Cours de Physique
3BC

Yves Reiser

version du 14 juin 2017

Table des matières

Chapitre I

Mécanique

1 Rappels sur les forces

1.1 Les effets d'une force

Une force n'est pas visible, mais on peut voir les *effets d'une force*.

Elle peut :
- changer la nature du mouvement d'un corps : **effets dynamiques**
- déformer un corps : **effet statique**

En l'absence de force, aucun de ces effets n'est possible. Inversement, aucun de ces effets n'est possible sans que la cause en soit une force.

1.1.1 Effets dynamiques

Il y a *changement de la nature du mouvement* lorsque la valeur de la vitesse change, ou bien lorsque la direction de la vitesse d'un corps change.

- un corps, initialement immobile, est mis en mouvement (ex. : fusée qui est lancée)
- un corps, se déplaçant à une vitesse donnée, augmente sa vitesse (ex. : moto qui accélère)
- un corps, se déplaçant à une vitesse donnée, diminue sa vitesse (ex. : train qui décélère)
- un corps, se déplaçant à une vitesse donnée, est arrêté (ex. : voiture qui heurte un arbre)
- un corps en mouvement change de direction (ex. : bille en acier déviée par un aimant)
- un corps en mouvement change de sens (ex. : rebondissement d'une balle)

1.1.2 Effet statique

Les forces peuvent aussi entraîner la *déformation d'un corps*.
ex. : déformation d'une cannette de boisson par une main

1.2 Représentation d'une force

En physique, une force est représentée par un *vecteur*. Un vecteur possède, tout comme une force, 4 caractéristiques :

- le point d'application : le point où la force s'applique à un corps
- la direction : la ligne/droite d'action de la force
- le sens
- la norme : la grandeur/l'intensité da la force

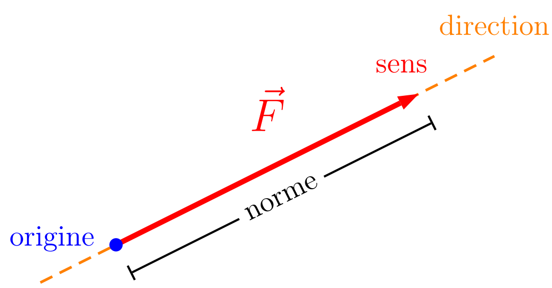


FIGURE I.1 – Vecteur force

Attention !
Le symbole $\vec{F}$ d'un vecteur force désigne la force avec ses 4 caractéristiques.
Le symbole F (sans flèche) ne désigne que la norme de la force $\vec{F}$: $F = ||\vec{F}||$
On peut donc bien écrire p.ex. F=$3,2$ N, **mais non** $\vec{F} = 3,2$ N.

1.3 Unité SI et instrument de mesure d'une force

On peut mesurer la norme d'une force à l'aide d'un *dynamomètre*. A la base de son principe de fonctionnement est la *„Loi de Hooke"* qui sera traitée dans la section suivante.

L'unité SI de la norme d'une force est le *Newton* (N).

2 La loi de Hooke

2.1 Expérience préliminaire

Etirons un ressort suspendu en appliquant une force à son extrémité inférieure.

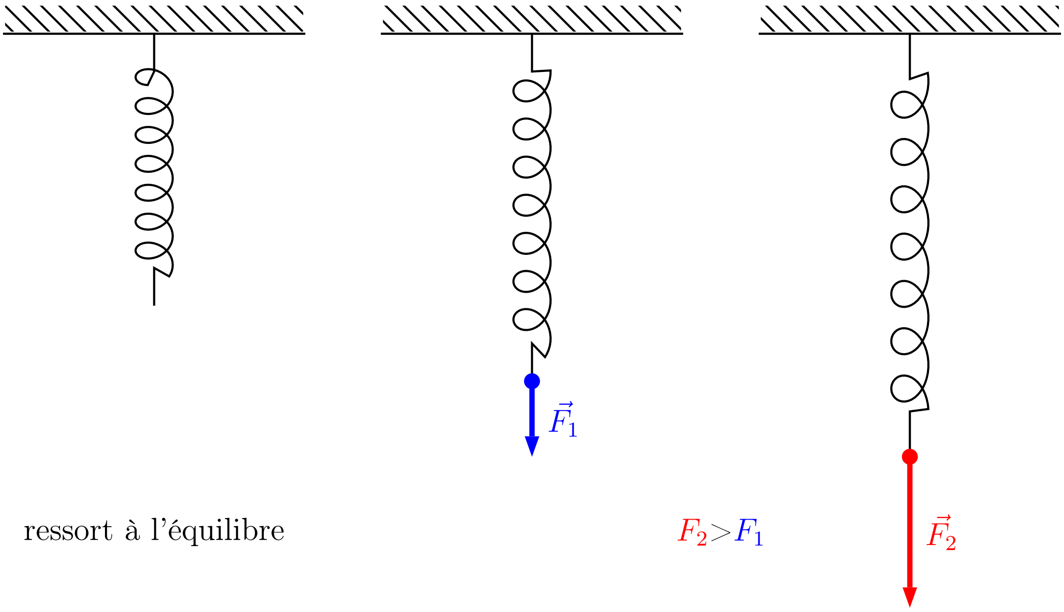


FIGURE I.2 – Forces appliquées à un ressort

<u>On constate :</u>
Si on augmente l'intensité de la force appliquée au ressort, l'allongement augmente également.

2.2 Caractéristique x-F d'un ressort

Pour un ressort donné, mesurons les valeurs de l'allongement x en fonction des forces F appliquées. Pour appliquer des forces bien précises, on accroche des masses pour lesquelles on peut facilement calculer le poids (effectivement la masse étire alors le ressort par une force qui est tout simplement égale à son poids).

Rappel : Le poids P (une force !) d'un corps est, en un endroit donné, proportionnel à sa masse m (qui ne dépend pas de l'endroit), d'après la formule $P = m \cdot g$ où g est l'intensité de la pesanteur ($g_{Terre} = 9,81$ N/kg).

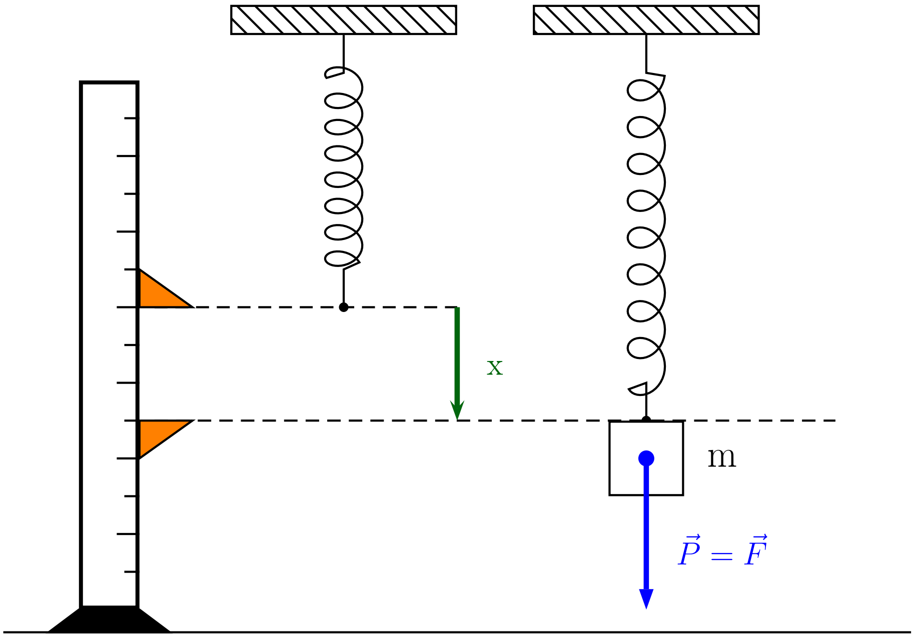


Tableau de mesure :

m(g)	m(kg)	**F(N)**	x(cm)	**x(m)**	

En comparant les valeurs de F(N) aux valeurs de x(m), on constate :

Dans la colonne supplémentaire du tableau, calculons les rapports F/x (N/m) pour chaque couple de valeurs.

On constate :

Représentons la *caractéristique x-F* du ressort : c'est le graphique sur lequel on représente la force F en fonction de l'allongement x.

On constate : Aux erreurs expérimentales près, les points de mesure se trouvent sur une *droite passant par l'origine.*

Conclusion :

Cherchons l'équation de la *droite de régression* :

Déterminons le plus précisément possible les coordonnées de 2 points A et B qui se trouvent sur la droite (les points A et B doivent être assez éloignés l'un de l'autre).

Pour le point A(x_A,F_A), nous avons : x_A=_____m et F_A=_____ N.

Donc A(_____m,_____N).

Pour le point B(x_B,F_B), nous avons : x_B=_____m et F_B=_____ N.

Donc B(_____m,_____N).

En général, la pente a d'une droite dans un graphique y-x se calcule par la formule
pente $a = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}$.

Ici, notons la pente k. On a donc :

$$\textit{pente}\ k = \frac{F_B - F_A}{x_B - x_A} = \frac{\qquad\qquad}{\qquad\qquad}\frac{N}{m} = \frac{\qquad\qquad}{\qquad\qquad}\frac{N}{m} = \qquad\qquad \frac{N}{m}.$$

L'équation générale d'une droite passant par l'origine s'écrit $y = a \cdot x$ (où a est la pente).

L'équation de notre droite s'écrit donc :

$$F = k \cdot x$$

En comparant la valeur de la pente trouvée aux quotients F/x dans le tableau (dernière colonne), on constate :

RéSigmaé :

1. Dans le tableau de valeurs, si la force est multipliée par n, l'allongement est aussi multiplié par n (aux erreurs exp. près).
2. Le quotient F/x est une constante (aux erreurs exp. près).
3. La caractéristique x-F est une droite passant par l'origine.

Conclusion :

L'allongement x d'un ressort **est proportionnel** à la force F appliquée.

2.3 La loi de Hooke

On vient de constater que, dans la caractéristique x-F d'un ressort, l'équation de la droite de régression s'écrit

$$F = k \cdot x$$

Cette relation est appelée la *«loi de Hooke»* [1]. Elle traduit la proportionnalité entre allongement et force.

Elle peut aussi s'écrire :

$$x = \frac{F}{k}$$

ou encore :

$$k = \frac{F}{x}$$

La constante k est appelée la *«raideur»* du ressort. Son unité SI est le Newton par mètre (N/m). Sa valeur correspond à *la force dont on a besoin pour étirer le ressort de 1 mètre.* Ainsi, chaque ressort a une raideur bien déterminée.

La raideur peut aussi s'exprimer en N/cm :

$$1N/cm = 100N/m$$

Pour un ressort de *raideur élevée*, il faut une force plus grande pour l'étirer d'une longueur donnée que pour un ressort de *raideur moins élevée.*

Une fois que l'on connaît la raideur k d'un ressort, la loi de Hooke nous permet donc de calculer la force F nécessaire à un allongement quelconque, resp. de calculer l'allongement x qui correspond à une force appliquée F quelconque.

La loi de Hooke est valable pour tous les ressorts en acier, aussi longtemps qu'on ne dépasse pas leur limite d'élasticité (c'est-à-dire qu'on ne les allonge pas au point qu'ils ne reprennent pas leur forme d'origine).

1. D'après Robert HOOKE (1635-1703, Grande-Bretagne), un des plus grands scientifiques expérimentaux du $XVII^e$ siècle

Le *dynamomètre* met à profit loi de Hooke. A l'intérieur, un ressort s'allonge de façon proportionnelle à la force que l'on veut mesurer. Au lieu d'indiquer, sur l'échelle, la valeur de l'allongement, on met directement la valeur de la force correspondante (comme le constructeur connaît la raideur du ressort utilisé).

3 Composition et décomposition de forces

3.1 Composition de forces

Si un corps est soumis à plusieurs forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, ..., $\vec{F_N}$ (en même temps), l'effet résultant est le même que si on n'avait qu'une seule force $\Sigma\vec{F}$, appelée *résultante*.

> On appelle (force) résultante la force correspondant à la somme vectorielle de tous les vecteurs forces qui s'appliquent à un corps.
>
> $$\sum \vec{F} = \vec{F_1} + \vec{F_2} + ... + \vec{F_N}$$

Pour trouver la résultante $\Sigma\vec{F}$ de deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$, on peut :

— soit translater les vecteurs tel que l'origine du deuxième vecteur soit placée à l'extrémité du premier (ou inversement). Si on relie l'origine du premier vecteur à l'extrémité du deuxième vecteur, on obtient la résultante :

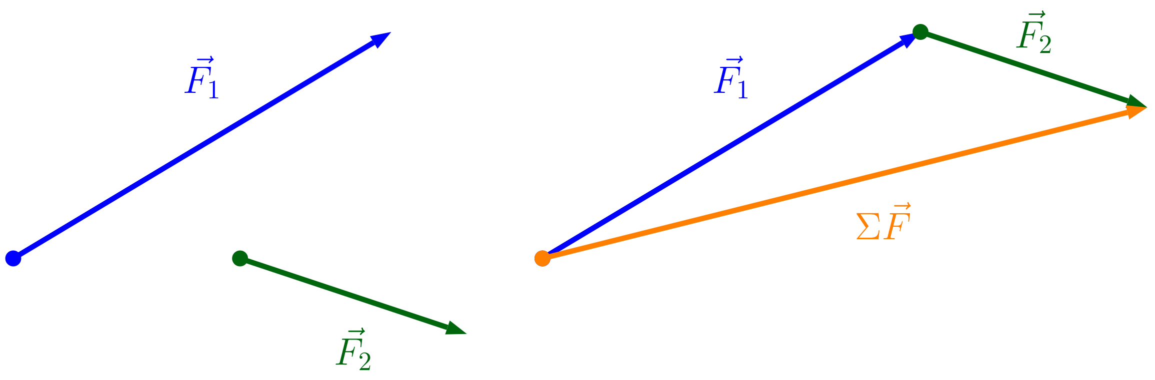


FIGURE I.3 – Addition de deux forces - Méthode 1

— soit dresser le *parallélogramme des forces* :

c'est le parallélogramme qui a comme côtés les deux forces à additionner. La résultante correspond à la diagonale.

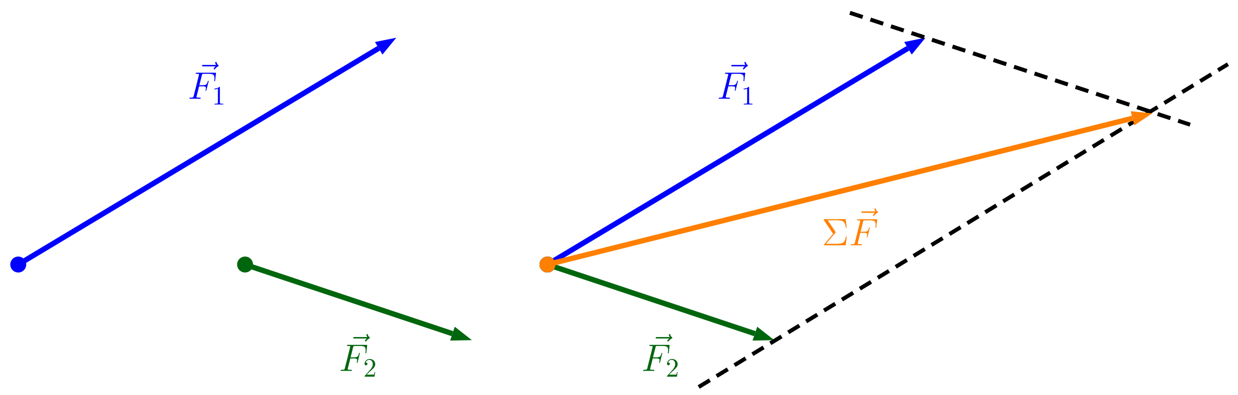


FIGURE I.4 – Addition de deux forces - Méthode 2

Attention !
En général, la norme de la résultante $\Sigma\vec{F}$ n'est pas égale à la somme des normes des composantes $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$:

$$||\Sigma\vec{F}|| \neq \Sigma F$$

Cas particulier : Addition de deux forces de directions perpendiculaires

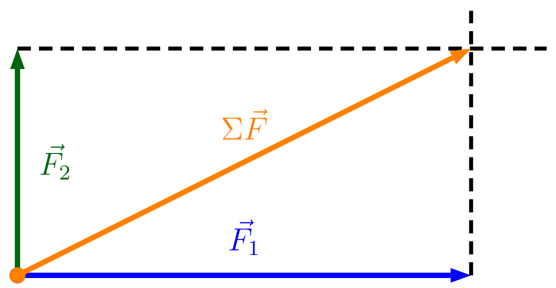


FIGURE I.5 – Addition de deux forces perpendiculaires

Dans ce cas, on peut facilement calculer la norme de la résultante en se servant du théorème de Pythagore :

$$||\Sigma\vec{F}|| = \sqrt{{F_1}^2 + {F_2}^2}$$

Cas particulier : Addition de deux forces de mêmes direction et sens
Si les deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ ont même sens et des directions parallèles, alors la norme de la résultante $\Sigma\vec{F}$ est égale à la somme des normes des forces composantes :

$$||\Sigma\vec{F}|| = F_1 + F_2$$

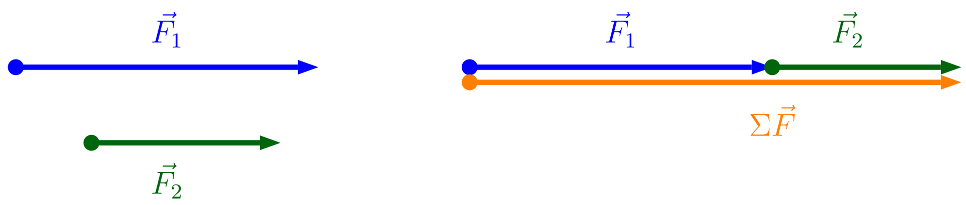


FIGURE I.6 – Addition de deux forces de même sens

Cas particulier : Addition de deux forces opposées

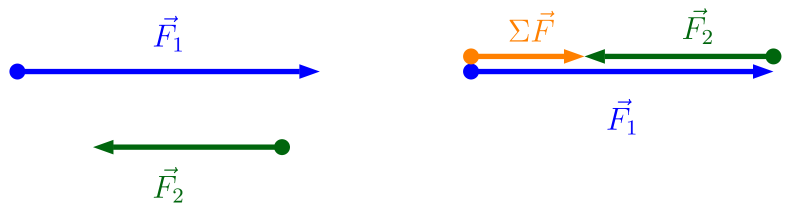


FIGURE I.7 – Addition de deux forces opposées

Si les deux forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ ont des directions parallèles, mais des sens opposés, alors la norme de la résultante $\Sigma\vec{F}$ est égale à la valeur absolue [2] de la différence des normes des forces composantes :

$$||\Sigma\vec{F}|| = |F_1 - F_2|$$

3.2 Décomposition de forces

Dans les chapitres suivants, il est souvent avantageux de remplacer une force $\vec{F}$ par deux forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$, dont l'action combinée est identique à celle de $\vec{F}$. Les forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ sont alors les *composantes* de la *résultante* $\vec{F}$:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Afin de déterminer les composantes d'une force $\vec{F}$, il faut d'abord judicieusement choisir les directions suivant lesquelles on va la décomposer. Ensuite, on trace des rayons suivant ces directions en partant de l'origine de $\vec{F}$. On construit alors le parallélogramme dont la diagonale est $\vec{F}$. Les côtés de ce parallélogramme constituent les composantes $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$.

