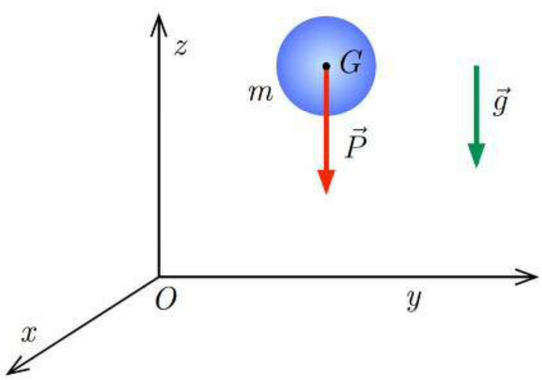


FIGURE 3.6 – Solide en chute libre

Le système que nous allons considérer est le solide en chute libre. Le référentiel galiléen dans lequel l'étude sera réalisée est le référentiel terrestre.

En négligeant la résistance de l'air et la poussée d'Archimède, la seule force qui agit sur le système est son poids :

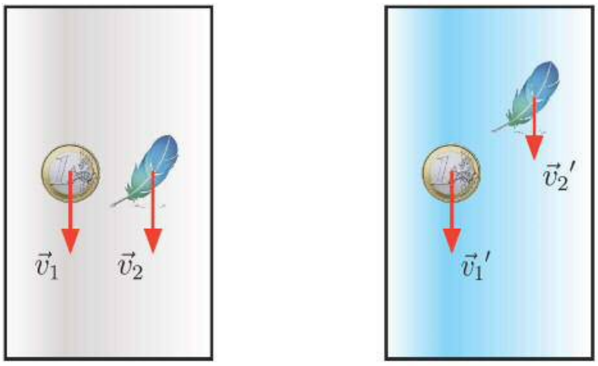
$$\vec{P} = m\,\vec{g}.$$

La relation fondamentale permet de déterminer l'accélération du centre d'inertie du système :

$$\begin{aligned} \sum \vec{F}_{\text{ext}} &= \vec{P} \\ m\,\vec{a} &= m\,\vec{g} \\ \vec{a} &= \vec{g} \end{aligned}$$

L'accélération $\vec{a}$ est donc indépendante de la masse m. Elle est égale à l'intensité de la pesanteur $\vec{g}$.

Expérience 3.7 Dans un tube en verre, appelé tube de Newton, une plume et une pièce de monnaie peuvent tomber en absence (figure 3.7a) et en présence (figure 3.7b) de l'air.



(a) vide (b) air

FIGURE 3.7 – Chute d'objets dans un tube de Newton

Observations :

- Dans le vide, la plume et la pièce de monnaie atteignent le fond du tube au même instant. Ils parcourent la même distance sous le seul effet de leur poids.
- Dans l'air, tel n'est plus le cas ! La pièce de monnaie arrive en premier.

Interprétation :

La résistance de l'air agit sur la plume alors qu'elle est négligeable pour la pièce de monnaie. Quand la vitesse atteint une certaine valeur limite, la résistance de l'air va compenser l'effet du poids de la plume. À partir de cet instant, la vitesse de la plume restera constante.

3.2.3 La troisième loi de Newton : le principe d'interaction

Considérons à nouveau l'expérience des deux chariots sur le banc à coussin d'air horizontal de la section 3.1.1.

La quantité de mouvement totale du système des deux chariots est :

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_1.$$

Lors des interactions, les chariots sont soumis simultanément à des forces réciproques. La relation (3.3) permet d'écrire :

$$\left.\begin{aligned} \delta\vec{p}_1 &= \vec{F}_{2/1}\,\delta t \\ \delta\vec{p}_2 &= \vec{F}_{1/2}\,\delta t \end{aligned}\right\} \Longrightarrow \delta\vec{p} = \delta\vec{p}_1 + \delta\vec{p}_2 = (\vec{F}_{2/1} + \vec{F}_{1/2})\,\delta t.$$

La loi de conservation de la quantité de mouvement implique que les forces d'interaction réciproques sont opposées :

$$\delta\vec{p} = 0 \Longleftrightarrow \vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2}.$$

Principe d'interaction

Troisième loi *Lorsqu'un corps A exerce sur un corps B la force $\vec{F}_{A/B}$, alors le corps B exerce sur le corps A la force $\vec{F}_{B/A}$.*

