

Physique Générale C
Semestre d'automne (11P090)
Notes du cours basées sur le livre
Physique
de Eugene Hecht, éditions De Boeck

Chapitre 3

Enseignante:
Anna Sfyrla

Assistant(e)s:
Mireille Conrad
Tim Gazdic
Jean-Marie Poumirol
Rebecka Sax
Marco Valente

Bibliographie

- [1] Eugene Hecht, Physique, éditions De Boeck.
- [2] Eugene Hecht, College Physics, Schaum's outlines.
- [3] Randall D. Knight, Physics for Scientists and Engineers, Pearson.
- [4] Yakov Perelman, Oh, la Physique!, Dunod.

Table des matières

3	La dynamique: les trois lois de Newton	1
3.1	Qu'est-ce qu'une force?	1
3.2	La première loi de Newton: la loi d'inertie	3
3.3	La quantité de mouvement	4
3.4	La deuxième loi de Newton: la relation entre la force et les changements de mouvement	4
3.5	La troisième loi de Newton: action et réaction	6
3.6	Conservation de la quantité de mouvement	6

3

La dynamique: les trois lois de Newton

Nous introduisons dans ce chapitre un concept important pour la physique, celui de la force. Le concept de force permet de décrire quantitativement l'interaction entre deux corps, ou entre un corps et son environnement. La dynamique étudie le lien entre le mouvement et la force qui induit ou modifie ce mouvement. Les trois lois de Newton permettent d'étudier la dynamique qui régit l'action des forces sur le mouvement.

3.1 Qu'est-ce qu'une force?

Il est très difficile de définir une force par un autre moyen que ses résultats. La force est l'agent du changement, celui qui modifie le vecteur vitesse d'un corps (l'amplitude ou la direction), ou essaie de le faire. Dans l'Univers, tel qu'il existe aujourd'hui, il y a quatre forces fondamentales distinctes: gravitationnelle, électromagnétique, forte et faible. Les forces macroscopiques peuvent être mesurées par un dynamomètre et l'unité utilisée est le *newton* (N). La définition de cette unité sera donnée plus tard dans ce chapitre, dans la section 3.4. La force étant un vecteur, l'effet net de plusieurs forces est le même que celui d'une seule force qui correspond à la somme vectorielle des forces appliquées.

Un équilibre **statique** est obtenu quand la somme vectorielle de toutes les forces sur un corps immobile est zéro; il n'y a aucun mouvement dans ce cas (figure 3.1). Quand la somme vectorielle de toutes les forces n'est pas zéro, la situation est **dynamique**. Il y a une accélération dans la direction de la force résultante.

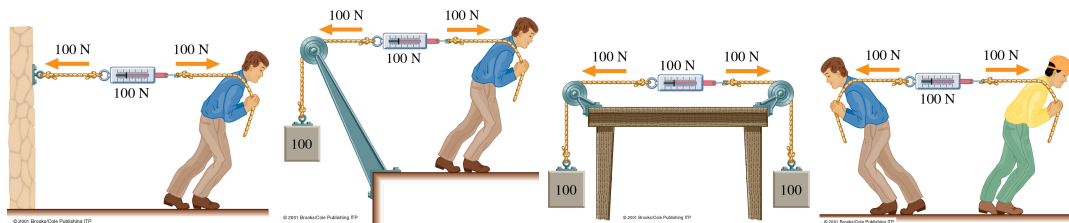
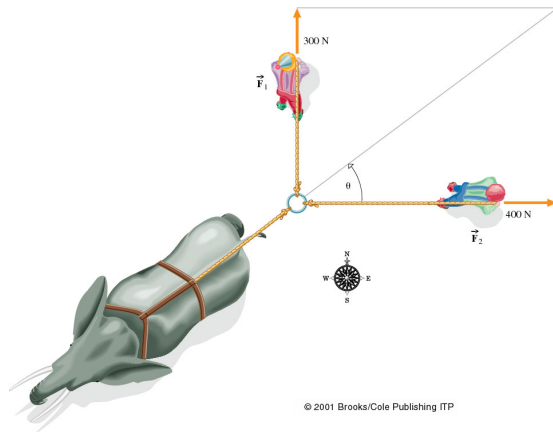


Figure 3.1: Utilisation d'un dynamomètre pour mesurer les forces. La figure illustre des situations qui semblent être différentes mais qui sont équivalentes "vues" du dynamomètre. Les exemples de cette figure montre des situations d'équilibre statique.