2. Rappel : une norme est par définition toujours positive

Exemple :

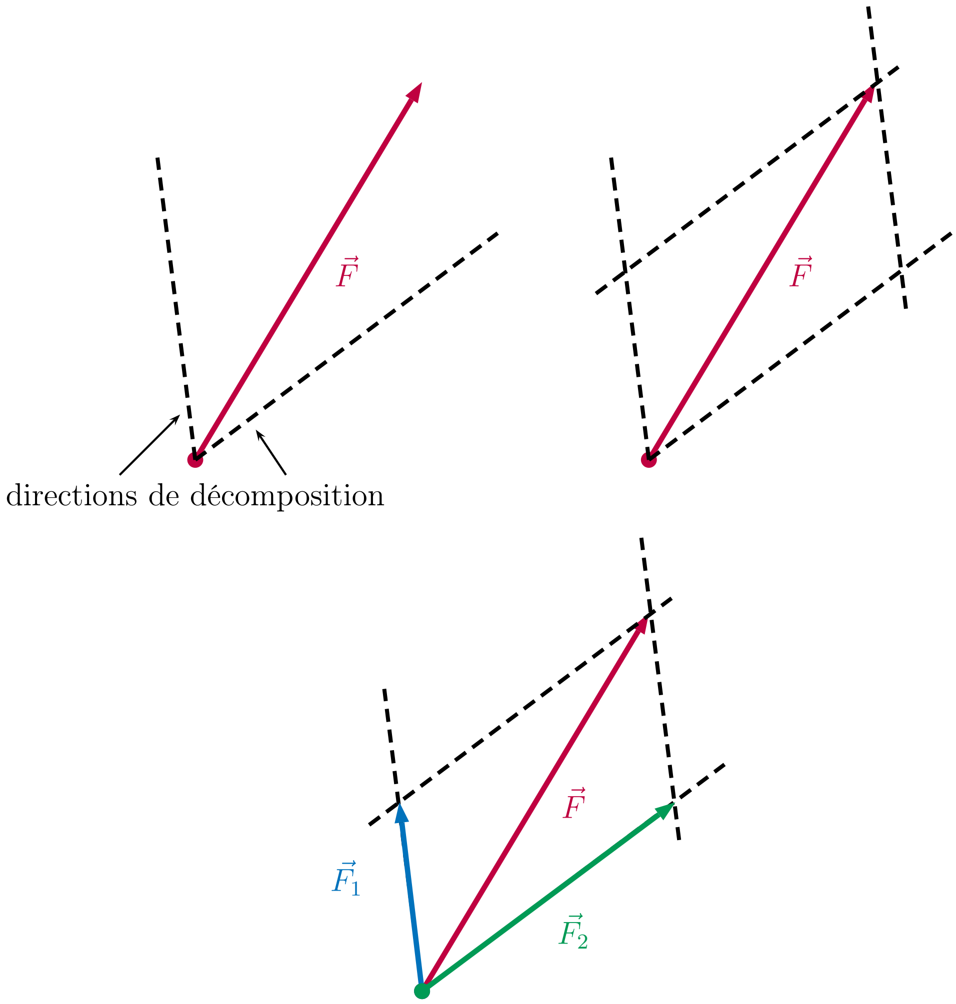


FIGURE I.8 – Décomposition d'une force selon deux directions quelconques

Cas particulier : Décomposition selon deux directions perpendiculaires.

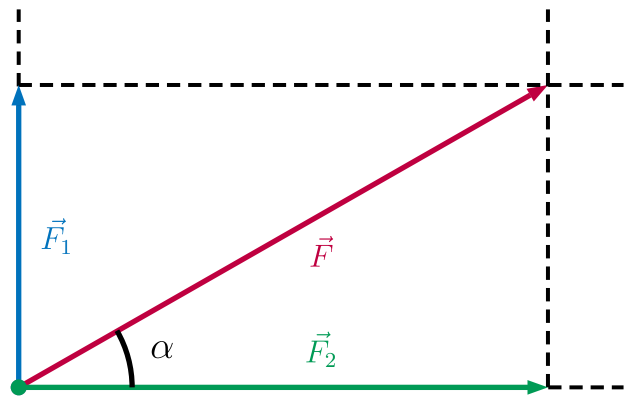


FIGURE I.9 – Décomposition d'une force selon deux directions perpendiculaires

Si les deux composantes ont des directions perpendiculaires, on peut facilement calculer leurs normes si on connaît la norme F de la résultante et l'angle α qu'elle fait avec l'horizontale.

En effet, on a :

$$\cos\alpha = \frac{F_2}{F} \iff F_2 = F \cdot \cos\alpha$$

De même :

$$\sin\alpha = \frac{F_1}{F} \iff F_1 = F \cdot \sin\alpha$$

4 Corps en équilibre

4.1 Définition

Lorsqu'un corps est soumis à plusieurs forces dont les effets se compensent, la nature de son mouvement ne varie pas. On dit que le corps est en équilibre.

En d'autres termes : tous les corps qui sont immobiles ou bien en mouvement rectiligne et uniforme se trouvent en équilibre.

4.2 Equilibre sous l'action de 2 forces

Expérience :
Accrochons sur un tableau magnétique un corps solide *léger* à deux dynamomètres tel que le corps soit en équilibre. Modifions plusieurs fois les tensions dans les fils.

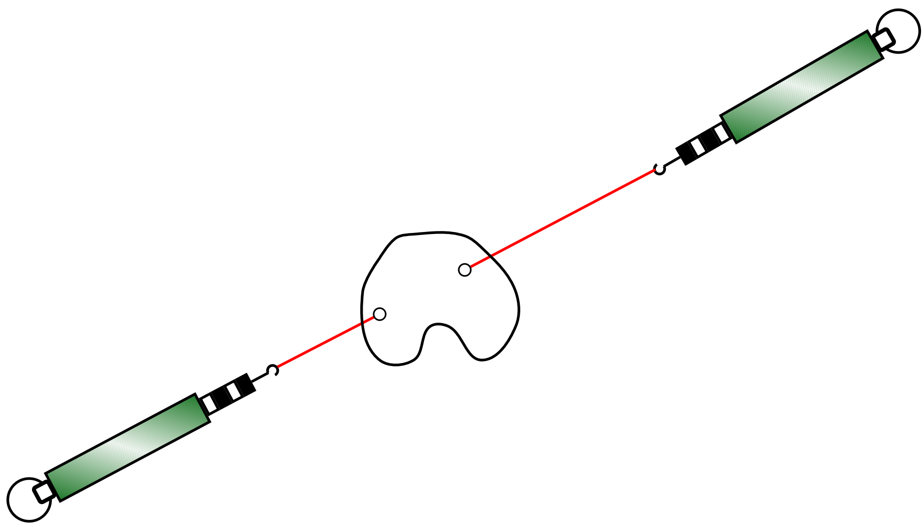


Figure I.10 – Solide accroché à deux dynamomètres

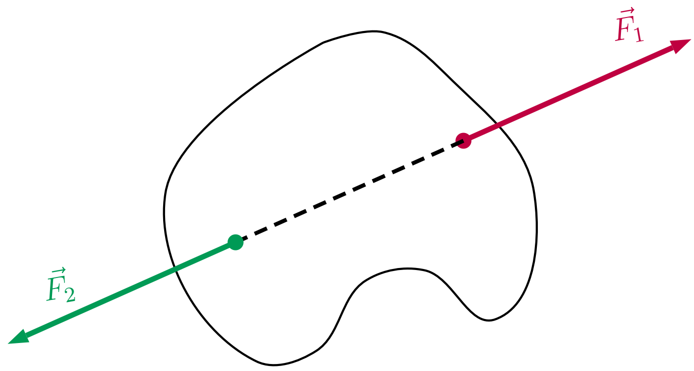


Figure I.11 – Corps en équilibre sous l'action de 2 forces

On observe :

Dès que le corps est au repos (donc en équilibre), les 2 dynamomètres indiquent exactement la même valeur. En plus, ils se trouvent sur une même droite. Si on augmente/diminue la tension dans l'un des fils, la tension dans l'autre augmente/diminue aussi.

Ainsi, les deux forces :

— ont même norme : $F_1 = F_2$
— ont même direction
— sont de sens opposés

Les forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ sont donc deux forces opposées et on a :

$$\vec{F_1} = -\vec{F_2}$$
$$\Leftrightarrow$$

$$\boxed{\vec{F_1} + \vec{F_2} = \vec{0}}$$

Remarque : Dans cette expérience, on a pu négliger le poids du solide (une force supplémentaire qui s'exerce sur lui), comme la norme du poids est négligeable devant les normes des autres forces qui s'exercent sur le corps.

Exemple :

Une lampe suspendue par un fil au plafond est soumis à deux forces :
- le poids $\vec{P}$, force avec laquelle la Terre attire la lampe verticalement vers le bas
- la tension du fil $\vec{T}$, force exercée par le fil sur la lampe, dirigée verticalement vers le haut

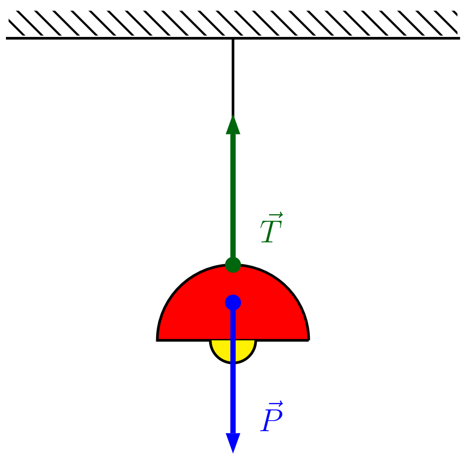


FIGURE I.12 – Lampe en équilibre sous l'action de 2 forces

La lampe est immobile, donc elle se trouve en équilibre, et on a :

$$\begin{aligned} & \vec{P}+\vec{T} &= \vec{0} \\ \Leftrightarrow \quad & \vec{P} &= -\vec{T} \end{aligned}$$

Les 2 forces ont même norme :

$$P = T$$

4.3 Equilibre sous l'action de 3 forces

Répétons l'expérience précédente, mais accrochons le solide à 3 dynamomètres.
Représentons les trois forces sur papier millimétré en respectant minutieusement les angles et les normes (préciser l'échelle utilisée). Puis déterminons géométriquement la *résultante* des 3 forces.
Remarque : On peut montrer que l'effet d'une force reste le même si on glisse la force le long de sa ligne d'action (droite qui porte le vecteur force). On peut donc représenter toutes les forces qui s'exercent sur un solide tel qu'e tous les vecteurs ont le même point d'origine.

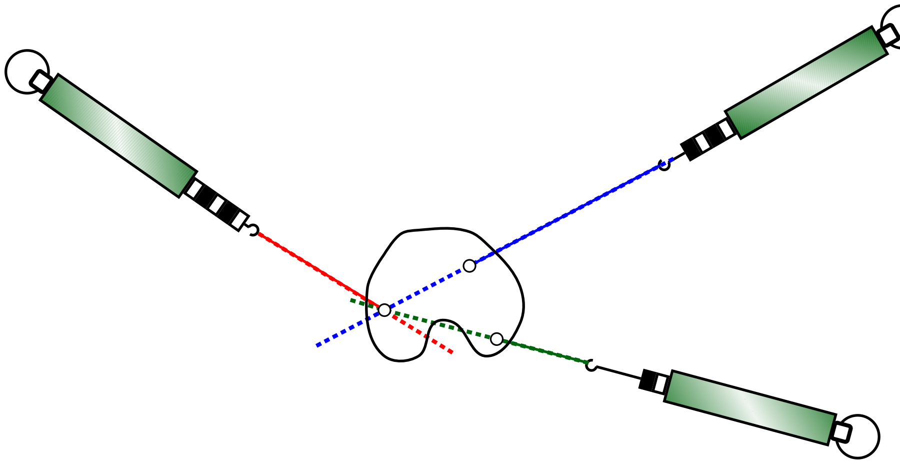
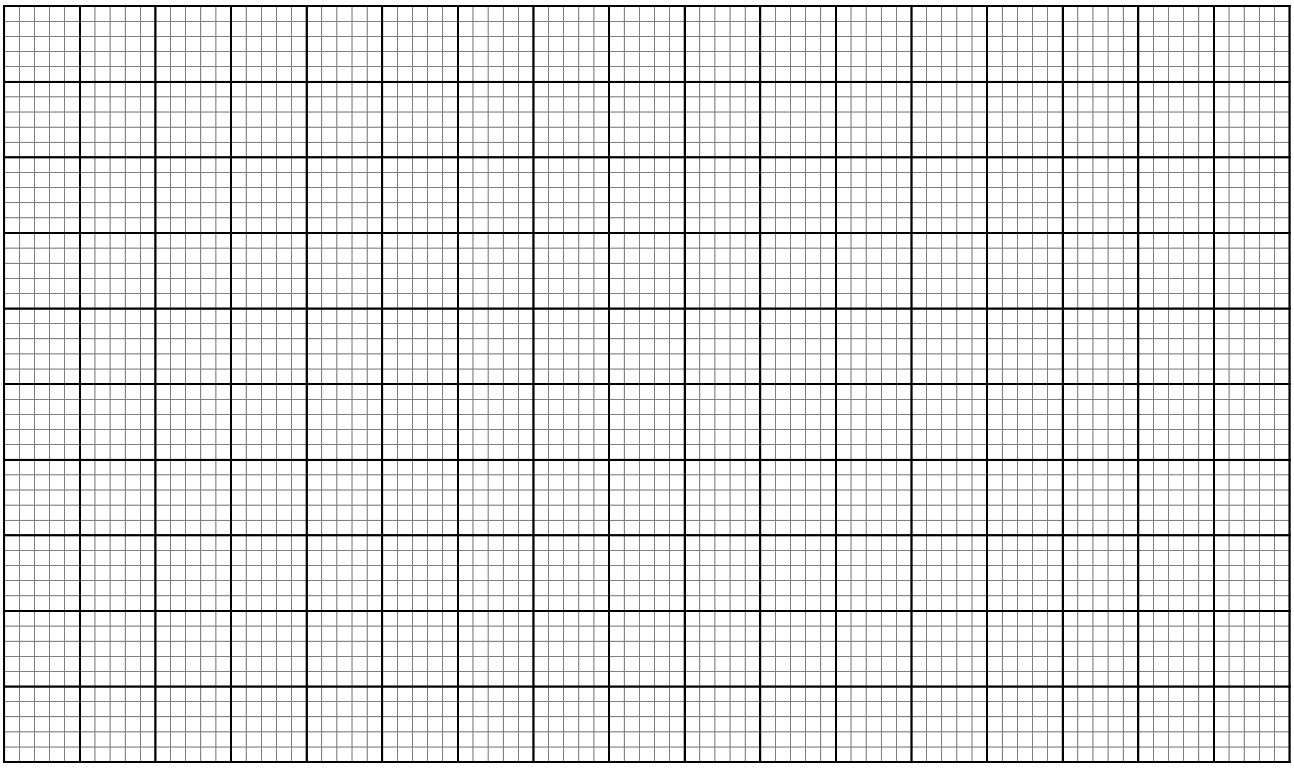


FIGURE I.13 – Solide accroché à trois dynamomètres



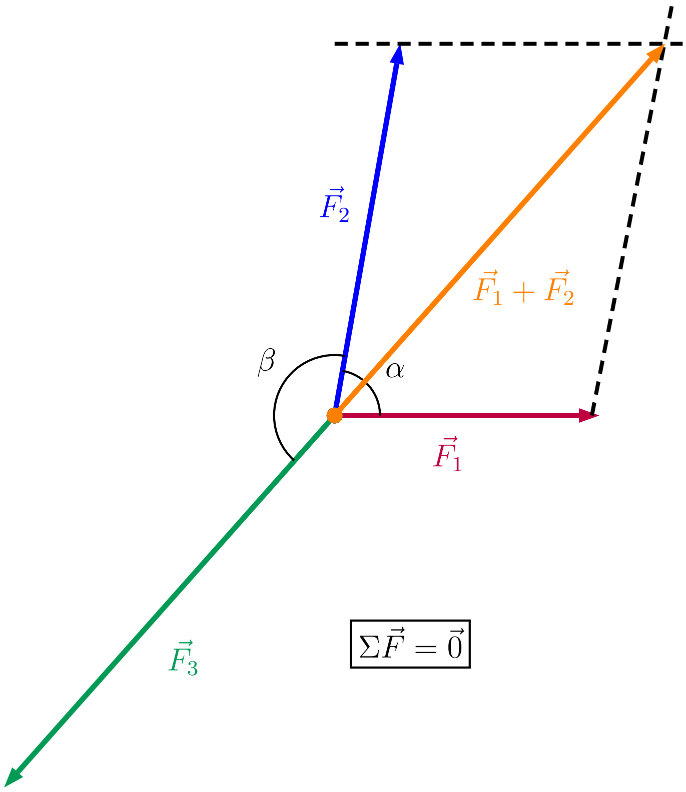


FIGURE I.14 – Equilibre sous l'action de trois forces - Exemple

<u>On constate :</u>

Si le corps est à l'équilibre,

- les 3 forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$ et $\vec{F_3}$ se trouvent dans un même plan (elles sont *coplanaires*)
- les lignes d'action (droites qui portent les vecteurs force) passent par un même point (les forces sont *concourantes*)
- la resultante $\Sigma\vec{F} = \vec{F_1} + \vec{F_2} + \vec{F_3}$, c'est-à-dire la somme des 3 forces, vaut nulle :

$$\boxed{\vec{F_1} + \vec{F_2} + \vec{F_3} = \vec{0}}$$

<u>Exemple :</u>

La lampe de la figure est suspendue à deux fils. Elle est soumise à 3 forces :
- la tension $\vec{T_1}$ dans le premier fil
- la tension $\vec{T_2}$ dans le deuxième fil
- le poids $\vec{P}$

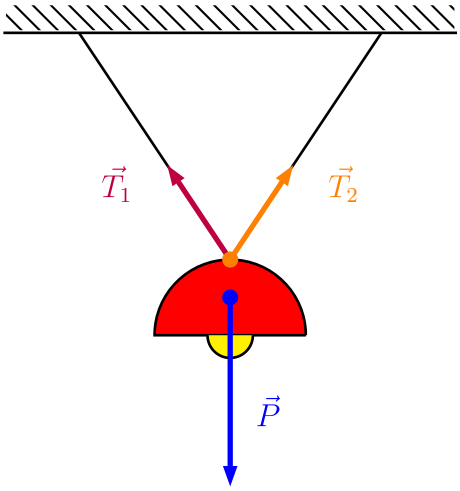


FIGURE I.15 – Lampe en équilibre sous l'action de 3 forces

Comme la lampe est immobile, elle se trouve en équilibre et on a :

$$\begin{aligned} & \vec{T}_1 + \vec{T}_2 &= -\vec{P}\ (*) \\ \Leftrightarrow\quad & \vec{P} + \vec{T}_1 + \vec{T}_2 &= \vec{0} \end{aligned}$$

Exercice : Vérifier l'équation (*) sur la figure en utilisant la méthode du parallélogramme de forces.