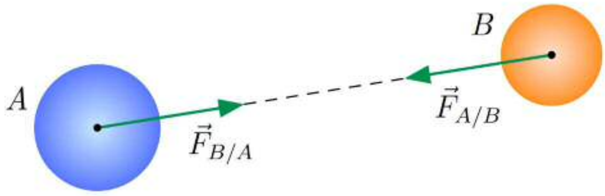


FIGURE 3.8 – Principe d'interaction

Indépendamment de l'état de mouvement des deux corps A et B, cette interaction est telle que (figure 3.8) :

- *$\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ ont la même droite d'action ;*
- *$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$.*

Applications

Exemple 3.3 Lorsqu'une moto accélère, les cailloux éjectés vers l'arrière permettent de représenter la force $\vec{F}_{R/S}$ exercée par la roue arrière sur le sol (figure 3.9). La moto est mise en mouvement par la force $\vec{F}_{S/R}$ dirigée dans le sens du mouvement.

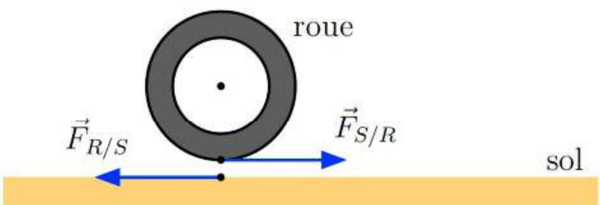


FIGURE 3.9 – Traction

Exemple 3.4 Le principe d'interaction est à l'origine de la propulsion des fusées.

A la fin du 19e siècle, le Russe Konstantin Tsiolkovski a imaginé le moteur-fusée, capable de créer sa propre force motrice aussi bien dans l'atmosphère que dans le vide spatial.

Dans l'espace, la fusée éjecte des gaz vers l'arrière et se propulse par réaction, sans point d'appui extérieur. Au mouvement de la masse de gaz vers l'arrière correspond un mouvement opposé de la fusée vers l'avant. La fusée s'appuie sur les gaz éjectés et fonctionne parfaitement dans le vide.

3.2.4 Exercices

Exercice 3.7 Un camion prend un virage à vitesse constante. Sur la surface de chargement se trouve une caisse non arrimée qui peut glisser sans frottement.

1. Le référentiel du camion est-il, dans ce cas, un référentiel galiléen ? Justifier.
2. Le principe d'inertie s'applique-t-il pour la caisse dans le référentiel du camion ? Dans le référentiel terrestre ?
3. Décrire le mouvement de la caisse dans les deux référentiels.

Exercice 3.8 Le passager d'une voiture oublie de mettre sa ceinture de sécurité.

1. Faire le bilan des forces qui s'exercent sur le passager. Quelle est la relation entre ces forces ?
2. À quelle condition, autre que l'immobilité, la voiture est-elle un référentiel galiléen ?
3. Dans la voiture, référentiel galiléen, le passager est-il ou non un système pseudo-isolé ? Quelle est, dans ces conditions, l'utilité de la ceinture de sécurité ?
4. Que devient le référentiel voiture si elle freine brutalement ?
5. Le passager reste-il immobile dans le référentiel voiture ? Quelle est, dans ces conditions, l'utilité de la ceinture ?

Exercice 3.9 Si nous considérons une rame de TGV, de masse 485 t, lancée à 300 km/h sur une voie rectiligne et horizontale, et que nous voulons effectuer un freinage d'urgence sans à-coups, il faudra exercer une force résistante pendant environ 84 s pour obtenir l'arrêt.

1. En supposant l'ensemble des forces constantes au cours du freinage, quelle est la nature du mouvement du TGV dans ces conditions ?
2. Calculer l'accélération du mouvement.
3. Au cours du freinage, la valeur de la force de résistance aérodynamique est $F_r = 70\,000\,\mathrm{N}$. Calculer la valeur de la force résistante nécessaire à l'arrêt dans ces conditions.

Exercice 3.10 Pour accélérer une voiture de masse m, le moteur exerce une force de traction constante $\vec{F}$.

Qu'adviendrait-il de l'accélération du véhicule si celui-ci avait une masse double et le moteur la même force de traction.

Exercice 3.11 Une savonnette de masse m glisse sur un plan incliné d'un angle $\alpha = 15°$ par rapport à l'horizontale. On néglige les frottements.
Calculer l'accélération de la savonnette.