Exemple 3.1.1. Déterminer la force résultante exercée sur l'éléphant par les deux clowns.



Solution Données: $F_1 = 300 \text{ N}$ et $F_2 = 400 \text{ N}$. À déterminer: La résultant \vec{F} . Nous voulons la somme vectorielle: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Comme les forces forment un triangle rectangle, $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = 500 \text{ N}$. Pour trouver l'angle de \vec{F} avec l'axe est-ouest, on utilise la définition de $\tan \theta$: $\theta = \tan^{-1} \frac{300}{400} = 36.9^\circ$ nord-est.
Vérification rapide: $(500 \text{ N}) \cos 36.9^\circ = 400 \text{ N}$.

Exemple 3.1.2. Déterminer la force nette exercée sur l'anneau par les trois personnes dans la figure 3.2.

Solution Données: $F_1 = 707 \text{ N}$, $F_2 = 500 \text{ N}$, et $F_3 = 966 \text{ N}$. À déterminer: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$.

Décomposons les trois vecteurs en leur composantes pour obtenir la résultante, comme indiqué aux figures ci-dessous.

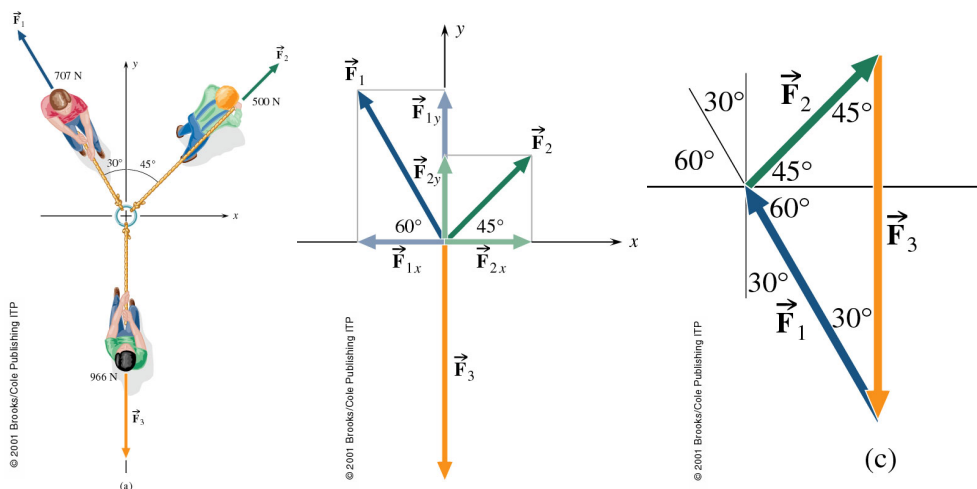


Figure 3.2: Trois forces passant par un même point et appliquées dans des directions différentes. Les trois forces sont décomposées suivant les axes x et y . Comme la résultante des forces est nulle, les trois vecteurs forment un triangle.

3.2 La première loi de Newton: la loi d'inertie

Isaac Newton est né le jour de Noël 1642, année de mort de Galilée. Newton fut sûrement l'un des plus grands génies de tous les temps. Une des plus belles réussites de Newton est sa théorie du mouvement qui n'a jamais été mise en défaut pendant 200 ans.