4.4 Cas général

Dans ce qui précède, on a pu constater que si un corps est soumis à deux ou à trois forces, la résultante de toutes ces forces s'annule. Ce résultat peut être généralisé pour un nombre quelconque de forces :

> Un corps est en équilibre si et seulement si la résultante de toutes les forces qui lui sont appliquées vaut nulle.

Mathématiquement, si les forces $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, ..., $\vec{F}_N$ s'exercent sur un corps, alors ce corps est en équilibre si et seulement si

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + ... + \vec{F}_N = \vec{0}$$

$$\boxed{\textit{équilibre} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i = \vec{0}}$$

Remarque : Si le nombre de forces est supérieur à 3, alors, à l'équilibre, il n'est pas nécessaire que toutes les forces soient coplanaires ou concourantes.

4.5 Corps isolés, corps pseudo-isolés

Un corps qui n'est soumis à *aucune force* est un corps *«isolé»*.
Un corps soumis à N forces dont la *résultante vaut nulle* est un corps *«pseudo-isolé»*.

Un corps est en équilibre s'il est soit isolé, soit pseudo-isolé.

5 Principes de Newton

En 1687, Newton[3] énonce ses fameuses *trois lois fondamentales de la mécanique* concernant les mouvements des corps.

5.1 Première loi de Newton : le principe d'inertie

Dans la section 1.1, on a vu que si un corps est soumis à *une* force, le corps va subir ou bien une déformation ou bien un changement de son état de mouvement. Il s'en suit que si le corps n'est soumis à aucune force, son mouvement va rester inchangé : le centre d'inertie G du corps (c'est le point d'application du poids du corps) va continuer son mouvement à vitesse constante et sur une trajectoire droite : il effectue un *mouvement rectiligne uniforme*. S'il était initialement au repos, il va rester au repos[4].

Remarque : Un corps qui est soumis à un ensemble de forces dont la résultante vaut nulle peut, dans certains cas, tourner autour de son centre d'inertie (rotation). Dans ces cas, ce n'est que le centre de gravité G qui effectue un mouvement rectiligne uniforme et non les autres points du corps.

Ce principe, appelé *«principe d'inertie»* reste valable pour tout corps en équilibre, c'est-à-dire qu'il s'applique aussi à un corps qui est soumis à plusieurs forces dont la *résultante vaut nulle*.

Enoncé :

> Si un corps n'est soumis à aucune force (corps isolé) ou s'il est soumis à un ensemble de forces dont la résultante est nulle (système pseudo-isolé), alors le centre d'inertie G du corps décrit un mouvement rectiligne et uniforme.

Exemples :

— La lampe de la page 18 est immobile et elle va le rester. Elle est pseudo-isolée, car il y a équilibre sous l'action de 2 forces : le poids $\vec{P}$ de la lampe et la tension dans le fil $\vec{T}$. Si on coupe le fil, la force $\vec{T}$ disparaît. Désormais, $\vec{P}$ est la seule force qui agit sur la lampe. Elle n'est plus pseudo-isolée et ainsi son mouvement va changer du repos en un mouvement uniformément accéléré vers le bas.

— Un météorite, loin de tout autre corps céleste, n'est soumis à aucune force de norme considérable (il est quasiment isolé). Il peut tourner autour de lui-même, mais, d'après le principe d'inertie, son centre de gravité va effectuer un mouvement rectiligne à une vitesse constante de l'ordre de dizaines de km/s. Ce mouvement peut durer plusieurs années, jusqu'au moment où il y aura une force quelconque (lors d'une collision, en approchant le champ de gravitation d'un corps céleste de masse importante, ...) qui le dévie, l'accélère ou le ralentit.

— Considérons une voiture qui roule à 120 km/h sur une autoroute rectiligne et horizontale : si la norme de la force motrice est exactement égale à la norme des forces de frottement,

3. Sir Isaac Newton (1643-1727), philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste, astronome et théologien anglais. Newton est le père de la mécanique classique.

4. le repos est un cas particulier du mouvement rectiligne uniforme, la vitesse étant constamment égale à zéro

alors, selon le principe d'inertie, la voiture va suivre un mouvement rectiligne et uniforme, car elle sera un corps pseudo-isolé.

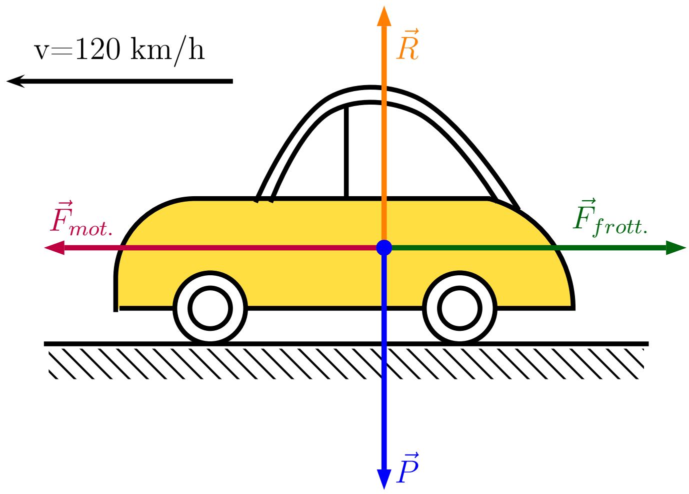


FIGURE I.16 – Voiture en mouvement rectiligne uniforme

— Si $F_{mot.} = F_{frott.}$, alors la voiture va continuer son mouvement à vitesse constante (la résultante de toutes les forces vaut nulle).

— Si $F_{mot.} > F_{frott.}$, alors la voiture va accélérer (la résultante de toutes les forces est un vecteur qui pointe vers l'avant.)

— Si $F_{mot.} < F_{frott.}$, alors la voiture va ralentir (la résultante de toutes les forces est un vecteur qui pointe vers l'arrière).

Remarque : La force $\vec{R}$ est la «réaction du sol». Sur sol horizontal, cette force est exactement opposée au poids $\vec{P}$. Cette force sera discutée en détail dans la section 5.2.

— La chariot sur un rail à coussin d'air est un corps pseudo-isolé sur lequel s'appliquent 2 forces : son poids $\vec{P}$ et la force pressante du coussin d'air $\vec{F}_{air}$. Il effectue un mouvement rectiligne uniforme ou il va rester au repos.

— Pour soulever un corps *à vitesse constante*, il faut que le corps soit en équilibre sous l'action de la force de soulevage $\vec{F}$ et de son poids $\vec{P}$. Ainsi, durant le mouvement à vitesse constante, l'opérateur qui soulève le corps doit exercer une force dont la norme est exactement égale au poids du corps : $\vec{F} = -\vec{P}$ et donc $F = P$!

5.2 Deuxième loi de Newton : Principe de l'action et de la réaction

Ce principe est aussi appelé *«principe des actions réciproques»*.

Enoncé :

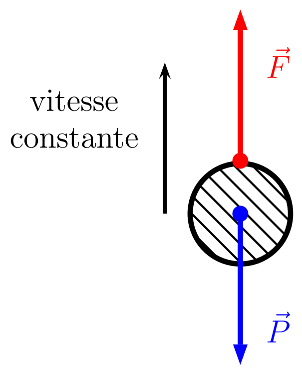


FIGURE I.17 – Une sphère soulevée à vitesse constante

A chaque fois qu'un corps A exerce une force $\vec{F}_{A/B}$ (action) sur un corps B, alors le corps B réagit en exerçant sur le corps A la force $\vec{F}_{B/A}$ (réaction) tel que $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$.

Les deux forces $\vec{F}_{B/A}$ et $\vec{F}_{A/B}$ sont opposées, c'est-à-dire

- ils ont la même direction
- ils sont de sens opposés
- ils ont la même norme : $F_{B/A} = F_{A/B}$

Exemples :

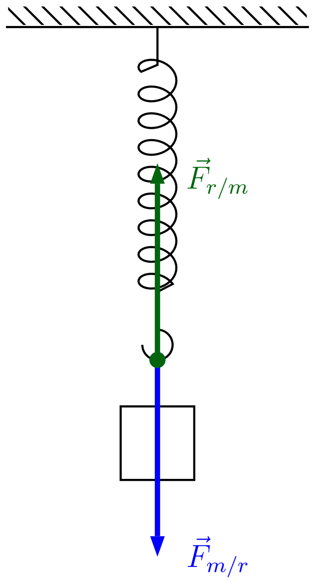


FIGURE I.18 – Action-réaction dans le cas d'une masse accrochée à un ressort

— La masse exerce la force $\vec{F}_{m/r}$ (de norme égale à son poids P) sur le ressort. C'est cette force qui est responsable de l'allongement du ressort. La force $\vec{F}_{m/r}$ a son *point d'application sur le ressort* et elle est *exercée par la masse*.

Le ressort «réagit» et exerce la force $\vec{F}_{r/m}$ sur la masse. C'est cette force qui tient la masse en équilibre (contre son poids $\vec{P}$). La force $\vec{F}_{r/m}$ a son *point d'application sur le fil relié à la masse* et elle est *exercée par le ressort*.

A tout moment, $F_{r/m} = F_{m/r}$.

— La Lune décrit une trajectoire elliptique autour de la Terre. C'est la force gravitationnelle $\vec{F}_{T/L}$ que la Terre exerce sur la Lune qui la tient sur cette orbite. Si cette force n'existait pas, la Lune serait un corps quasiment isolé et elle partirait à vitesse constante sur une trajectoire rectiligne.

  En revanche, la Lune attire la Terre avec la force $\vec{F}_{L/T}$, opposée à $\vec{F}_{T/L}$. Cette force est aussi responsable des marées océaniques.
  Ici encore, les deux forces ont même direction, sont de sens opposés et ont même norme : $\vec{F}_{T/L} = -\vec{F}_{L/T}$ et $F_{L/T} = F_{T/L}$.

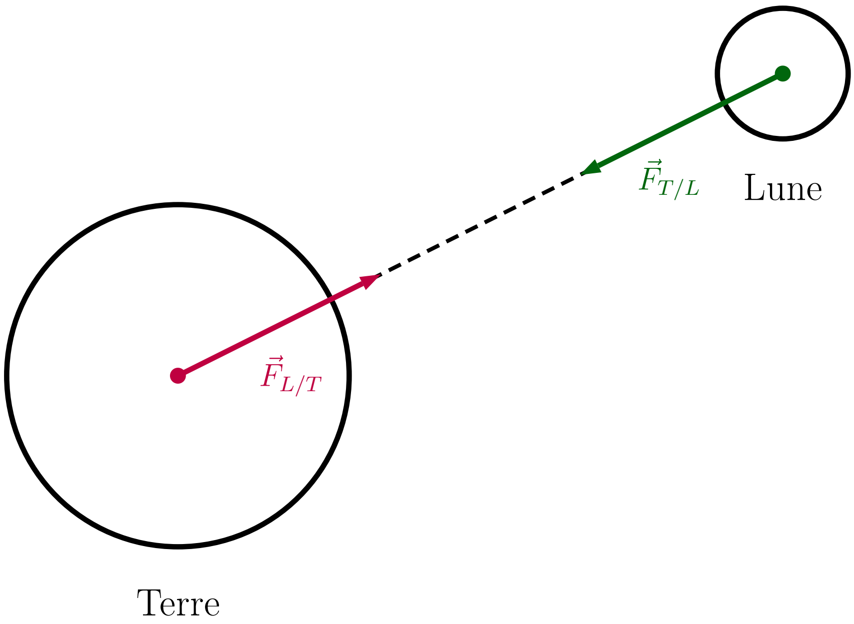


FIGURE I.19 – Action-réaction entre la Terre et la Lune

— Lorsqu'une voiture accélère, chaque roue motrice exerce une force $\vec{F}_{roue/route}$ sur la route. Cette force pousse la route vers l'arrière. Elle est bien visible lorsqu'une voiture démarre trop brusquement sur du gravier (qui est alors projeté à l'arrière).

  La route réagit en exerçant la force $\vec{F}_{route/roue}$ sur la roue. C'est cette force (donc la *réaction*) qui va finalement accélérer la voiture.

  Tout comme dans les exemples précédents, on a :
  $\vec{F}_{roue/route} = -\vec{F}_{route/roue}$ et $F_{roue/route} = F_{route/roue}$.

  Sur sol glissant, les pneus n'arrivent pas à exercer une force contre la route. Par conséquence, la route ne peut pas non plus exercer une force contre la roue. La voiture n'avance pas.

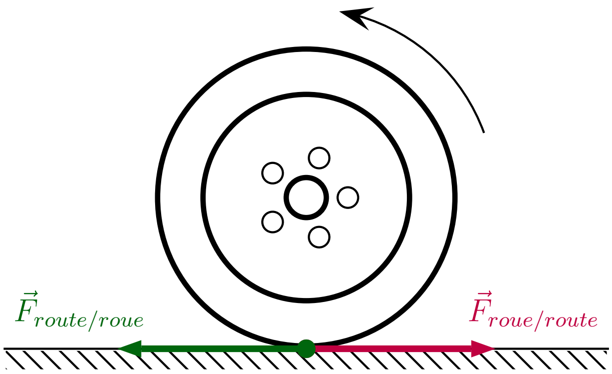


FIGURE I.20 – Action-réaction entre une roue et le sol

  Remarque : En regardant la figure, on pourrait croire que la roue se trouve en équilibre sous l'action des deux forces eprésentées. Dans ce cas, elle ne pourrait pas tourner. Il faut se rendre compte que chacune des 2 forces a son point d'application sur un autre corps : la force $\vec{F}_{roue/route}$ s'exerce sur la route, la force $\vec{F}_{route/roue}$ s'exerce sur la roue. Par conséquent, la roue n'est pas en équilibre.

— Le principe des actions réciproques est aussi à l'origine de la propulsion des fusées. En effet, la fusée éjecte des gaz vers l'arrière et se propulse par la réaction. Au mouvement de la masse de gaz vers l'arrière correspond un mouvement opposé de la fusée vers l'avant. Ainsi, elle peut aussi fonctionner dans le vide.

— Si un objet est posé sur le sol tel qu'il est au repos, il va rester au repos. L'objet exerce sur le sol une force $\vec{F}$ égale à son poids $\vec{P}$. Réciproquement, le sol exerce la force $\vec{R}$, opposée à $\vec{F}$ et appelée *«réaction du sol»*, sur l'objet.
Deux forces s'exercent donc sur l'objet : son poids $\vec{P}$ et la réaction du sol $\vec{R}$: leur résultant vaut nulle. Ainsi, le corps est en équilibre et il va rester au repos.

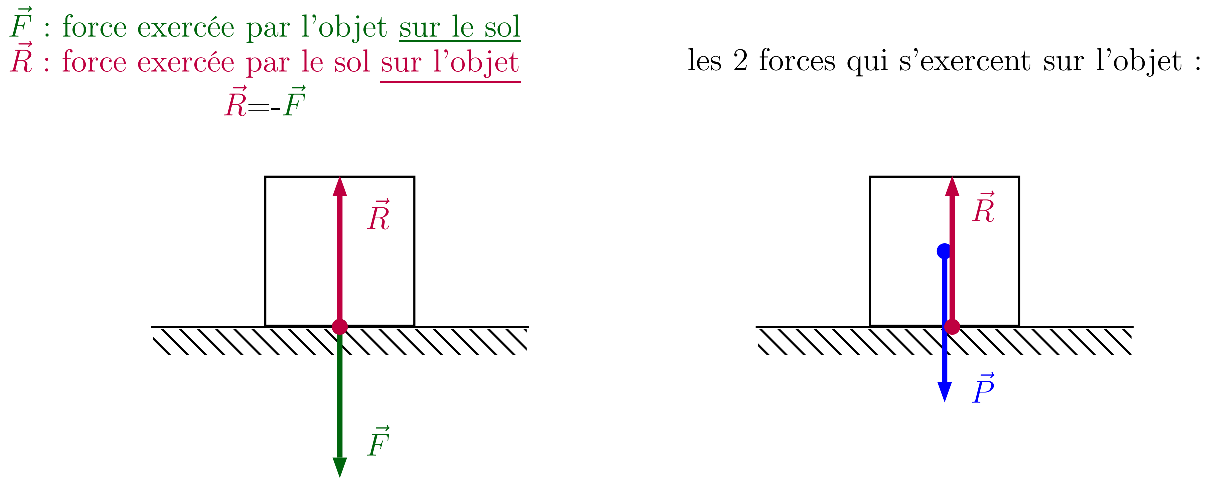


FIGURE I.21 – Action-réaction et équilibre dans le cas d'un objet posé sur le sol

Remarque : La réaction du sol est toujours perpendiculaire au sol, même si le sol n'est pas horizontal !

5.3 Troisième loi de Newton : Principe fondamental de la dynamique

Cette loi exprime la relation qu'il y a entre l'accélération du centre de gravité d'un corps, sa masse et la résultante des forces appliquées :

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

Elle ne sera étudiée qu'en classe de $2^{ème}$.

6 Le moment d'une force

6.1 Sens de rotation

En physique, pour indiquer le sens de rotation d'un corps, on utilise le *sens trigonométrique* (encore appelé *sens géométrique*).

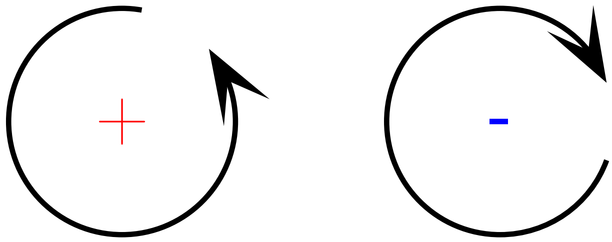


FIGURE I.22 – Sens de rotation trigonométrique

Le sens trigonométrique *positif* correspond au *sens de rotation contraire* à celui des aiguilles d'une montre.
Le sens trigonométrique *négatif* correspond au *sens de rotation identique* à celui des aiguilles d'une montre.

6.2 Expérience d'introduction

Un disque peut tourner librement autour d'un axe horizontal passant par son centre. On peut accrocher des masses à différents points du disque.

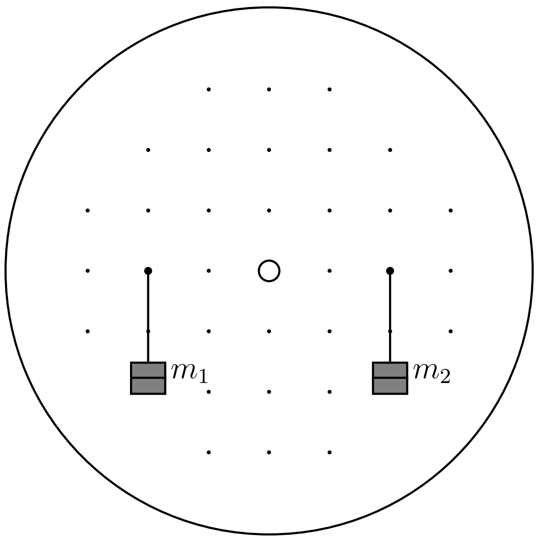


FIGURE I.23 – Disque - Situation 1

Situation 1 :
Accrochons deux masses de 200g, m_1 et m_2, telles que leurs points d'application se trouvent horizontalement alignés avec l'axe de rotation et qu'ils se trouvent à distance égale de cet axe (v. fig. I.23).