Exercice 3.12 Par l'application d'une force de freinage $\vec{F}$ constante, la vitesse d'une voiture de masse $m = 800\,\mathrm{kg}$ passe de $90\,\mathrm{km/h}$ à $60\,\mathrm{km/h}$ en $5\,\mathrm{s}$.
Déterminer la valeur de la décélération du véhicule et en déduire l'intensité de la force de freinage.

Exercice 3.13 Une feuille de masse $m = 5\,\mathrm{g}$ tombe de l'arbre d'une hauteur $h = 5\,\mathrm{m}$. Elle subit une force de frottement constante d'intensité $F = 0{,}03\,\mathrm{N}$.
Quelle est l'accélération de la feuille ?

Exercice 3.14 Une fusée dont la masse est $10\,\mathrm{t}$ subit une poussée de $2{,}5 \cdot 10^5\,\mathrm{N}$ pendant une minute (départ arrêté au niveau du sol).

1. Quelle est son altitude après une minute, si l'on néglige les frottements ?
2. Comment varie cette réponse si l'on tient compte des frottements ?
3. Comment varie cette réponse si l'on tient compte de la diminution de la masse de la fusée due à l'éjection du carburant ?

Exercice 3.15 Deux projectiles A et B sont lancés verticalement avec la même vitesse initiale v_0, l'une vers le haut et l'autre vers le bas.

1. Déterminer la distance AB en fonction du temps.
2. Calculer v_0 sachant que $AB = 10\,\mathrm{m}$ au bout d'une seconde.

Exercice 3.16 Une bille A est lancée verticalement vers le haut à $1\,\mathrm{m}$ du sol et arrive $5\,\mathrm{m}$ plus haut après $1\,\mathrm{s}$.

1. Établir l'équation horaire de la bille A si le départ se fait à la date $t = 0\,\mathrm{s}$.
2. Chercher la relation entre la vitesse et la position dans le mouvement de la bille A.
3. Déterminer le plafond atteint par la bille A et sa vitesse de retombée au sol.
4. Une bille B est lancée $1\,\mathrm{s}$ après A dans les mêmes conditions. Former l'équation horaire de la bille B et trouver le point de rencontre avec A. Quelles sont à ce moment les vitesses des deux billes ?

Exercice 3.17 Un skieur démarre, tiré par une perche de téléski, sur une pente inclinée d'un angle $\alpha = 20°$ par rapport à l'horizontale. La perche fait un angle $\beta = 20°$ avec la direction de la piste.

1. La vitesse du skieur passe de 0 à $2\,\mathrm{m/s}$ en $0{,}5\,\mathrm{s}$; calculer l'accélération du skieur.

2. On néglige les frottements sur la neige et le skieur à une masse $m = 80\,\text{kg}$; calculer la tension de la perche.

Exercice 3.18 Un mobile de masse $m = 0{,}65\,\text{kg}$ est lâché sans vitesse initiale sur une table inclinée d'un angle $\alpha = 12°$ par rapport à l'horizontale. Il est soumis au cours du mouvement à une force de frottement $\vec{F}$ constante et parallèle à la vitesse de glissement. On a relevé les positions du mobile au cours du temps :

t (s)	0	0,12	0,24	0,36	0,48
x (cm)	0	1,1	4,45	10,0	17,8

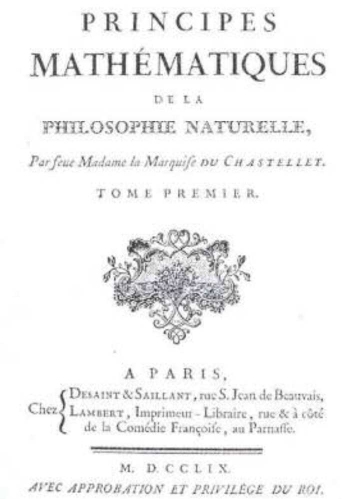
1. Établir l'expression littérale de l'accélération du mobile.
2. En déduire l'expression littérale de l'accélération si le frottement est négligeable. Calculer la valeur numérique dans ce cas.
3. Déduire des mesures la valeur numérique de l'accélération du mouvement. L'expérience met-elle en évidence l'existence d'une force de frottement ? Si oui, calculer sa valeur F.