En 1687, Isaac Newton a formulé les "axiomes ou lois du mouvement" dans son grand ouvrage *Philosophiae naturalis principia mathematica* (appelé aujourd'hui *Principia*). Sa première loi était la loi d'inertie, qui répond la question, *que se passe-t-il lorsqu'aucune force n'agit sur un corps?* **Tout corps reste immobile ou conserve un mouvement rectiligne et uniforme aussi longtemps que la somme des forces extérieures agissant sur lui est nulle.** Il a attribué cette loi à Galilée.

$$\sum \vec{F} = 0 \Leftrightarrow \vec{v} = \text{constante} \quad (\text{première loi de Newton})$$

La loi d'inertie est une loi idéale. Nulle part dans l'Univers, un objet peut être libéré complètement des influences externes. C'est pour ça que sur Terre, la vérification directe de cette loi est difficile, car la résistance de l'air et la gravité ne peuvent pas être supprimées.

Nous avons déjà vu une application de la loi d'inertie au mouvement des projectiles (section 2.3.3). Dans la direction horizontale, où il n'y a pas de force appliquée dans le cas où on néglige la résistance d'air, le mouvement est rectiligne et uniforme. Dans la direction verticale, la force gravitationnelle agit sur l'objet et change sa vitesse.

La loi d'inertie est valable dans tous les référentiels à vitesse relative constante. Un tel référentiel est un **référentiel d'inertie**. Un exemple est donné à la figure 3.3: le mouvement vertical des clés qui tombent dans un train est aperçu différemment par une personne qui se trouve dans le train et une autre personne qui regarde ce même train passer. Le mouvement horizontal du train n'a aucun effet sur la loi de la chute.

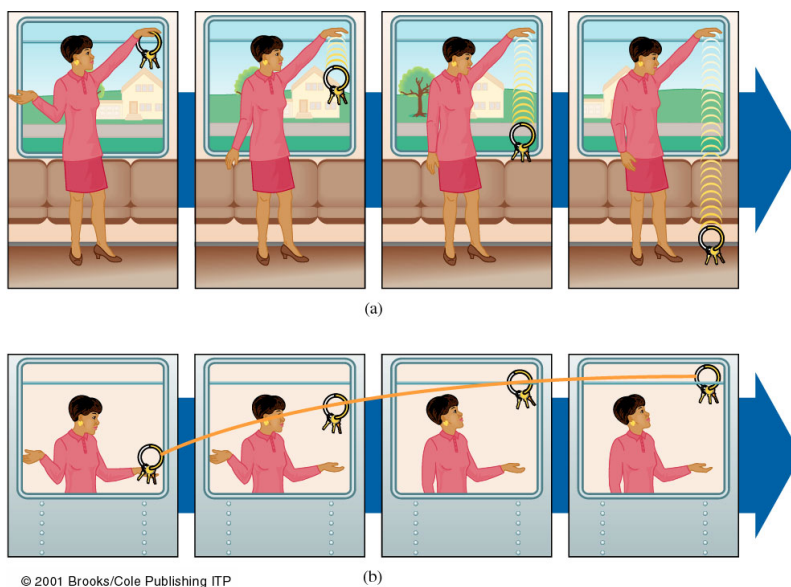


Figure 3.3: Une expérience faite à l'intérieur d'un train en mouvement rectiligne et uniforme. Observées de l'intérieur, les clés lâchées tombent verticalement, vers le bas. Observées de l'extérieur du train, les clés lancées verticalement vers le haut, décrivent une parabole, similaire au projectile d'un canon.

Les propriétés d'inertie d'un corps sont caractérisées par sa **masse**: plus la masse d'un corps est grande, plus il résiste à la force. La masse est associée à la quantité de matière, qui ne change pas d'un endroit à un autre dans l'Univers, contrairement au poids qui est proportionnel à l'accélération gravitationnelle.