On constate : lorsqu'on lâche le disque, il reste au repos. Il est en *équilibre de rotation.*

Situation 2 :
Déplaçons m_2 vers la droite (fig I.24) :

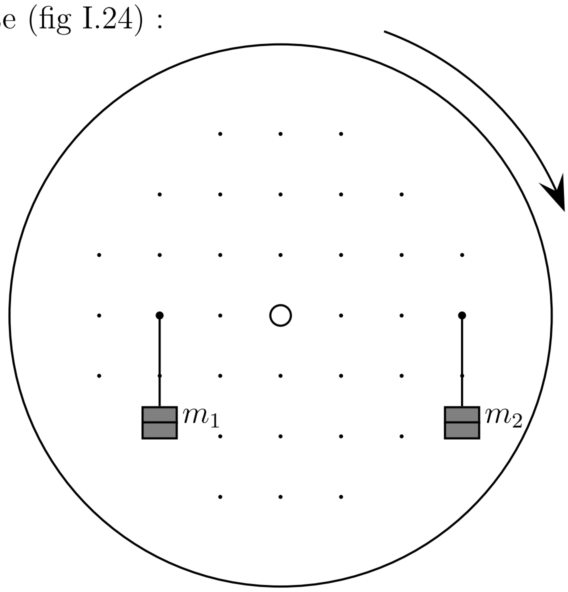


FIGURE I.24 – Disque - Situation 2

On constate : lorsqu'on lâche le disque, il commence à tourner dans le sens négatif (-).

Situation 3 :
Maintenant, déplaçons m_2 vers la gauche (par rapport sa position initiale, v. fig. I.25) :

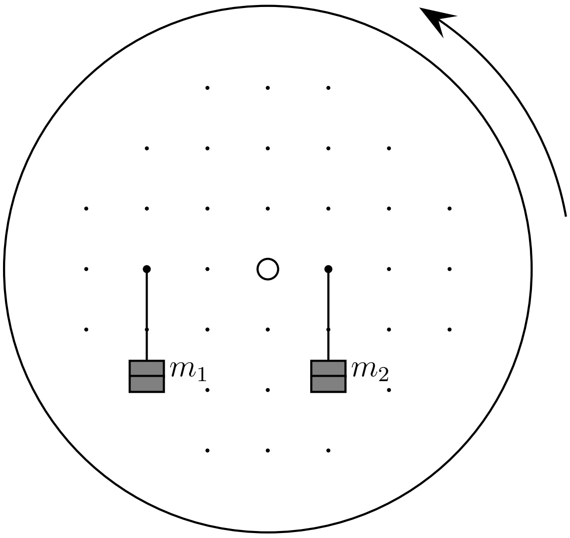


FIGURE I.25 – Disque - Situation 3

On constate : lorsqu'on lâche le disque, il commence à tourner dans le sens positif (+).

Situation 4 :
Maintenant, déplaçons m_2 verticalement vers le bas (par rapport sa position initiale, v. fig. I.26) :

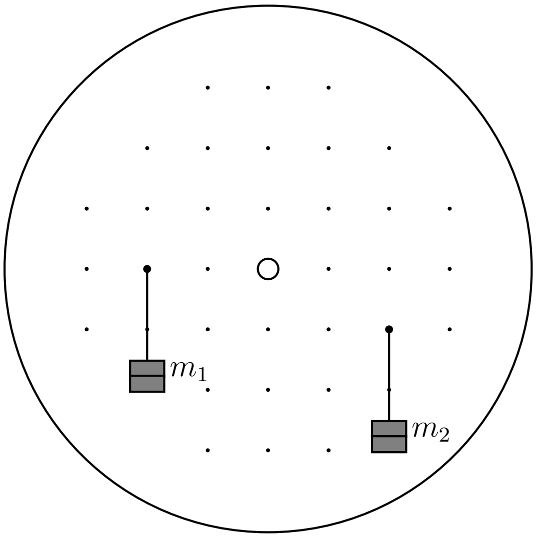


FIGURE I.26 – Disque - Situation 4

On constate : lorsqu'on lâche le disque, il ne tourne pas. Il est en équilibre de rotation.

Situation 5 :
Finalement, plaçons une masse $m_2' = 300$ g à l'endroit initial de m_2 (v. fig. I.27) :

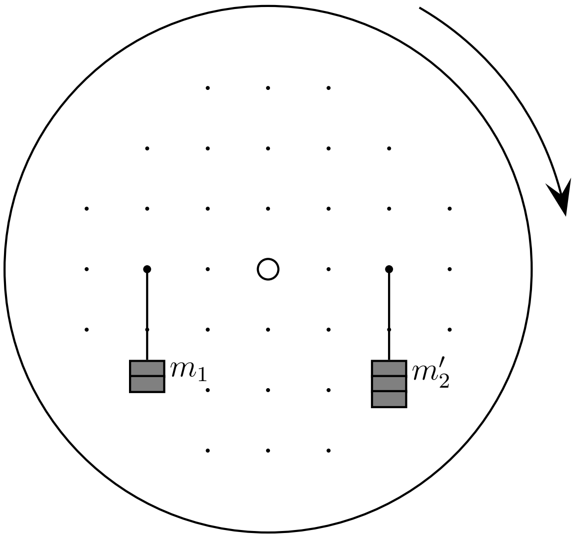


FIGURE I.27 – Disque - Situation 5

On constate : lorsqu'on lâche le disque, il tourne dans le sens négatif (-).

Exploitation :

Ajoutons les vecteurs force des poids sur toutes les figures (échelle 1 cm$\hat{=}$100 N).

Dans la *situation 1*, les masses exercent deux forces égales sur le disque (leurs poids $\vec{P}_1$ et $\vec{P}_2$: ils ont même norme, même sens et même direction). Le disque est en équilibre de rotation.

Dans les *situations 2 et 3*, ce sont les mêmes forces qui s'exercent sur le disque. Mais comme le disque n'est plus en équilibre de rotation (il commence à tourner), c'est la distance des forces à l'axe de rotation qui doit jouer un rôle.

Dans la *situation 4*, la distance de l'origine du poids de m_2 à l'axe de rotation est plus grande que dans la *situation 1*. Pourtant, le solide reste toujours en équilibre. Ce n'est donc pas la distance entre l'origine des forces et l'axe de rotation qu'il faut considérer !
Cependant, la distance entre la *ligne d'action* des deux forces à l'axe de rotation est la même ! Et en effet, c'est cette distance qu'il faut considérer en analysant l'effet de rotation d'une force sur un corps ! Cette distance portera le nom de *«bras de levier»*.

Dans la *situation 5*, la distance des lignes d'action des deux poids à l'axe de rotation est la même. Cependant, la norme des forces n'est pas identique. La norme d'une force appliquée sur un objet a donc une influence sur la rotation de l'objet autour d'un axe.

Résumé :

L'expérience a montré que l'effet de rotation d'une force sur un corps dépend
- de la norme de la force
- de la distance de la ligne d'action de la force à l'axe de rotation

6.3 Le bras de levier

Définition :

On appelle *«bras de levier» a* d'une force $\vec{F}$ par rapport à un axe de rotation Δ la distance entre la ligne d'action de $\vec{F}$ et l'axe de rotation.
C'est la longueur du segment qui lie l'axe Δ à la ligne d'action de la force, le segment étant perpendiculaire à cette ligne d'action.

Unité SI :

Comme le bras de levier est une distance, son unité SI est le mètre (m).

Exemples :

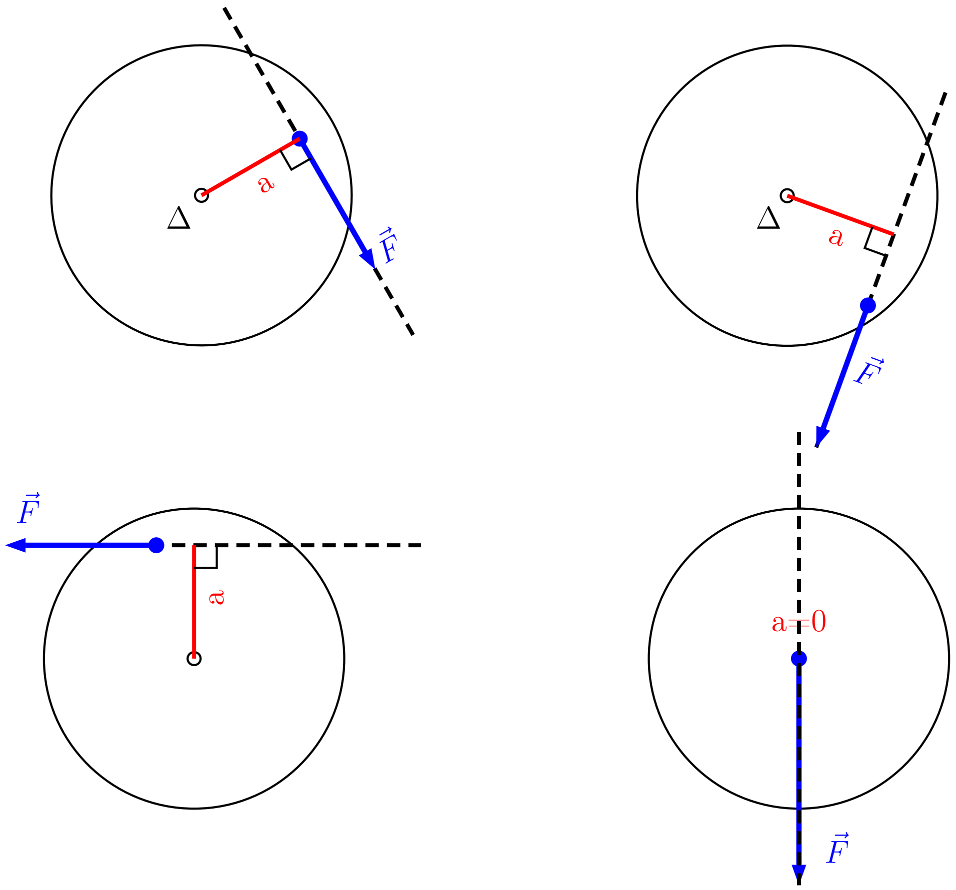


FIGURE I.28 – Exemples de bras de levier

6.4 Le moment d'une force

Définition :

On appelle moment d'une force $\vec{F}$ par rapport à un axe de rotation Δ le produit de la norme F de la force et de son bras de levier a. Symbole : $M_\Delta(\vec{F})$
$M_\Delta(\vec{F}) = \pm F \cdot a$

Unité SI :

Comme l'unité SI de la norme d'une force est le Newton, celle du bras de levier étant le mètre, l'unité SI du moment d'une force est le *«Newton mètre»* ($N \cdot m$ ou Nm).

Une force de norme F=1 N, dont le bras de levier vaut a=1 m exerce donc sur un corps un moment égal à : $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = 1\ \mathrm{N} \cdot 1\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{Nm}$

Signe d'un moment de rotation :

Si une force fait tourner un objet dans le *sens* trigonométrique *positif*, son moment est un *moment positif* : $M_\Delta(\vec{F}) = F \cdot a$
Si une force fait tourner un objet dans le *sens* trigonométrique *négatif*, son moment est un *moment négatif* : $M_\Delta(\vec{F}) = -F \cdot a$

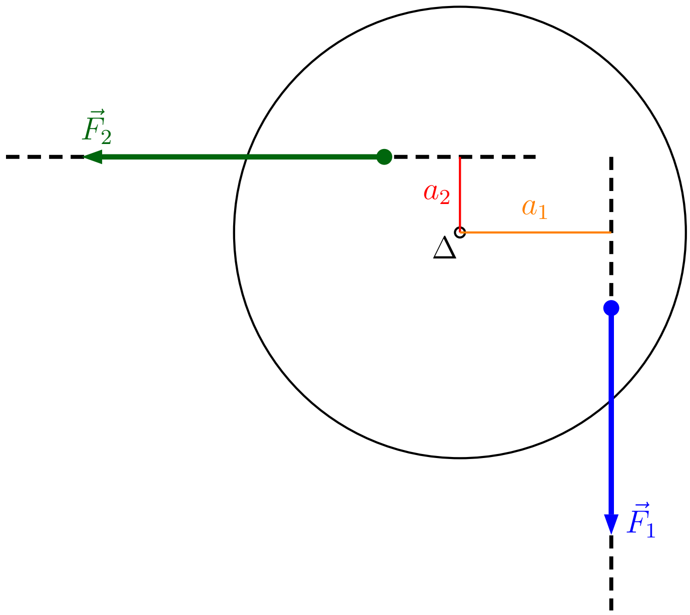


FIGURE I.29 – Moment positif, moment négatif

Dans l'exemple de la figure :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) = -F_1 \cdot a_1 \quad \text{(moment négatif)}$$
$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) = F_2 \cdot a_2 \quad \text{(moment positif)}$$

Remarque : Toute force dont la ligne d'action passe par l'axe de rotation a un moment zéro (cf. fig I.28). Ces forces ne peuvent donc pas entraîner une rotation !

6.5 Equilibre d'un solide en rotation

Si la somme des moments de toutes les forces qui s'appliquent à un solide au repos est positive, le solide va commencer à tourner dans le sens positif.

$$\sum_{i=1}^{N} \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) > 0 \Leftrightarrow \text{rotation dans le sens positif}$$

Si la somme des moments de toutes les forces qui s'appliquent à un solide au repos est négative, le solide va commener à tourner dans le sens négatif.

$$\sum_{i=1}^{N} \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) < 0 \Leftrightarrow \text{rotation dans le sens négatif}$$

Il s'en suit la «loi d'équilibre pour un corps en rotation» :

Un solide qui peut tourner autour d'un axe est en équilibre de rotation si et seulement si la somme des moments de toutes les forces qui s'appliquent au solide vaut nulle.

$$\text{équilibre de rotation} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{N} \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = 0$$

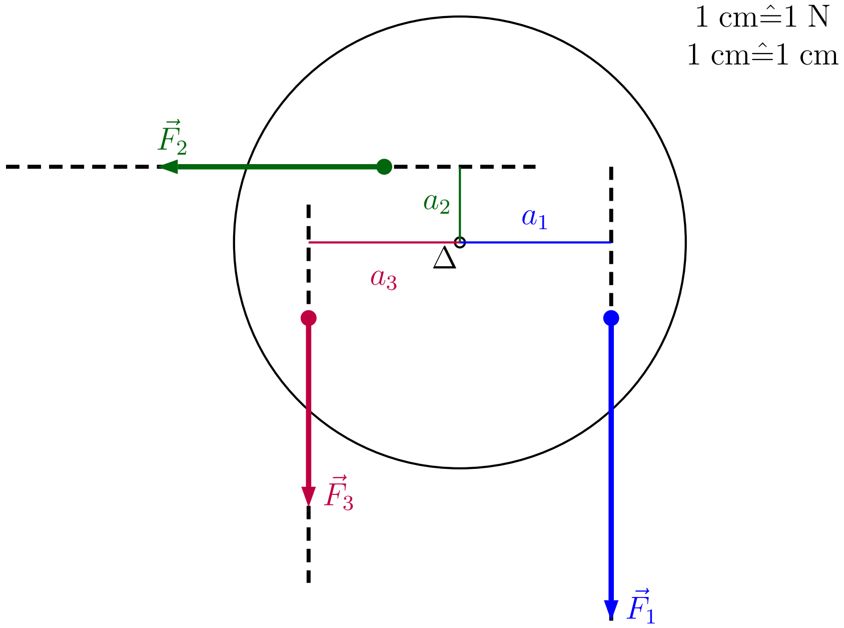


FIGURE I.30 – Equilibre de rotation

Dans l'exemple de la figure I.30 :

$$\begin{aligned}
\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) &= -F_1 \cdot a_1 = -4\ \mathrm{N} \cdot 2\ \mathrm{cm} = -8\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{cm} = -0,08\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m} \\
\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) &= +F_2 \cdot a_2 = 3\ \mathrm{N} \cdot 1\ \mathrm{cm} = 3\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{cm} = 0,03\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m} \\
\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_3) &= +F_3 \cdot a_3 = 2,5\ \mathrm{N} \cdot 2\ \mathrm{cm} = 5\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{cm} = 0,05\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}
\end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{3} \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = -0,08\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m} + 0,03\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m} + 0,05\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m} = 0$$

Le solide est en équilibre de rotation !

6.6 Les leviers

6.6.1 La loi du levier

Un levier est une barre rigide qui peut tourner autour d'un axe.

Accrochons un corps de masse m=200g à un dynamomètre :

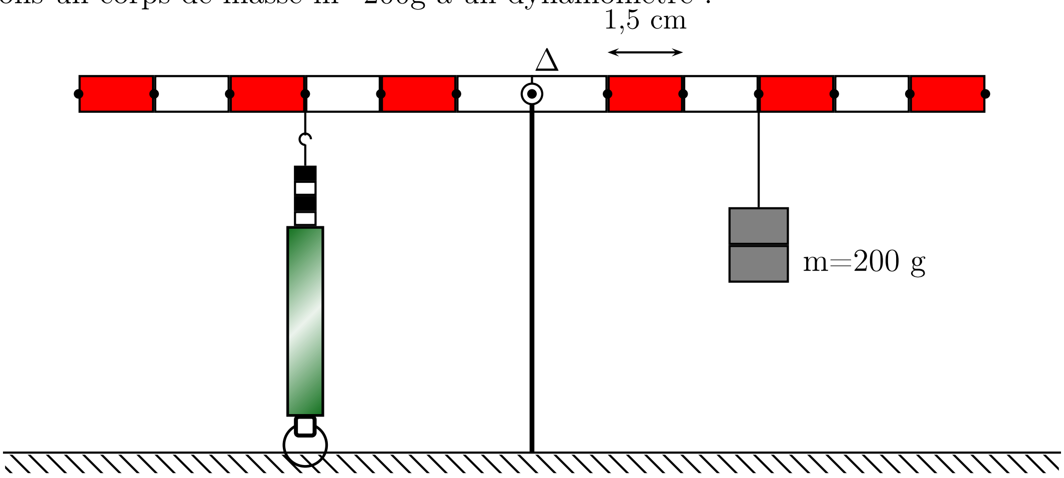


FIGURE I.31 – Masse accrochée à un levier en équilibre

A l'aide du dynamomètre, on mesure la force nécessaire à appliquer au levier pour maintenir l'équilibre.

Le corps exerce la force $\vec{F_1}$ (égale à son poids : $\vec{F_1} = \vec{P}$ et $F_1 = P$) sur le levier. Son bras de levier est la distance a_1. Le dynamomètre exerce la force $\vec{F_0}$ sur le levier. Son bras de levier est la distance a_0.