Exercice 3.19 Deux objets respectivement de $3\,\text{kg}$ et de $5\,\text{kg}$ sont attachés aux extrémités d'un fil inextensible et de masse négligeable. Celui-ci est passé autour d'une poulie d'axe horizontale, de masse négligeable et n'introduisant pas de frottement important. Initialement, les deux objets sont maintenus immobiles. On abandonne ensuite le système à lui-même. Déterminer :

1. La distance parcourue par le corps de $5\,\text{kg}$ pendant les $2\,\text{s}$ suivant son départ.
2. La force exercée par le fil sur le corps de $3\,\text{kg}$.

3.2.5 Traduction originale des lois de Newton

Newton publia les « Principia » en 1687. La traduction par la marquise du Châtelet fut publiée en France en 1759.



PRINCIPES
MATHÉMATIQUES
DE LA
PHILOSOPHIE NATURELLE,

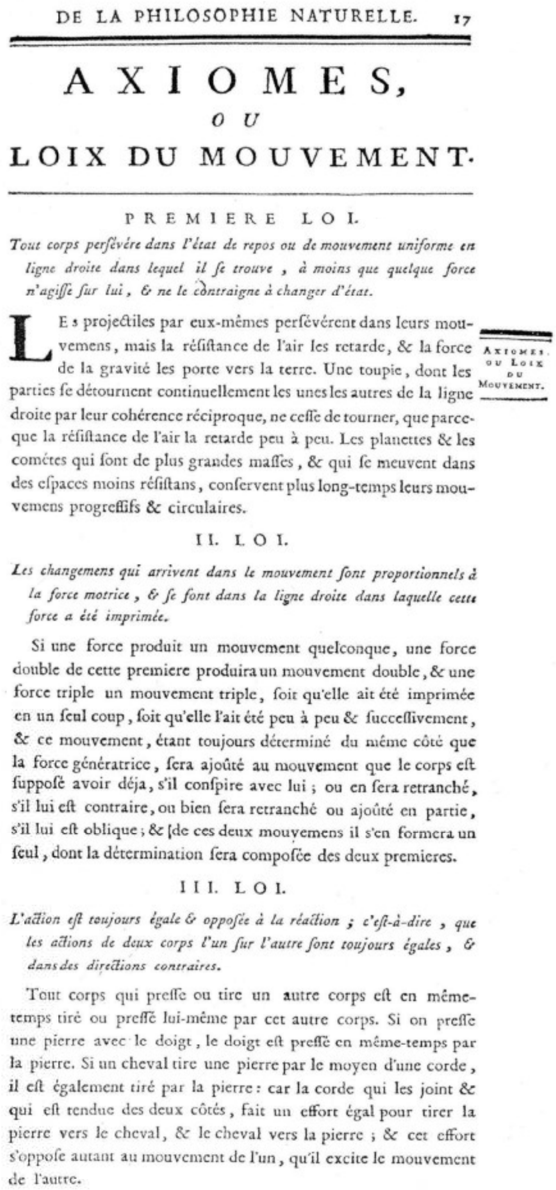
Par feue Madame la Marquiſe du CHASTELLET.

TOME PREMIER.

A PARIS,
Chez { DESAINT & SAILLANT, rue S. Jean de Beauvais, LAMBERT, Imprimeur - Libraire, rue & à côté de la Comédie Françoiſe, au Parnaſſe.

M. DCCLIX.
AVEC APPROBATION ET PRIVILÈGE DU ROI.

(a) Première page



DE LA PHILOSOPHIE NATURELLE. 17

AXIOMES,
OU
LOIX DU MOUVEMENT.

PREMIERE LOI.

Tout corps perſévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il ſe trouve, à moins que quelque force n'agiſſe ſur lui, & ne le contraigne à changer d'état.

LES projectiles par eux-mêmes perſévérent dans leurs mouvemens, mais la réſiſtance de l'air les retarde, & la force de la gravité les porte vers la terre. Une toupie, dont les parties ſe détournent continuellement les unes les autres de la ligne droite par leur cohérence réciproque, ne ceſſe de tourner, que parceque la réſiſtance de l'air la retarde peu à peu. Les planettes & les cométes qui ſont de plus grandes maſſes, & qui ſe meuvent dans des eſpaces moins réſiſtans, conſervent plus long-temps leurs mouvemens progreſſifs & circulaires. AXIOMES, OU LOIX DU MOUVEMENT.