3.3 La quantité de mouvement

La quantité de mouvement ou impulsion (en anglais *momentum*) est le produit de la masse par la vitesse:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (3.1)$$

La vitesse caractérise l'état instantané du mouvement et la masse caractérise l'inertie du corps et sa 'préférence' à préserver son propre état. La quantité de mouvement est un vecteur. L'unité de la quantité de mouvement est une masse multipliée par une vitesse, par exemple:

$$[p] = [m] \cdot [vitesse] = kg \cdot \frac{m}{s}$$

La quantité de mouvement nous donne une vraie mesure du mouvement. Imaginez une mouche et une voiture qui se déplacent les deux à 60 km/h. Comme la vitesse, la quantité de mouvement est relative. La quantité de mouvement d'un objet de vitesse \vec{v} par rapport à un observateur est $m\vec{v}$ relativement à cet observateur. La quantité de mouvement d'un pilote volant à 800 km/h est nulle par rapport à l'avion.

3.4 La deuxième loi de Newton: la relation entre la force et les changements de mouvement

La deuxième loi de Newton lie la variation de la quantité de mouvement d'un corps aux forces qui lui sont appliquées. Plus précisément, *La force moyenne exercée sur un corps est égale à la variation résultante de la quantité de mouvement divisée par la durée du processus.*

$$\vec{F}_m = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} \quad (\text{deuxième loi de Newton})$$

Cette loi implique les deux concepts suivants: (a) l'impulsion d'un objet change sous l'effet d'une force, et (b) la force résulte d'un changement d'impulsion. Dans ce formalisme, l'interaction entre deux corps est le résultat d'un échange d'impulsion. Au niveau quantique, cet échange est véhiculé par l'échange d'une particule spécifique pour chacune des 4 forces fondamentales:

Force	Agit sur...	Intensité relative	Particule
Forte	quarks et particules les contenant	1	gluon g
Electromagnétique	particules chargées électriquement	$\approx 10^{-2}$	photon γ
Faible	toutes particules	$\approx 10^{-5}$	W^\pm, Z^0
Gravitationnelle	toutes particules massives	$\approx 10^{-42}$	graviton (hypothétique)

L'essence de la deuxième loi de Newton est qu'une force instantanée cause un changement instantané de l'impulsion. Ceci se voit en faisant tendre Δt vers zéro dans la définition de cette deuxième loi.

$$\vec{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

et pour le cas où la masse est constante pendant l'application de la force \vec{F} ,

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} \quad (3.2)$$

La force donc accélère les objets dans sa propre direction. Une force appliquée à un objet de mass 1 kg qui provoque une accélération constante de 1 m/s^2 est définie comme une force de 1 *newton* (1 N):

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

Autrement dit, nous définissons 1 N comme la force qui, agissant sur un corps quelconque, produit une variation de sa quantité de mouvement égale à $1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ en 1 s.

Exemple 3.4.1. Une balle de masse $m = 0.142 \text{ kg}$ quitte la main d'un joueur avec une vitesse finale de 20 m/s . Déterminez le module de la force, supposée constante, pour un lancement rectiligne qui dure 0.02 s .

Solution Données: la masse de l'objet, $m = 0.142 \text{ kg}$; la durée de l'accélération, $\Delta t = 0.02 \text{ s}$; la vitesse initiale, $v_i = 0$ et la vitesse finale, $v_f = 20 \text{ m/s}$.

Puisque la force est supposée constante, l'accélération l'est aussi, égale à l'accélération moyenne:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{\Delta t} = \frac{20 \text{ m/s}}{0.02 \text{ s}} = 1000 \text{ m/s}^2$$

La force sera donc, $F = ma_m = (0.142 \text{ kg})(1000 \text{ m/s}^2) = 142 \text{ N}$.

Exemple 3.4.2. Un vieux taxi de masse $m = 1741.7 \text{ kg}$, roule sur une route à la vitesse $v = 35.8 \text{ m/s}$, lorsque le conducteur décide de continuer au point mort. La résistance de l'air le ralentit jusqu'à 22.4 m/s en 24 s avec une décélération non uniforme. (a) Calculez la décélération moyenne pendant cet intervalle de temps. (b) Déterminez la force moyenne agissant sur la voiture.

Solution (a) Selon la définition de l'accélération, sa moyenne a_m vaut:

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{\Delta t} = \frac{(22.4 - 35.8) \text{ m/s}}{24 \text{ s}} = -0.558 \text{ m/s}^2$$

(b) La force moyenne vaut:

$$F_m = ma_m = (1741.7 \text{ kg})(-0.558 \text{ m/s}^2) = -971.9 \text{ N}$$

Le signe négatif indique que la force décélère l'objet.