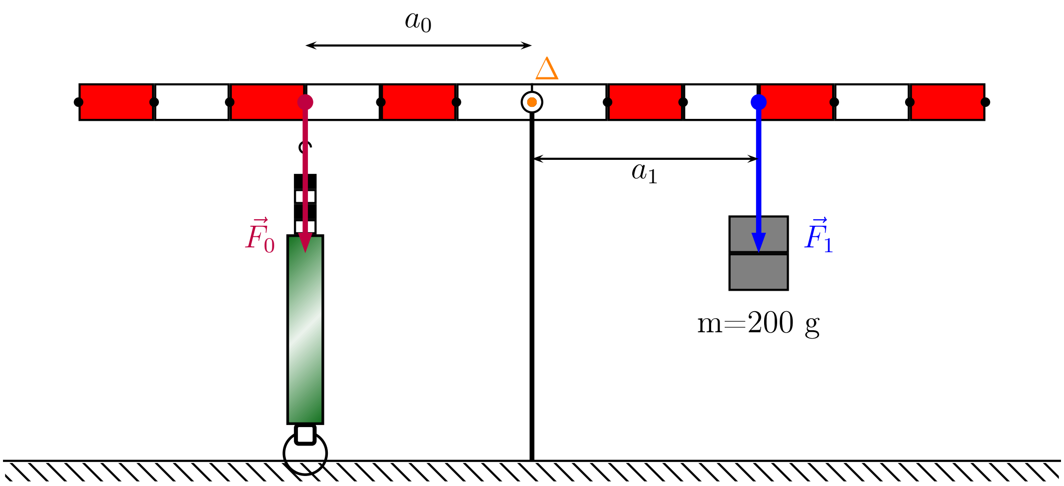


FIGURE I.32 – Levier en équilibre sous l'action de 2 forces

Mesurons la norme de la force $\vec{F_0}$ nécessaire à l'équilibre pour différents points d'accrochage du corps et du dynamomètre, c'est-à-dire pour différents bras de levier a_0 et a_1 :

$F_0(N)$	$a_0(m)$	$F_1(N)$	$a_1(m)$	$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F_0})(Nm)$	$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F_1})(Nm)$	$\sum \mathcal{M}_\Delta(Nm)$

On constate :

Un levier (tout comme n'importe quel autre corps en rotation) est en équilibre sous l'action de deux forces si et seulement si la somme des moments des deux forces vaut nulle.

Pour un levier en équilibre sous l'action de deux forces $\vec{F_0}$ et $\vec{F_1}$, on a donc :

$$
\begin{array}{rc}
 & \mathcal{M}_\Delta(\vec{F_0}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F_1}) = 0 \\
\Leftrightarrow & F_0 \cdot a_0 - F_1 \cdot a_1 = 0 \\
\Leftrightarrow & F_0 \cdot a_0 = F_1 \cdot a_1 \\
\Leftrightarrow & F_0 = F_1 \cdot \frac{a_1}{a_0} \\
\textit{ou encore :} & \frac{F_0}{F_1} = \frac{a_1}{a_0}
\end{array}
$$

C'est la *loi du levier* !

— si $a_0 > a_1$, alors $F_0 < F_1$: pour équilibrer le levier, F_0 doit être *moins grande* que F_1
— si $a_0 = a_1$, alors $F_0 = F_1$: pour équilibrer le levier, F_0 doit être *égale* à F_1
— si $a_0 < a_1$, alors $F_0 > F_1$: pour équilibrer le levier, F_0 doit être *plus grande* que F_1

Exemples :

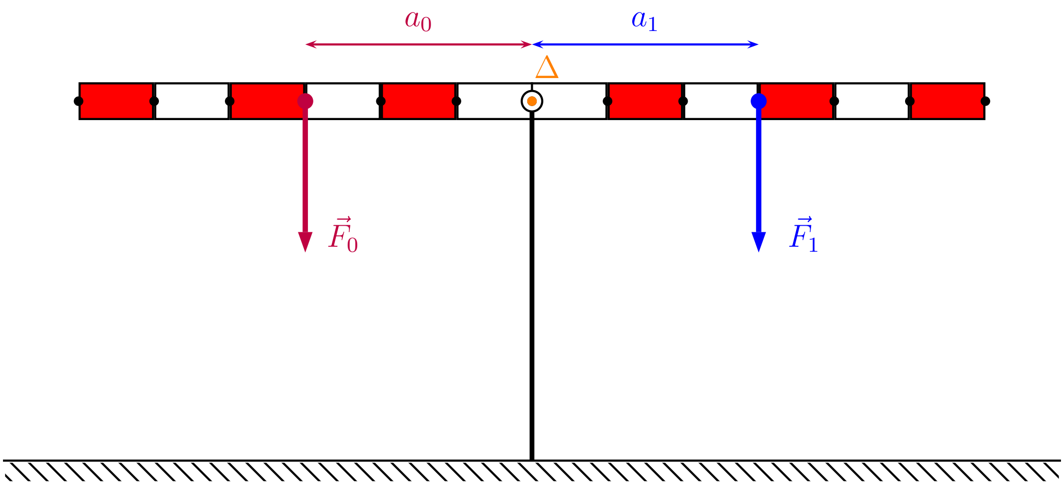


FIGURE I.33 – Levier en équilibre / $a_0 = a_1 \; : \; F_0 = F_1$

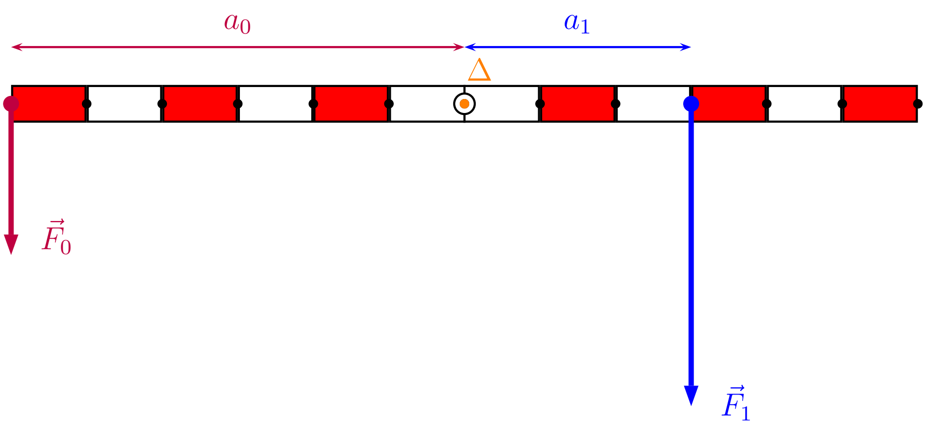


FIGURE I.34 – Levier en équilibre / $a_0 = 2 \cdot a_1 \; : \; F_0 = \frac{1}{2} \cdot F_1$

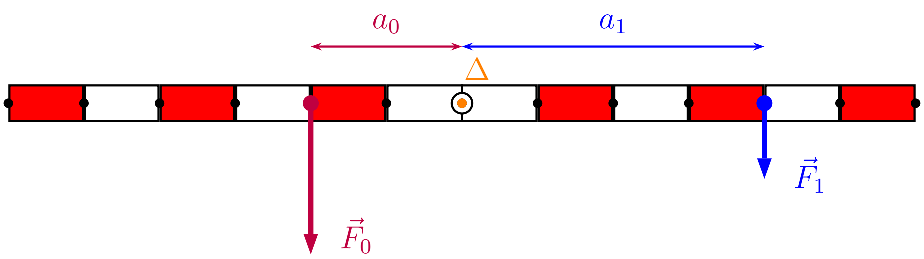


FIGURE I.35 – Levier en équilibre / $a_0 = \frac{1}{2} \cdot a_1$: $F_0 = 2 \cdot F_1$

6.6.2 Applications pratiques des leviers

Dans l'expérience précédente, le levier a été en équilibre sous l'action des deux forces $\vec{F}_0$ et $\vec{F}_1$.

$\vec{F}_1$ est la force appliquée *par le corps* et *sur le levier*. Mais, d'après le principe des actions réciproques, le levier réagit et exerce la force $\vec{F}_2$ *sur le corps* tel que $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$ et $F_2 = F_1$.

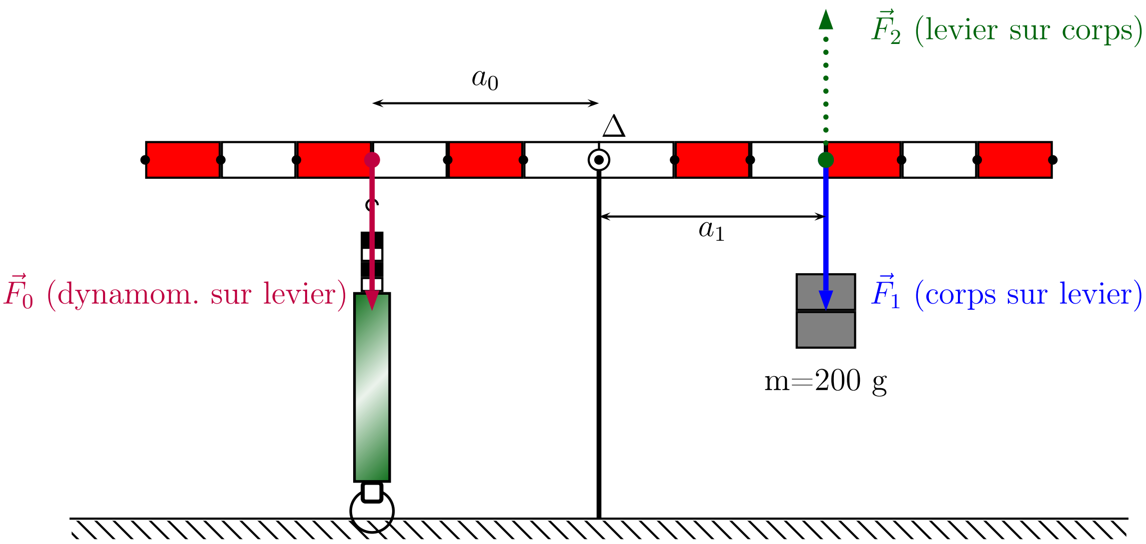


FIGURE I.36 – Forces entre objet et levier

D'après la loi des leviers :

$$F_1 = F_0 \cdot \frac{a_0}{a_1}$$
$$\textit{donc :} \quad F_2 = F_0 \cdot \frac{a_0}{a_1}$$

Si $a_0 > a_1$, alors $F_2 > F_0$: le levier est devenu un amplificateur de forces.

Exemples :

1. Les tenailles :

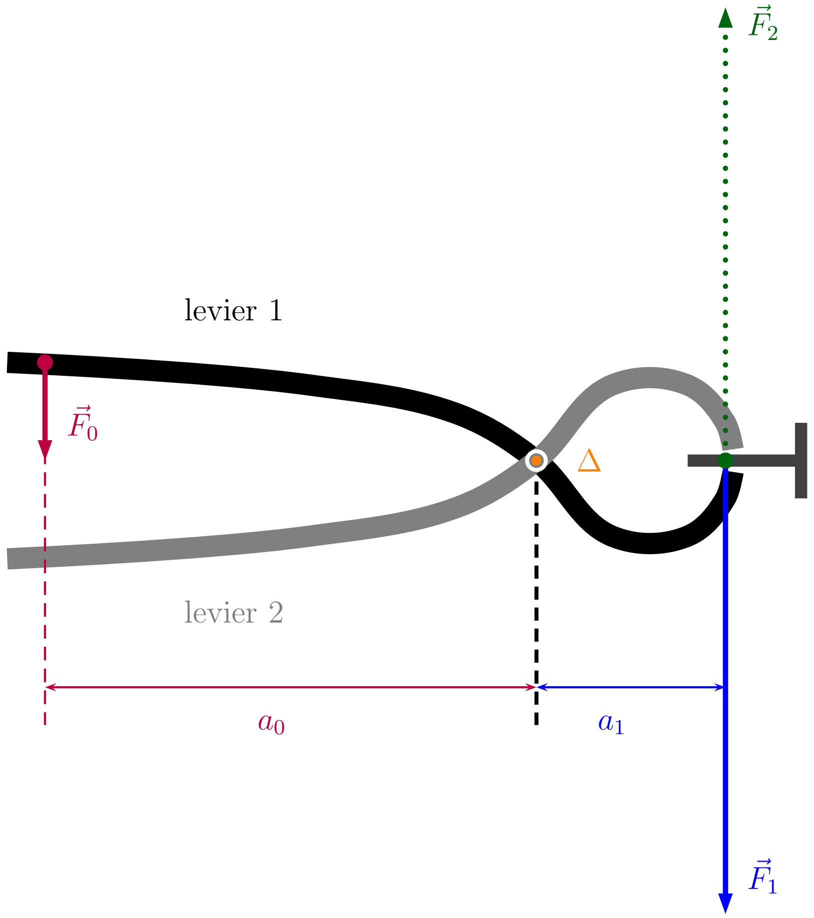


FIGURE I.37 – Les tenailles

Le levier 1 est en équilibre sous l'action de deux forces :

— la force $\vec{F_0}$, exercée par l'opérateur sur la manche
— la force $\vec{F_1}$ exercée par le clou sur le bec

La force $\vec{F_1}$ étant exercée par le clou sur le levier, le levier *réagit* et exerce la force $\vec{F_2} = -\vec{F_1}$ sur le clou. C'est finalement cette force $\vec{F_2}$ qui fait percer le clou.
Et comme $a_0 > a_1$, $F_2 > F_0$.

2. Ouvrir le couvercle coincé d'une boîte de peinture par un tourne-vis :

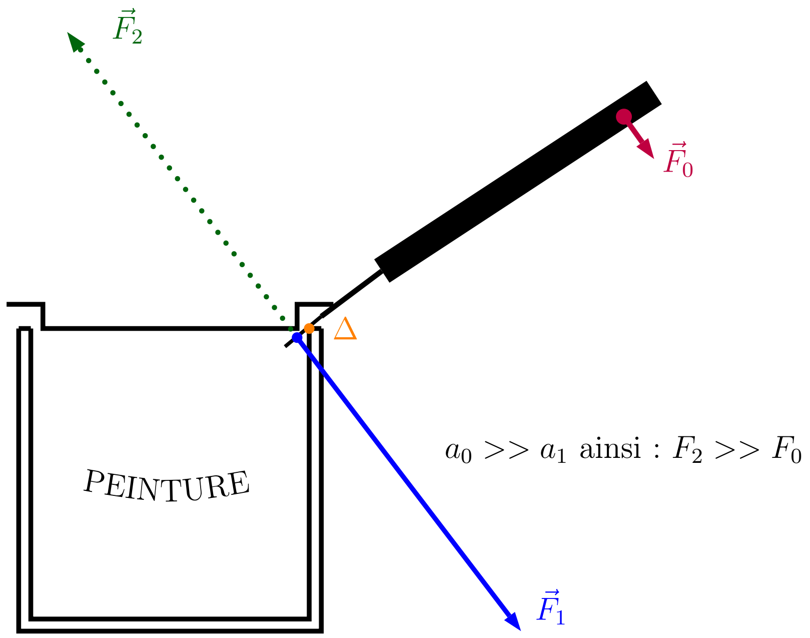


FIGURE I.38 – Ouverture d'une boîte de peinture par un tourne-vis

Le tourne-vis est en équilibre sous l'action de deux forces :

— la force $\vec{F}_0$, exercée par l'opérateur sur la poignée
— la force $\vec{F}_1$ exercée par le couvercle sur la pointe

La force $\vec{F}_1$ étant exercée par le couvercle sur la pointe, la pointe *réagit* et exerce la force $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$ sur le couvercle. C'est finalement cette force $\vec{F}_2$ qui fait bouger le couvercle.

3. Soulever une charge par une brouette :

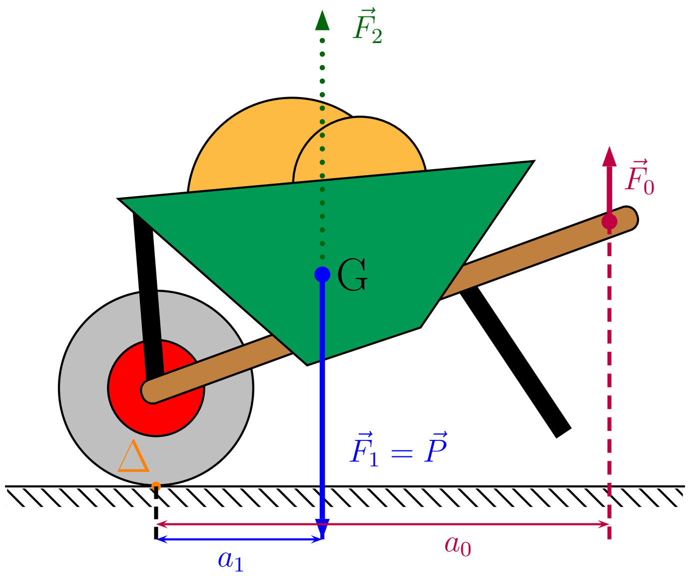


FIGURE I.39 – La brouette

La brouette soulevée est en équilibre sous l'action de deux forces :

— la force $\vec{F}_0$, exercée par l'opérateur sur la manche
— la force $\vec{F}_1$, égale au poids de la charge exercé sur la brouette

La force $\vec{F}_1$ étant exercée par la charge sur la brouette, la brouette *réagit* et exerce la force $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$ sur la charge. C'est finalement cette force $\vec{F}_2$ qui soulève la charge.

4. Le casse-noisettes :

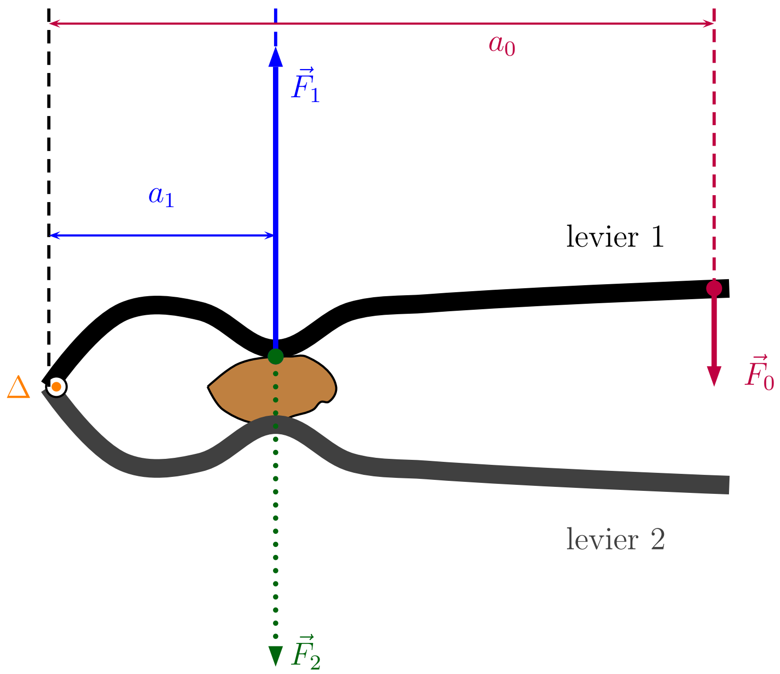


FIGURE I.40 – Le casse-noisettes

La levier 1 du casse-noisettes est en équilibre sous l'action de deux forces :

—
—

La force $\vec{F}_1$ étant exercée par _______________ sur _____________, ____________ *réagit* et exerce la force $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$ sur _____________. C'est finalement cette force $\vec{F}_2$ qui ________________.