II. LOI.

Les changemens qui arrivent dans le mouvement ſont proportionnels à la force motrice, & ſe font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.

Si une force produit un mouvement quelconque, une force double de cette premiere produira un mouvement double, & une force triple un mouvement triple, ſoit qu'elle ait été imprimée en un ſeul coup, ſoit qu'elle l'ait été peu à peu & ſucceſſivement, & ce mouvement, étant toujours déterminé du même côté que la force génératrice, ſera ajoûté au mouvement que le corps eſt ſuppoſé avoir déja, s'il conſpire avec lui ; ou en ſera retranché, s'il lui eſt contraire, ou bien ſera retranché ou ajoûté en partie, s'il lui eſt oblique ; & de ces deux mouvemens il s'en formera un ſeul, dont la détermination ſera compoſée des deux premieres.

III. LOI.

L'action eſt toujours égale & oppoſée à la réaction ; c'eſt-à-dire, que les actions de deux corps l'un ſur l'autre ſont toujours égales, & dans des directions contraires.

Tout corps qui preſſe ou tire un autre corps eſt en même-temps tiré ou preſſé lui-même par cet autre corps. Si on preſſe une pierre avec le doigt, le doigt eſt preſſé en même-temps par la pierre. Si un cheval tire une pierre par le moyen d'une corde, il eſt également tiré par la pierre : car la corde qui les joint & qui eſt tendue des deux côtés, fait un effort égal pour tirer la pierre vers le cheval, & le cheval vers la pierre ; & cet effort s'oppoſe autant au mouvement de l'un, qu'il excite le mouvement de l'autre.

(b) Extrait de l'ouvrage

3.3 Interactions fondamentales

Le terme d'*interaction* désigne les actions réciproques que deux systèmes exercent l'un sur l'autre. Toutes les interactions connues à l'heure actuelle peuvent être réduites à quatre interactions *fondamentales* : interaction gravitationnelle, électromagnétique, forte et faible.

Toutes les forces qui jouent un rôle dans la vie de tous les jours, comme par exemple le poids d'un corps, les forces de frottement, la tension d'un ressort, ... trouvent leur origine soit dans l'interaction gravitationnelle, soit dans l'interaction électromagnétique des constituants élémentaires des systèmes physiques.

Exemples :

- le poids d'un corps est due à l'interaction gravitationnelle de ce corps et de la Terre ;
- la tension d'un ressort est due à l'interaction électrique des électrons et des noyaux qui constituent le ressort.

Les interactions forte et faible furent découvertes au 20e siècle et jouent un rôle uniquement au niveau du noyau atomique.

3.3.1 L'interaction gravitationnelle

Selon la *loi de gravitation* de Newton, deux corps sphériques et homogènes A et B, de masses m_1 et m_2, dont les centres O_1 et O_2 sont distants de d, exercent l'un sur l'autre des forces attractives $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ de même droite d'action (O_1O_2) et de même valeur F (figure 3.10) :

$$\boxed{F = K\,\frac{m_1\,m_2}{d^2}}$$

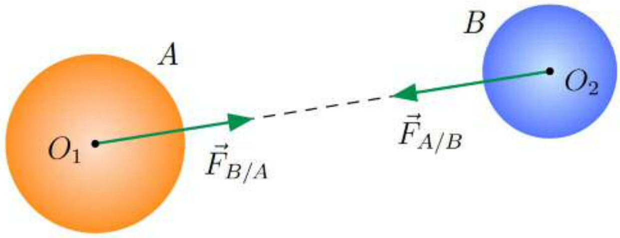


FIGURE 3.10 – Interaction gravitationnelle

La constante K (ou G) est appelée *constante de gravitation*. Sa valeur dans le système international est :

$$K = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{N\,kg^{-2}\,m^2}.$$

La loi de gravitation de Newton a connu son plus grand succès lorsqu'elle fut appliquée au mouvement des planètes du système solaire. Cependant, certaines observations astronomiques n'étaient pas en accord avec les résultats théoriques.