La force qui figure dans la 2ème loi de Newton, est la force nette appliquée à l'objet de masse m , i.e. la somme de toutes les forces appliquées:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

Cette équation représente trois équations, une pour chaque direction de l'espace:

$$\sum F_x = ma_x, \quad \sum F_y = ma_y, \quad \sum F_z = ma_z$$

3.5 La troisième loi de Newton: action et réaction

Un corps isolé obéit à la loi de l'inertie. Par contre, l'interaction de deux entités implique une paire de forces de même module et de sens opposés, chacune agissant sur une entité. Lorsque deux corps A et B interagissent, ils exercent l'un sur l'autre des forces égales en grandeur et opposées en direction:

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA} \quad (\text{troisième loi de Newton})$$

Cette formulation implique que chaque force fait partie d'une paire interactive.

Quand on parle d'une force, on ne considère d'habitude que la moitié de l'interaction. On ressent la gravitation parce que la Terre attire tous nos atomes vers son centre. Mais la Terre est aussi attirée par nous avec la même force. Si un objet ne se comporte pas selon la loi d'inertie, ceci implique la présence d'un deuxième objet dans le système qui interagit avec lui.

Exemple 3.5.1. Le moteur d'une petite fusée éjecte 10 kg de gaz d'échappement par seconde. En supposant que ces molécules ont une vitesse moyenne de 600 m/s, calculer la poussée de ce moteur.

Solution Données: pour le gaz d'échappement $v_i = 0$, $v_f = 600$ m/s et 10 kg sont éjectés par seconde. À déterminer: la poussée F_m exercée par le moteur.

Nous savons qu'à chaque seconde, 10 kg de gaz d'échappement subissent un accroissement de vitesse de $\Delta v = 600$ m/s. La force moyenne exercée sur le gaz est donc:

$$F_m = \frac{m\Delta v}{\Delta t} = \frac{(10 \text{ kg})(600 \text{ m/s})}{1 \text{ s}} = 6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Le moteur pousse donc le gaz avec une force F_m dirigée vers l'arrière et le gaz exerce sur la fusée une poussée égale en module et dirigée vers l'avant.

3.6 Conservation de la quantité de mouvement

Une des idées majeures de la physique est la loi de conservation de la quantité de mouvement. **Si la résultante de toutes les forces externes agissant sur un système est nulle, la quantité de mouvement du système reste constante.** En d'autres termes, la quantité de mouvement totale de l'Univers reste inchangée et le sera à jamais.

Nous retournerons beaucoup à ce sujet plus tard dans le cours.

Exercices

Exercice 3.1. Le tir sur cible mobile. La cible de la figure 3.4 est lâchée au moment du tir et tombe en chute libre. Le boulet du canon frappera-t-il la cible?

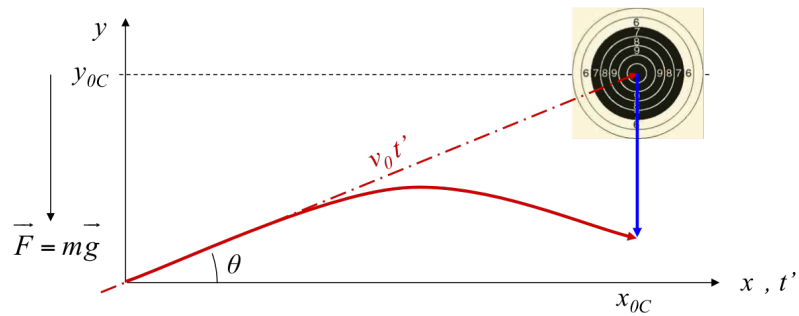


Figure 3.4: Données du problème: le vecteur vitesse initiale \vec{v}_0 (inclus l'angle θ), la position de la cible à rapport au canon.