Et comme $a_0 > a_1$, ____________.

7 Machines simples

Dans la section 5.1, on a vu que d'après le principe d'inertie, pour soulever une charge à vitesse constante (la charge étant donc en équilibre), il faut appliquer une force $\vec{F_0}$ opposée au poids : $\vec{F_0} = -\vec{P}$ et $F_0 = P$.

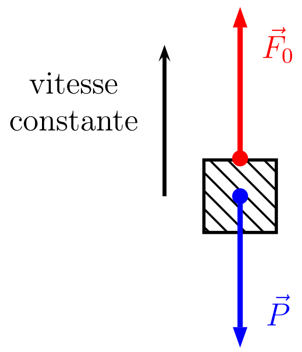


FIGURE I.41 – Charge soulevée à vitesse constante

Si on veut réduire la force nécessaire pour soulever une charge, on peut recourir aux machines simples :

> Une machine simple est un dispositif mécanique élémentaire qui permet de soulever une charge en appliquant une force réduite.

7.1 Poulies

Définition :

> Une poulie est une roue tournant autour d'un axe dont la jante porte une corde, un câble, une courroie et servant à soulever des charges.

7.1.1 Poulie fixe

> Une poulie fixe est une poulie *qui ne se déplace pas* avec la charge à soulever.

Soulevons la charge à l'aide de la poulie fixe :

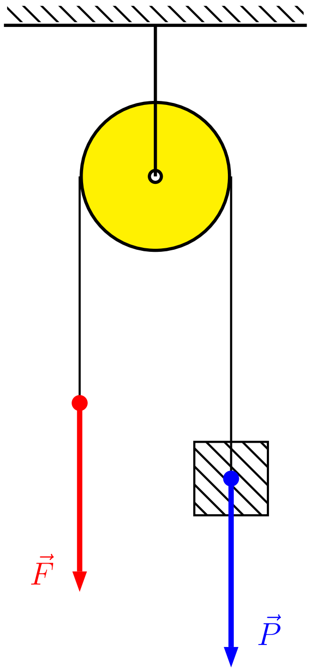


FIGURE I.42 – Une poulie fixe

En soulevant la charge, la corde se déplace à vitesse constante. Elle est en équilibre sous l'action de deux forces :

— $\vec{P}$, le poids de la charge
— $\vec{F}$, la force exercée par l'opérateur

Ainsi :

$$\vec{F} + \vec{P} = \vec{0}$$
$$\Leftrightarrow \quad \vec{F} = -\vec{P} \text{ et } F = P$$

Si on compare la force $\vec{F}$ qu'il faut appliquer au bout de la corde à la force $\vec{F_0}$ qu'il faut appliquer pour soulever la charge sans machine simple, on constate :

— $\vec{F}$ est de sens opposé à $\vec{F_0}$
— les 2 forces ont même norme : $F = F_0 = P$

En plus, on peut vérifier que pour soulever la charge d'une hauteur h, il faut tirer le bout de la corde d'une distance

$$x = h$$

Ainsi :

Une poulie fixe change le sens de la force nécessaire à soulever une charge, mais la norme de la force reste inchangée. La distance dont il faut déplacer le bout de la corde reste inchangé

7.1.2 Poulie mobile

Une poulie mobile est une poulie *qui se déplace* ensemble avec la charge à soulever.

Suspendons notre charge à une poulie mobile :

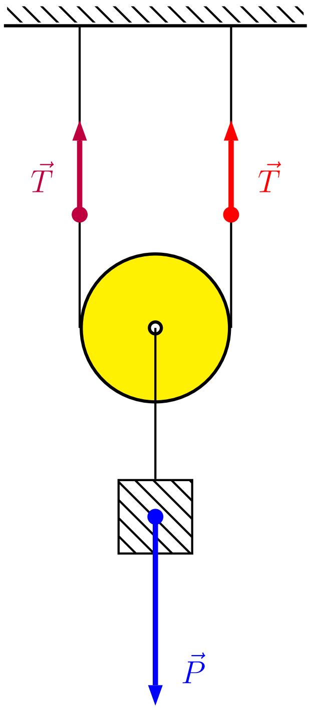


Figure I.43 – Charge suspendue à une poulie mobile

A l'équilibre, on a que $\vec{T} + \vec{T} + \vec{P} = \vec{0}$.
La tension dans chaque brin de corde vaut donc : $\vec{T} = -\frac{\vec{P}}{2}$.
Pour soulever la charge à vitesse constante, il faut donc appliquer la force $\vec{F} = -\frac{\vec{P}}{2}$.

Si on compare la force $\vec{F}$ qu'il faut appliquer au bout de la corde à la force $\vec{F_0}$ qu'il faut appliquer pour soulever la charge sans machine simple, on constate :

- $\vec{F}$ est de même sens que $\vec{F_0}$
- la norme de $\vec{F}$ est la moitié de la norme de $\vec{F_0}$: $F = \frac{F_0}{2} = \frac{P}{2}$.

On remarque également que, pour soulever la charge d'une hauteur h, il faut tirer le bout de corde d'une distance

$$x = 2 \cdot h$$

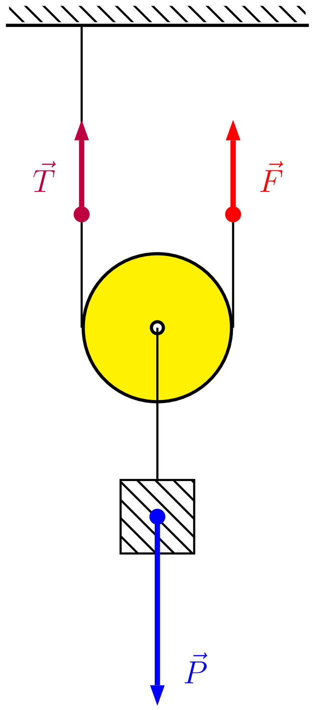


FIGURE I.44 – Soulever une charge par une poulie mobile

Une poulie mobile garde inchangé le sens de la force nécessaire à soulever une charge, mais la norme de la force est *divisée* par deux. La distance dont il faut déplacer le bout de la corde est *multipliée* par deux.

7.1.3 Combinaison d'une poulie fixe et d'une poulie mobile

La poulie mobile divise la norme de la force à appliquer par deux (le poids est réparti sur deux brins de corde) et la poulie fixe change le sens de la force :

$$F = \frac{F_0}{2} = \frac{P}{2}$$

et pour soulever la charge d'une hauteur h, il faut déplacer le bout de la corde de :

$$x = 2 \cdot h$$

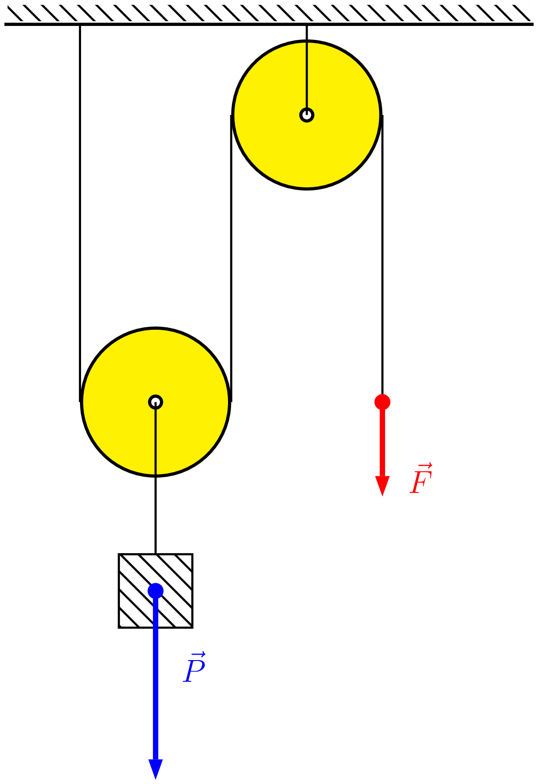


FIGURE I.45 – Palan formé par une poulie fixe et une poulie mobile

7.1.4 Palans

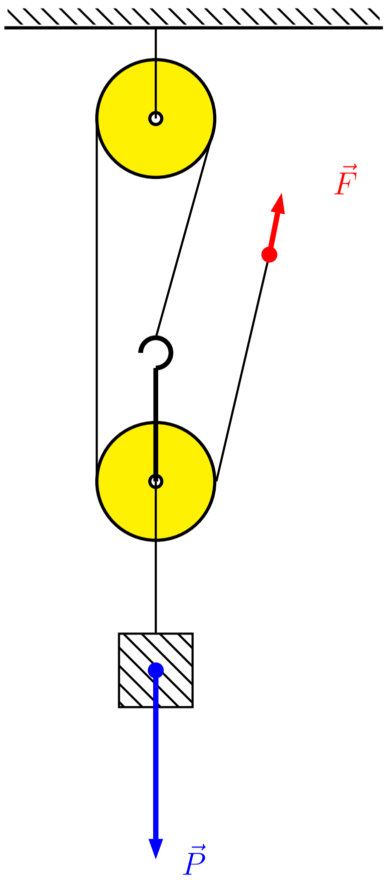
Un palan est un assemblage de plusieurs poulies.

Si n est le nombre de brins de corde qui supportent la charge, alors :

$$F = \frac{F_0}{n} = \frac{P}{n} \text{ et } x = n \cdot h$$

Si on soulève une charge par un palan, la norme de la force à appliquer au bout de la corde est égale à la norme du poids *divisé* par le nombre de brins de corde. La distance dont il faut déplacer le bout de la corde sera la hauteur *multipliée* par le nombre de brins de corde.

Avec un palan, on peut donc réduire la force à appliquer pour soulever une charge. Par contre, le chemin duquel il faut déplacer cette force devient plus long.

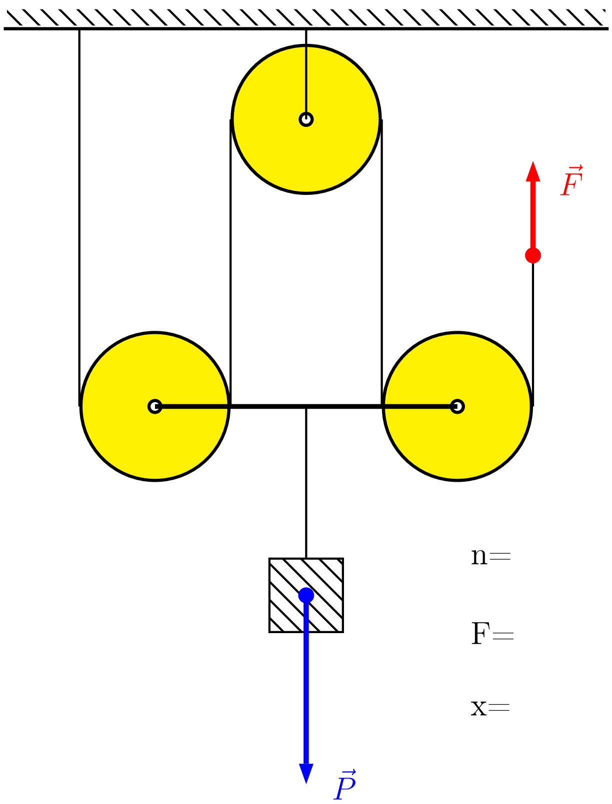


n=

F=

x=

FIGURE I.46 – Palan : Exemple 2

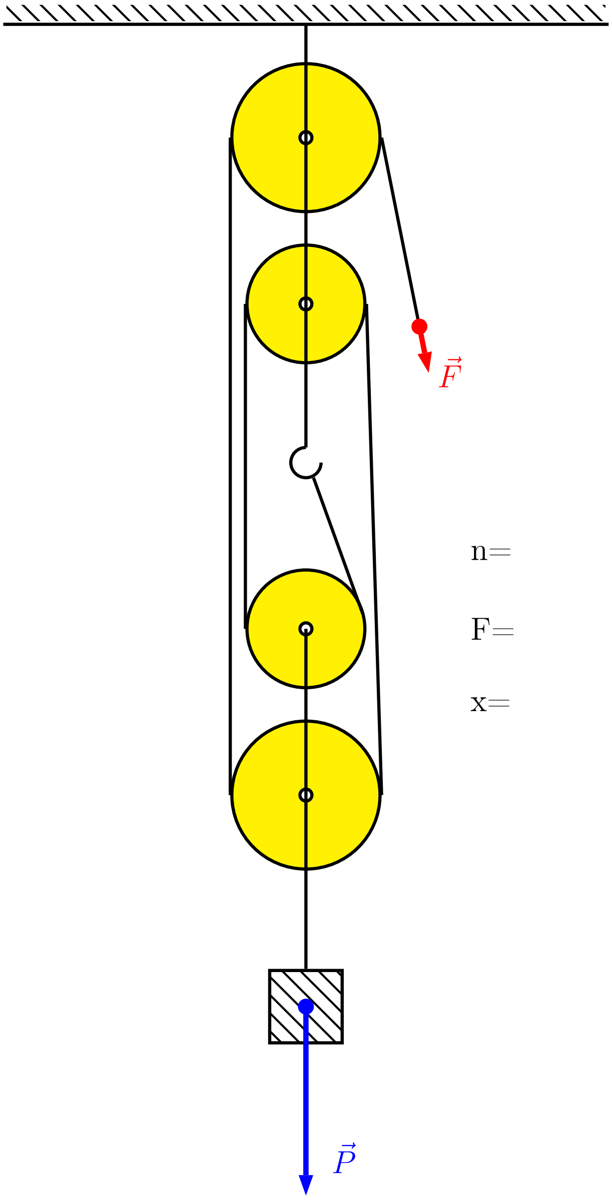


n=

F=

x=

FIGURE I.47 – Palan : Exemple 3



n=

F=

x=

Figure I.48 – Palan : Exemple 4

7.2 Plan incliné

Un plan incliné est une surface plane qui est inclinée par rapport à l'horizontale.

Soulevons une charge à une hauteur h en utilisant un plan incliné :

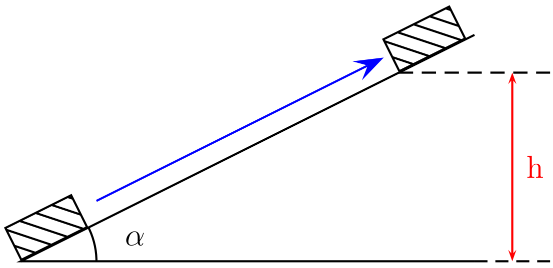


FIGURE I.49 – Soulever une charge à l'aide d'un plan incliné

Si on déplace la charge (désormais représentée par un point) *à vitesse constante*, elle est en équilibre sous l'action de 3 forces :

- le poids $\vec{P}$, vertical vers le bas
- la force $\vec{F}$, exercée par l'opérateur, parallèle au plan incliné et dirigée vers le haut
- la réaction du plan incliné $\vec{R}$, perpendiculaire au plan incliné

$$\text{équilibre} \Leftrightarrow \vec{F} + \vec{P} + \vec{R} = \vec{0} \quad (*)$$

Décomposons le poids $\vec{P}$ en deux compostantes ($\vec{P} = \vec{P}_T + \vec{P}_N$) :

- une composante $\vec{P}_T$, tangentielle au plan
- une composante $\vec{P}_N$, normale au plan

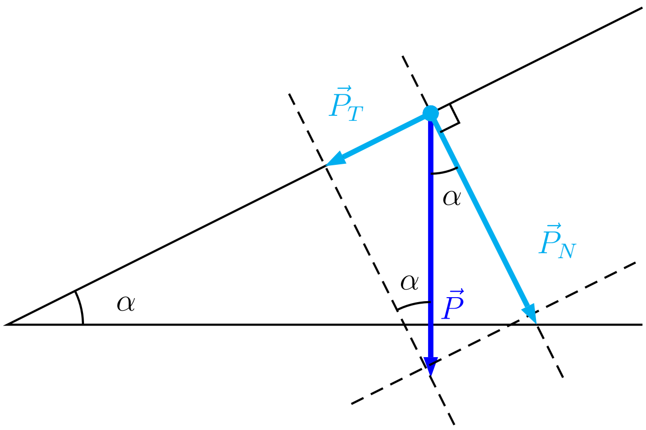


FIGURE I.50 – Composantes tangentielle et normale du poids

Dans les triangles rectangles, on a :

$$\sin\alpha = \frac{P_T}{P} \Leftrightarrow P_T = P \cdot \sin\alpha$$

et

$$\cos\alpha = \frac{P_N}{P} \Leftrightarrow P_N = P \cdot \cos\alpha$$

En remplaçant $\vec{P}$ par $\vec{P}_N + \vec{P}_T$, l'équation (*) devient :

$$\vec{F} + \vec{P}_T + \vec{P}_N + \vec{R} = \vec{0}$$

La composante normale du poids, $\vec{P}_N$, est la force que la charge applique sur le plan incliné. La réaction du plan incliné, $\vec{R}$, est opposée à $\vec{P}_N$ (d'après le principe des actions réciproques) :

$$\vec{R} = -\vec{P}_N$$

La norme de $\vec{R}$ vaut donc :

$$\boxed{R = P_N = P \cdot \cos\alpha}$$

Avec $\vec{R} = -\vec{P}_N$, l'équation (*) est réduite à :

$$\vec{F} + \vec{P}_T = \vec{0}$$

Pour déplacer la charge le long du plan incliné à vitesse constante, l'opérateur doit donc exercer la force $\vec{F}$, opposée à $\vec{P}_T$:

$$\vec{F} = -\vec{P}_T$$

La norme de cette force vaut

$$\boxed{F = P_T = P \cdot \sin\alpha}$$

Comme $0 < \sin\alpha \leq 1$, on a : $F \leq P$: la force nécessaire pour soulever la charge à l'aide du plan inclinée est donc moins grande que le poids.

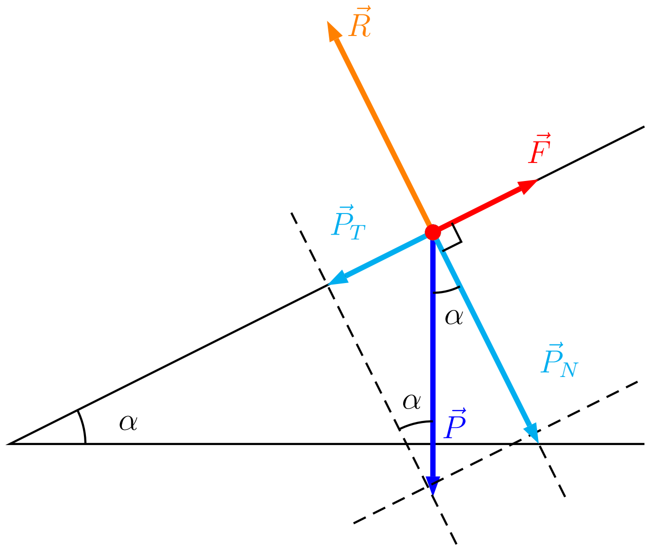


FIGURE I.51 – Charge en équilibre sur un plan incliné

Déterminons la distance x de laquelle il faut déplacer la charge pour atteindre la hauteur h :

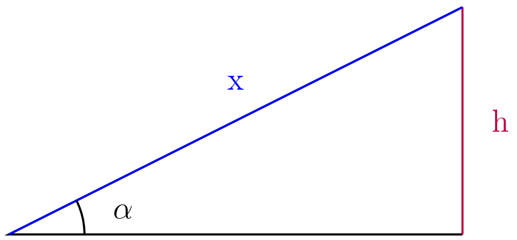


FIGURE I.52 – Plan incliné : Relation entre distance et hauteur

Comme $\sin\alpha = \frac{h}{x}$, on a :

$$\boxed{x = \frac{h}{\sin\alpha}}$$

Comme $0 < \sin\alpha \leq 1$, on a : $x \geq h$: la distance x est plus grande que la hauteur h.