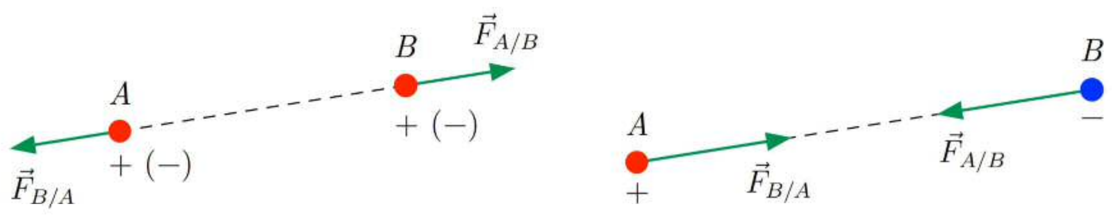
En 1915, Einstein publia sa théorie de la relativité générale qui donne une description géométrique de l'interaction gravitationnelle. Elle est à ce jour la seule théorie de l'interaction gravitationnelle en accord avec toutes les observations astronomiques (y compris les trous noirs).

3.3.2 L'interaction électrique

L'interaction électromagnétique ne concerne que les objets portant une charge électrique. Elle est à l'origine de tous les phénomènes électriques et magnétiques, y compris les ondes électromagnétiques, parmi lesquelles on distingue la lumière, les ondes radio, les ondes radar, les rayons X …

Nous allons nous limiter à l'*interaction électrique* décrite par la *loi de Coulomb*. Selon cette loi, deux objets ponctuels A et B, distants de d, portant les charges électriques q_1 et q_2, exercent l'un sur l'autre des forces $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ de même droite d'action (AB), répulsives si q_1 et q_2 sont de même signe (figure 3.11a), attractives si q_1 et q_2 sont de signes contraires (figure 3.11b), et de même valeur F :

$$\boxed{F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|q_1\, q_2|}{d^2} = k\,\frac{|q_1\, q_2|}{d^2}}$$



(a) Charges de même signe (b) Charges de signes contraires

FIGURE 3.11 – L'interaction électrique

La constante ϵ_0 est appelée *permittivité électrique du vide*. L'unité de charge électrique est le *coulomb* (C).

La valeur de la permittivité électrique du vide est :

$$\epsilon_0 = 8{,}84 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{N^{-1}\,C^2\,m^{-2}}.$$

On en déduit :

$$k = 9{,}00 \cdot 10^{9}\,\mathrm{N\,C^{-2}\,m^2}.$$

3.3.3 L'interaction forte

Entre deux nucléons (protons et neutrons) d'un noyau atomique s'exercent des forces attractives de valeur environ mille fois plus grande que celle des forces électriques répulsives entre deux protons ; c'est cette interaction forte qui assure la cohésion du noyau. Elle s'exerce indifféremment entre proton et neutron, mais elle est inexistante entre un électron et un nucléon. Sa portée n'excède pas la taille du noyau, qui est de l'ordre de $10^{-15}\,\mathrm{m}$.

L'interaction forte est aussi responsable des réactions nucléaires, source d'énergie des étoiles et donc du Soleil.

3.3.4 L'interaction faible

L'interaction faible, ou force nucléaire faible, est responsable de certains phénomènes de la radioactivité (radioactivité bêta). Sa portée est extrêmement faible, de l'ordre de quelques centièmes de la taille d'un nucléon. Elle est environ 10^5 fois plus faible que l'interaction forte.

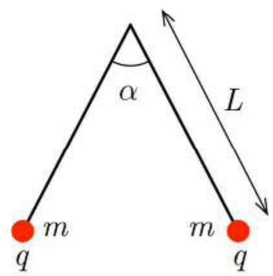
3.3.5 Exercices

Exercice 3.20 Calculer la masse de la Terre sachant que son rayon vaut $6{,}4 \cdot 10^3\,\mathrm{km}$ et que l'intensité de la pesanteur moyenne est égale à $9{,}8\,\mathrm{N/kg}$.

Exercice 3.21 Dans l'atome d'hydrogène, la distance entre le proton et l'électron vaut environ $5{,}3 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m}$.

1. Calculer l'intensité de la force électrique entre le proton et l'électron.
2. Calculer l'intensité de la force d'attraction gravitationnelle entre le proton et l'électron.
3. Comparer ces valeurs.

Exercice 3.22 Deux corps de même masse m et portant des charges positives identiques q sont suspendus à des fils de même longueur L. À l'équilibre, les fils font un angle α entre eux. Déterminer la charge q des deux corps.



Données : $m = 10\,\mathrm{g}$; $L = 20\,\mathrm{cm}$; $\alpha = 40°$.