> Pour soulever une charge à l'aide d'un plan incliné d'un angle α , la norme de la force à appliquer au corps est égale à la norme du poids, *multiplié* par $\sin\alpha$. La distance dont il faut déplacer cette force sera égale à la hauteur *divisée* par $\sin\alpha$.

Avec un plan incliné, on peut donc réduire la force à appliquer pour soulever une charge. Par contre, le chemin duquel il faut déplacer cette force devient plus long.

8 Travail

8.1 Forces parallèles ou perpendiculaires au déplacement

8.1.1 Travail d'une force de sens identique au déplacement

Considérons un corps en mouvement sur lequel on applique une force $\vec{F}$ (constante en direction, sens et norme), parallèle au déplacement et dirigée dans le sens du mouvement. Le point d'application de $\vec{F}$ se déplace du point A vers le point B.

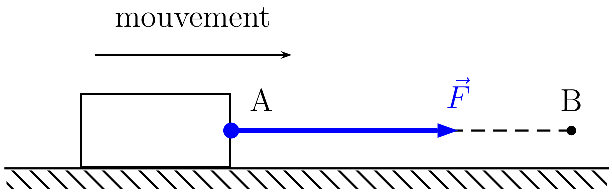


FIGURE I.53 – Travail moteur

La force $\vec{F}$ *contribue au mouvement*. On dit que $\vec{F}$ effectue un *travail moteur*, noté W. Ce travail est d'autant plus grand que la norme F est grande et que le déplacement s=AB est grand :

$$\begin{array}{rrcl} & W & \sim & F \\ & W & \sim & AB \\ \textit{donc} & W & \sim & F \cdot AB \\ \textit{ou bien} & W & = & k \cdot F \cdot AB \end{array}$$

k est une constante de proportionnalité. Dans le système SI, cette constante a été fixée à la valeur $k = 1$.

Ainsi, le travail moteur de la force $\vec{F}$ s'écrit :

$$\boxed{W(\vec{F}) = F \cdot AB}$$

8.1.2 Travail d'une force de sens opposé au déplacement

Reprenons l'exemple précédent, mais cette fois-ci, la force $\vec{F}$ a un sens opposé au sens du mouvement :

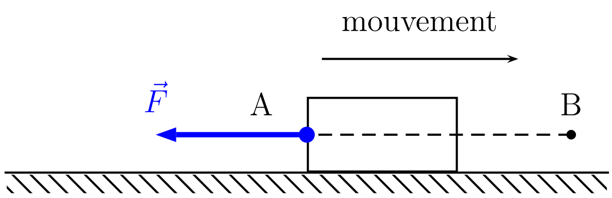


FIGURE I.54 – Travail résistant

La force $\vec{F}$ *s'oppose au mouvement*. On dit que $\vec{F}$ effectue un *travail résistant*, encore appelé *travail négatif*, mais toujours noté W.
Ainsi, le travail résistant de la force $\vec{F}$ est donné par :

$$W(\vec{F}) = -F \cdot AB$$

8.1.3 Travail d'une force perpendiculaire au déplacement

Maintenant, appliquons une force $\vec{F}$, perpendiculaire à la direction du mouvement :

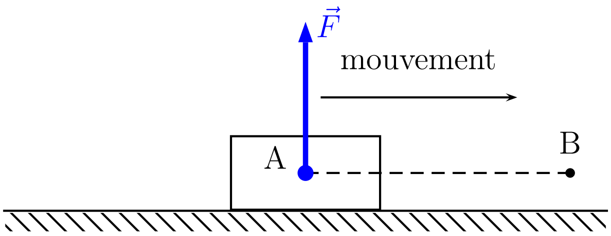


FIGURE I.55 – Travail nul

La force $\vec{F}$ ne contribue pas au mouvement, mais non plus elle s'oppose au mouvement. On dit que la force ne travaille pas resp. que son travail vaut nul :

$$W(\vec{F}) = 0$$

8.1.4 Cas général

Dans le cas général, la force $\vec{F}$ fait un angle α quelconque avec la direction de déplacement :

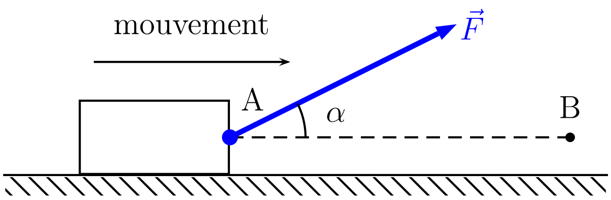


FIGURE I.56 – Travail d'une force quelconque

Nous pouvons décomposer $\vec{F}$ en une composante tangentielle au mouvement $\vec{F}_T$ et une composante normale au mouvement $\vec{F}_N$: $\vec{F} = \vec{F}_T + \vec{F}_N$

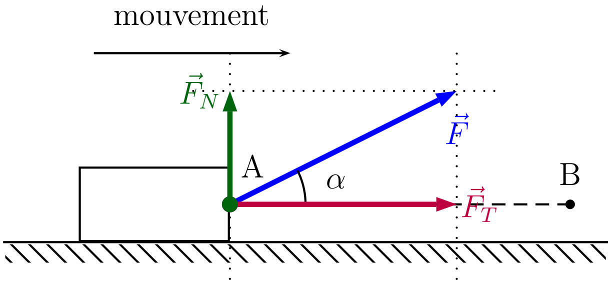


FIGURE I.57 – Travail : décomposition d'une force quelconque

On sait que le travail de $\vec{F}_N$ vaut nul, comme $\vec{F}_N$ est perpendiculaire au déplacement.

$\vec{F}_T$ est donc la seule composante de $\vec{F}$ qui effectue un travail :

$$W(\vec{F}) = W(\vec{F}_T) + W(\vec{F}_N) = F_T \cdot AB + 0 = F_T \cdot AB$$

Or : $\cos\alpha = \frac{F_T}{F} \Leftrightarrow F_T = F \cdot \cos\alpha$.

Ainsi :

$$W(\vec{F}) = F \cdot \cos\alpha \cdot AB = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$$

Si on représente le déplacement par un vecteur $\overrightarrow{AB}$ qui va du point de départ vers le point d'arrivée, alors :

$$F \cdot AB \cdot \cos\alpha = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$$

C'est le *produit scalaire* de la force $\vec{F}$ et du vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$!

8.2 Défintion générale

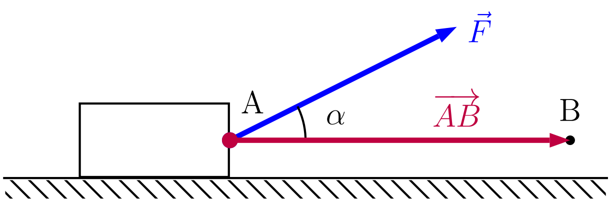


FIGURE I.58 – Travail : vecteurs force et déplacement

Le *travail* d'une force constante $\vec{F}$ dont le point d'application effectue un déplacement $\overrightarrow{AB}$ est égal au produit scalaire de $\vec{F}$ par $\overrightarrow{AB}$:

$$W(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$$

avec α l'angle que fait la force $\vec{F}$ avec le vecteur déplacement $\overrightarrow{AB}$

— Si $0° \leq \alpha < 90°$, alors $\cos\alpha > 0$: $W(\vec{F}) > 0$: $\vec{F}$ effectue un *travail moteur.*
— Si $90° < \alpha \leq 180°$, alors $\cos\alpha < 0$: $W(\vec{F}) < 0$: $\vec{F}$ effectue un *travail résistant.*

La définition générale du travail reste évidemment valable pour les cas particuliers présentés dans la section 8.1 :

— Si $\alpha = 0°$ ($\vec{F}$ de mêmes direction et sens que $\overrightarrow{AB}$) :
$W(\vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos 0° = F \cdot AB \cdot 1$
$\Leftrightarrow W(\vec{F}) = F \cdot AB$ (cf. 8.1.1)

— Si $\alpha = 180°$ ($\vec{F}$ de sens opposé à $\overrightarrow{AB}$) :
$W(\vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos 180° = F \cdot AB \cdot (-1)$
$\Leftrightarrow W(\vec{F}) = -F \cdot AB$ (cf. 8.1.2)

— Si $\alpha = 90°$ ($\vec{F}$ perpendiculaire à $\overrightarrow{AB}$) :
$W(\vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos 90° = F \cdot AB \cdot 0$
$\Leftrightarrow W(\vec{F}) = 0$ (cf. 8.1.3)

8.3 Unité SI

Comme l'unité SI de la norme d'une force est le *Newton(N)* et celle d'un chemin le *mètre(m)*, l'unité SI du travail (étant le produit de la norme d'une force par le chemin de déplacement) est le *Newton mètre(N· m)*

A cette unité, on donne le nom de «Joule[5]». On la note J :

$$\boxed{1\ \text{J} = 1\ \text{N} \cdot \text{m}}$$

1 kJ=1000 J ; 1 MJ=1000 kJ=1.000.000 J ; ...

5. en l'honneur de James Prescott JOULE (1818-1889), physicien britannique

8.4 Quelques travaux particuliers

8.4.1 Travail de levage

Pour soulever un corps de masse m d'une hauteur h à vitesse constante, il faut exercer une force $\vec{F}$ opposée au poids : $\vec{F} = -\vec{P}$.

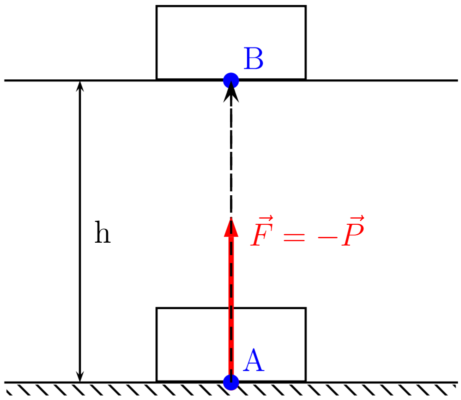


FIGURE I.59 – Travail de levage

Travail de levage :

$$W(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos 0° = F \cdot AB$$

Comme F=P=mg et AB=h, on obtient finalement :

$$W(\vec{F}) = P \cdot h = m \cdot g \cdot h$$

Exemple numérique :

Si on soulève une tablette de chocolat d'une masse de 102 g d'une hauteur de 1 m, la force à appliquer vaut $F = P = m \cdot g = 0,102$ kg $\cdot$ 9,81 N/kg $= 1,00$ N.
Le travail de levage vaut alors : $W = P \cdot h = 1,00$ N $\cdot$ 1 m $= 1$ Nm $= 1$ J.

8.4.2 Travail accélérateur

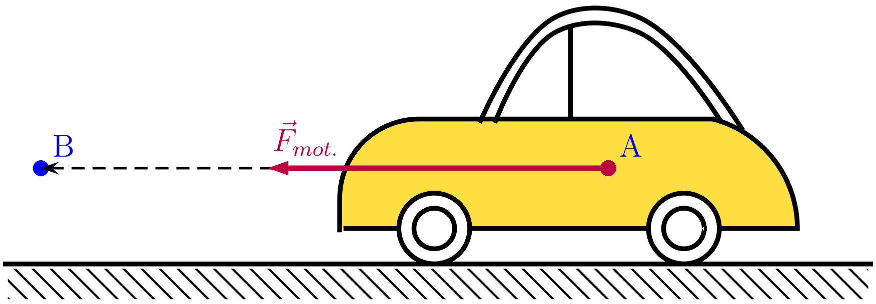


FIGURE I.60 – Travail accélérateur

Lorsque la voiture se déplace de A vers B, la force motrice effectue un travail accélérateur :

$$W(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos 0° = F \cdot AB$$

8.4.3 Travail tenseur

Si une force déforme un corps élastique, elle exerce un travail tenseur.

Exemple : tension d'un arc

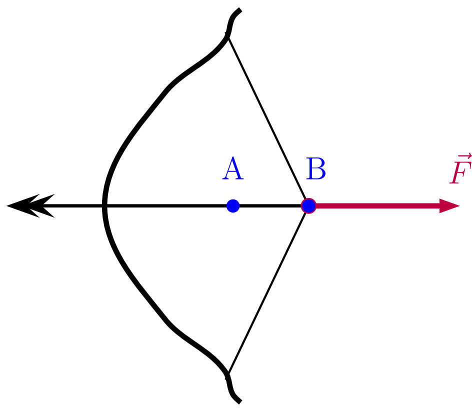


FIGURE I.61 – Travail tenseur

8.4.4 Travail de frottement

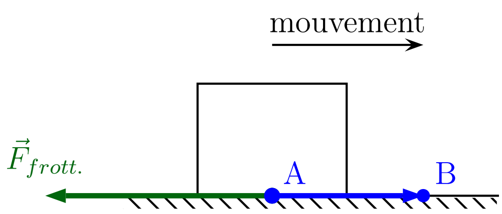


FIGURE I.62 – Travail de frottement

Comme les forces de frottement sont opposées au sens du mouvement, elles effectuent toujours un travail résistant :

$$W(\vec{F}_{frott.}) = \vec{F}_{frott.} \cdot \overrightarrow{AB} = F_{frott.} \cdot AB \cdot \cos 180° = -F_{frott.} \cdot AB$$

8.5 Règle d'or de la mécanique

Soulevons (à vitesse constante) un corps de masse m à une hauteur h.

— *Sans machine simple*, il faut appliquer une force F=P. Il faut déplacer la force d'une distance x=h.

  Le travail de levage vaut donc :

$$W(\vec{F}) = F \cdot x = P \cdot h$$

— Si on veut soulever le même corps à l'aide d'un *palan à n brins de corde (cf. p.48)*, la force est diminuée :

$$F = \frac{P}{n}$$

  Par contre, le chemin devient plus long :

$$x = n \cdot h$$

  Le travail devient :

$$W(\vec{F}) = F \cdot x = \frac{P}{n} \cdot (n \cdot h) = P \cdot h$$

— Si on soulève le même corps à l'aide d'un *plan incliné (cf. p. 52 et 53)* dont l'angle d'inclinaison vaut α, la force est diminuée :

$$F = P \cdot \sin \alpha$$

  Par contre, le chemin devient plus long :

$$x = \frac{h}{\sin \alpha}$$

  Le travail devient :

$$W(\vec{F}) = F \cdot x = (P \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{P}{\sin \alpha} = P \cdot h$$

Conclusion :

Dans les trois cas, le travail à effectuer vaut $W(\vec{F}) = P \cdot h$. Le travail de levage reste toujours le même, il est indépendant de la méthode utilisée pour soulever le corps. Ceci reste valable pour tout autre type de travail.

Règle d'or de la mécanique :

Pour économiser des forces, il faut parcourir un chemin plus long. Réciproquement : pour réduire le chemin sur lequel une force s'applique, il faut augmenter l'intensité de la force. Le produit de la force par le chemin parcouru est constant : on ne peut pas économiser du travail.

Les machine simples réduisent les forces, mais conservent le travail.

9 Puissance

9.1 Exemple d'introduction

Un patron demande à ses ouvriers de déplacer un tas de briques d'une masse totale de 350 kg de la cave au grenier, situé 10 m plus haut. Un premier ouvrier est capable d'effectuer le travail en 20 minutes, un deuxième a besoin de 35 minutes.

Le travail effectué par les deux ouvriers est exactement le même. En effet, il s'agit d'un travail de levage :

$$W(\vec{F}) = m \cdot g \cdot h = 300 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 10 \text{ m} = 29430 \text{ Nm} = 29430 \text{ J}$$

Pourtant, le patron sera probablement plus satisfait avec les prestations du premier ouvrier, comme il a mis moins de temps pour effectuer le travail en question, c'est-à-dire pour fournir les 29430 J.
Le patron pourrait aussi comparer le travail fourni par chacun des ouvriers par seconde :

— Pour le premier ouvrier, le travail fourni vaut W=29430 J. Il a mis un temps t=20 min=1200 s. Ainsi, le travail fourni par unité de temps vaut $\frac{29430 \text{ J}}{1200 \text{ s}} = 24,5 \ \frac{\text{J}}{\text{s}}$ (Joule par seconde)

— Pour le deuxième ouvrier, le travail fourni est le même : W=29430 J. Pour lui, t=35 min=2100 s. Le travail qu'il a fourni par unité de temps vaut $\frac{29430 \text{ J}}{2100 \text{ s}} = 14,0 \ \frac{\text{J}}{\text{s}}$

Le rapport «travail par unité de temps» permet de comparer la *puissance* des deux ouvriers.

9.2 Définition et unité

Définition :

On appelle *puissance mécanique* et on note $\mathcal{P}$ la grandeur physique qui correspond au travail effectué par une force divisé par le temps mis pour effectuer ce travail :

$$\mathcal{P} = \frac{W(\vec{F})}{t}$$

Unité SI :

Comme l'unité SI du travail est le Joule (J), celle du temps la seconde (s), l'unité SI de la puissance est le *Joule par seconde* (J/s).

A cette unité, on donne le nom de «Watt[6]». On la note W :

6. En l'honneur de James WATT (1736-1819), ingénieur écossais dont les améliorations sur la machine à vapeur furent une étape clé dans la révolution industrielle

$$1 \text{ W} = 1 \ \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \ \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

1 kW=1000 W ; 1 MW=1000 kW=1.000.000 W ; 1 mW=0,001 W ; ...

Remarque : le «cheval-vapeur»

Dans le temps, James WATT a mesuré quantitativement la puissance d'un cheval. Il a trouvé qu'un cheval peut soulever d'un mètre une charge de 75 kg en une seconde.

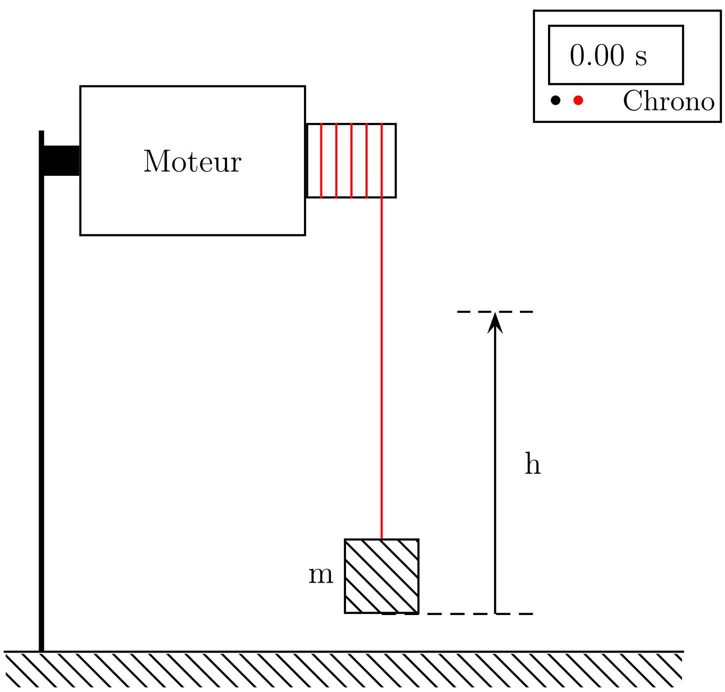
Il exerce donc en une seconde un travail $W = m \cdot g \cdot h = 75 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 1 \text{ m} = 735,75 \text{ J}$, ce qui correspond à une puissance $P = \frac{W}{t} = \frac{735{,}75 \text{ J}}{1\text{s}} = 735,75 \text{ W}$.

Cette puissance est à la base d'une ancienne unité de la puissance, le *cheval-vapeur*, notée ch. Elle ne fait pas partie du système SI !

$$1 \text{ ch} = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW}$$
$$1 \text{ kW} = \frac{1}{0,736} \text{ ch} = 1,359 \text{ ch}$$

9.3 Expérience

On se propose de déterminer la puissance mécanique délivrée par un moteur électrique.



Pour ce faire, on mesure le temps t dont a besoin le moteur pour soulever un corps de masse m d'une hauteur h.

m=_____

h=_____

t=_____

Travail de levage : __________

Puissance : __________

10 Energie

10.1 Définition et unité

Un corps possède de l'énergie s'il est capable de produire un travail. Autrement dit, l'énergie, c'est du «travail en réserve».

L'unité SI de l'énergie est la même que celle du travail, à savoir le *Joule* (J).

10.2 Relation entre énergie et travail

Si on effectue un travail sur un corps, le corps *reçoit* de l'énergie. Son énergie totale va donc *augmenter*.

Si le corps effectue lui-même un travail, il *perd* de l'énergie. Son énergie totale va donc *diminuer*.

10.3 Différentes formes d'énergie

L'énergie peut se présenter sous diverses formes :

— *énergie chimique* : Des corps qui peuvent fournir un travail par une réaction chimique contiennent de l'énergie chimique. C'est une forme d'énergie facile à stocker et à transporter. De même, on peut facilement la transformer en d'autres formes d'énergie. Ex. : piles, accumulateurs, carburant, charbon, bois, le corps humain, ...

— *énergie électrique* : Si on approche l'un de l'autre deux bâtons d'ébonite frottés par une peau de chat, ils se repoussent (et effectuent donc un travail). Ils contiennent de l'énergie électrique. Un condensateur chargé contient également de l'énergie électrique. Il est difficile de stocker une grande quantité d'énergie sous forme électrique. Par contre, l'énergie électrique est facile à transporter (réseau électrique) et on peut la transformer sans problème en d'autres formes d'énergie.

— *énergie thermique* : Un corps qui se trouve à une température supérieure à 0 K (-273°C) possède de l'énergie thermique. C'est une forme d'énergie très difficile à stocker et il est pratiquement impossible de transformer une grande quantité d'énergie thermique en une autre forme d'énergie.

— *énergie nucléaire* : C'est une forme d'énergie contenue dans les noyaux atomiques. En scindant des noyaux lourds en deux noyaux plus légers (fission atomique dans les centrales nucléaires) resp. en fusionnant deux noyaux légers pour obtenir un noyau plus lourd (fusion atomique du Soleil), on peut transformer une grande partie de cette énergie en d'autres formes d'énergie.

— *énergie rayonnée* : des corps dont sortent des rayons (lumineux, ultraviolets, infrarouges, rayons X, rayons gamma, ...) émettent de l'énergie rayonnée. Cette forme d'énergie peut être transportée sans problèmes à grande distance, même à travers le vide (p.ex. le rayonnement du Soleil qui réchauffe la Terre).

— *énergie mécanique* : On distingue trois formes de l'énergie mécanique : l'*énergie potentielle de pesanteur*, l'*énergie cinétique* et l'*énergie potentielle élastique*. L'énergie mécanique sera étudiée plus profondément dans les parties suivantes.

— ...

10.4 Energie mécanique

10.4.1 Energie potentielle de pesanteur

Dans la section 8.4.1, on a vu que pour soulever un corps de masse m d'une hauteur h, il faut qu'on applique sur le corps une force $\vec{F}$ dont le *travail de levage* vaut $W(\vec{F}) = m \cdot g \cdot h$.

Le corps qui effectue le travail de levage (l'opérateur, un moteur électrique, ...) perd donc une quantité d'énergie égale à $W(\vec{F})$, et le corps soulevé reçoit cette quantité d'énergie. On dit qu'un corps qui est soulevé reçoit de l'*énergie potentielle de pesanteur*.
Afin d'indiquer une valeur de l'énergie potentielle de pesanteur, il faut fixer un *niveau de référence*. Si le corps se trouve à ce niveau de référence, il possède une énergie potentielle de pesanteur nulle.

Si, à partir du niveau de référence, on soulève le corps à une altitude h, il acquiert une énergie potentielle de pesanteur égale au travail de levage $W(\vec{F})$:

$$\boxed{E_{pot.pes.} = m \cdot g \cdot h}$$

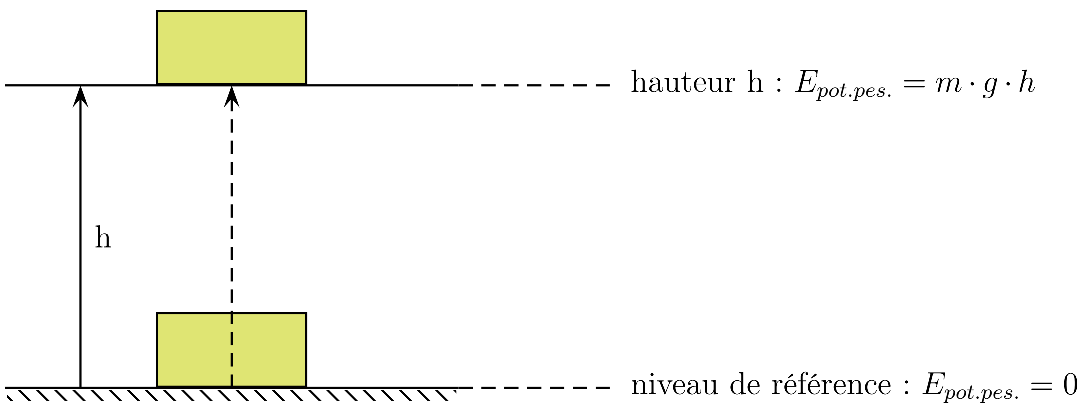


FIGURE I.63 – Energie potentielle de pesanteur

Exemple : Si on fixe le niveau de référence au niveau du sol, une tablette de chocolat de masse m=102 g, soulevée à une hauteur h=1 m, possède une énergie potentielle de pesanteur $E_{pot.pes.} = m \cdot g \cdot h = 0,102 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ J}$.

10.4.2 Energie cinétique

Pour mettre un corps en mouvement (et ainsi lui donner une certaine vitesse v), il faut exercer sur ce corps une force qui effectue un *travail accélérateur* (cf. 8.4.2). L'énergie acquise par un corps qui a été accéléré s'appelle *énergie cinétique*.

Cette énergie est proportionnelle à la masse m du corps et au carré de sa vitesse. On peut calculer sa valeur par la formule suivante[7] :

$$\boxed{E_{cin.} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}$$

ATTENTION ! La vitesse doit être indiquée en unité SI, c'est à dire en m/s (mètres par seconde), sinon l'unité résultante de l'énergie cinétique ne sera pas le Joule.

$$1\ \mathrm{m/s} = 60\ \mathrm{m/min} = 3600\ \mathrm{m/h} = 3,6\ \mathrm{km/h}$$

et donc :

$$1\ \mathrm{km/h} = \frac{1}{3,6}\ \mathrm{m/s}$$

Exemple : Une voiture de masse m=1,2 t qui se déplace à une vitesse de 60 km/h possède une énergie cinétique $E_{cin.} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1200\ \mathrm{kg} \cdot \left(\frac{60}{3,6}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)^2 = 166.667\ \mathrm{J} = 166,7\ \mathrm{kJ}$[8].

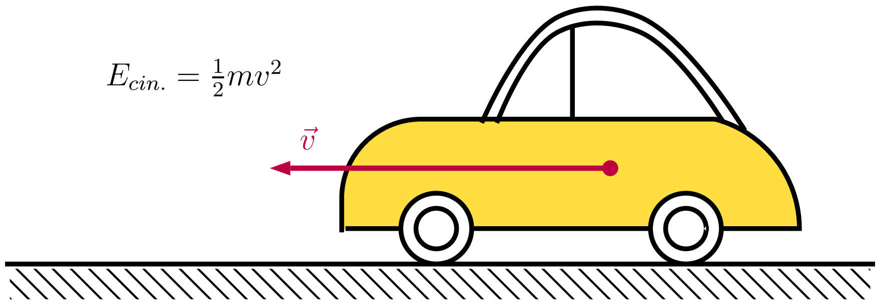


FIGURE I.64 – Energie cinétique

10.4.3 Energie potentielle élastique

Cette énergie est celle que possède un corps lorsqu'il est déformé de manière élastique[9]. Elle est égale au travail qu'il a fallu pour déformer le corps (ex. : travail tenseur).

Exemples : un arc tendu, un ressort comprimé/étiré, une balle qui rebondit, ...

7. cette formule ne sera établie qu'en classe de $2^{ème}$
8. l'unité résultante est le $\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$. En classe de $2^{ème}$, on pourra montrer que c'est l'équivalent du Joule
9. si une force déforme un corps de manière élastique, le corps va reprendre sa forme initiale, une fois que la force a disparu (contrairement aux déformations inélastiques qui resteront même si la force a disparu

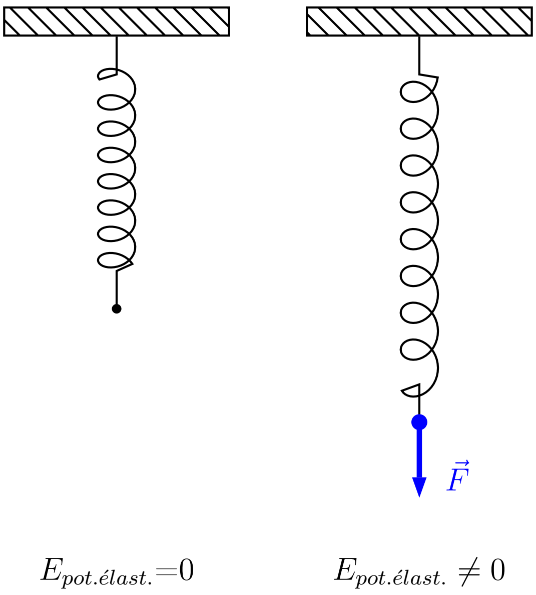


FIGURE I.65 – Energie potentielle élastique

10.5 Transfert et transformation d'énergie mécanique

L'énergie mécanique peut être *transférée* d'un corps vers un autre. Le corps qui effectue le travail transfert une partie de son énergie sur le corps sur lequel le travail est effectué. Ainsi :

Le travail est un mode de transfert d'énergie mécanique.

Exemple :

Un wagon de masse m_1 qui se déplace à une certaine vitesse v_1 heurte un autre wagon de masse m_2 et qui se trouve initialement au repos. Après collision, le premier wagon a ralenti, il a perdu de l'énergie cinétique. Cependant, il a réalisé un travail d'accélération sur le deuxième wagon, qui a ainsi reçu de l'énergie cinétique il se déplace à la vitesse $v_{2'}$. De l'énergie cinétique a été transférée du premier wagon vers le deuxième.

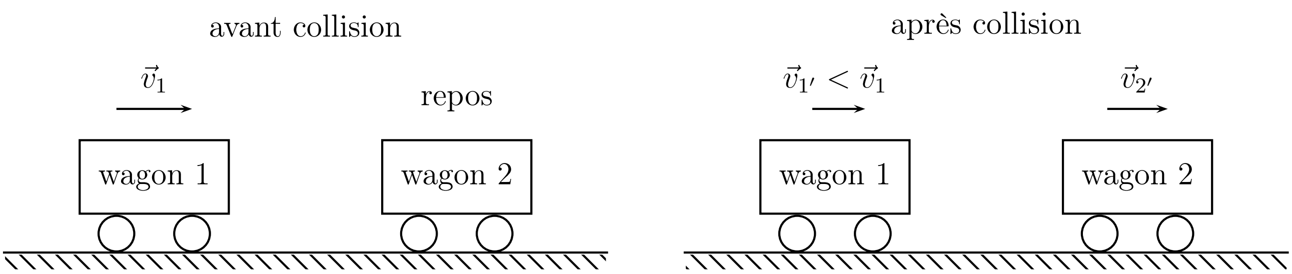


FIGURE I.66 – Choc entre 2 wagons - Transfert d'énergie cinétique

L'énergie peut être *transformée* d'une forme en une autre.

Exemple :
Un wagon en mouvement s'immobilise en comprimant un ressort : l'énergie cinétique du wagon est convertie en énergie potentielle élastique du ressort.

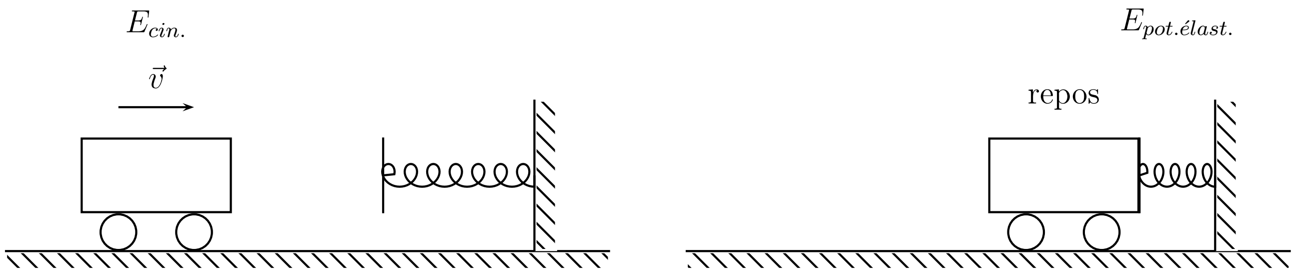


FIGURE I.67 – Transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle élastique

Important :

Lors de tout transfert et de toute transformation d'énergie, au moins une partie de l'énergie initiale est toujours transformée par les travaux des forces de frottement en énergie thermique.

10.6 Principe de conservation de l'énergie

On vient de voir que l'énergie peut être transférée d'un corps sur un autre, qu'elle peut être transformée d'une forme à l'autre. Durant tous ces processus, la valeur totale de l'énergie reste toujours la même. En d'autres mots : aucune énergie n'est créée, aucune énergie n'est perdue. C'est le *principe de conservation de l'énergie* :

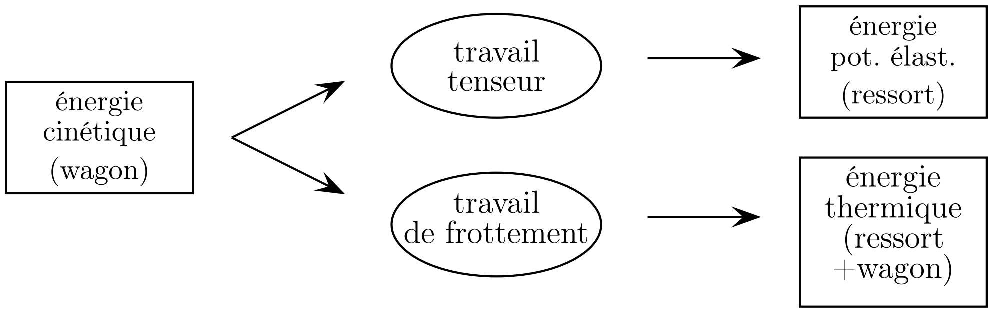
On ne peut pas créer de l'énergie, on ne peut pas perdre de l'énergie. L'énergie totale de l'univers a toujours été et va rester constante.

Lors de la transformation / du transfert de l'énergie, une partie de l'énergie initiale est convertie en énergie thermique. Comme l'énergie thermique est difficile à reconvertir en une forme d'énergie utile, on dit souvent que le partie de l'énergie qui a été transformée en énergie thermique *«est perdue»*.
En effet, dans la plupart des cas, l'homme ne sait plus réutiliser l'énergie thermique qui accompagne les transformations/transferts d'énergie. Cependant, d'un point de vue physique, elle n'est pas perdue : elle existe toujours dans les corps qui ont été réchauffés.

10.7 Schémas de transferts / de transformation

Souvent, il est commode de représenter les transferts/transformations d'énergie avec les travaux qui les réalisent sur un même schéma. Dans des cadres carrés, on indique la forme d'énergie que possède un corps donné. Dans des cadres elliptiques, on indique les travaux qui ont lieu entre les transformations/transferts d'énergie.

Pour la figure I.67, on obtient le schéma suivant :



Chapitre II

Thermodynamique

1 Température et agitation thermique

Tout corps est formé d'atomes resp. de molécules. On distingue entre trois états de la matière : un corps peut être *solide*, *liquide* ou *gazeux*.

1.1 Les états de la matière

1.1.1 Etat solide

Les particules (atomes ou molécules) qui forment un corps solide ont une structure ordonnée. Cependant, elles ne sont pas immobiles. Elles ne peuvent pas se déplacer les unes par rapport aux autres, mais elles *vibrent* sur place.

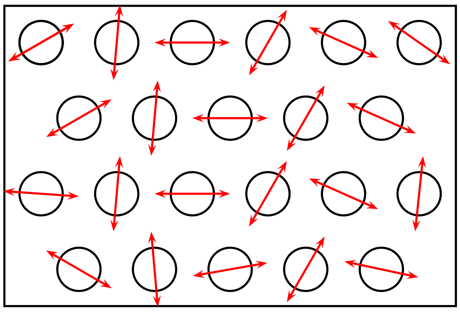


FIGURE II.1 – Etat solide

1.1.2 Etat liquide

Les particules qui forment un liquide ont un mouvement propre. Elles peuvent se déplacer les unes par rapport aux autres, mais elles sont toujours très rapprochées. Il n'y a plus de structure ordonnée.

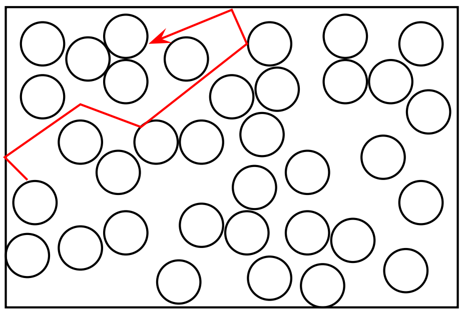


FIGURE II.2 – Etat liquide

1.1.3 Etat gazeux

A l'état gazeux, les particules ont un mouvement désordonné. Elles se déplacent très rapidement et sont très éloignées les unes des autres.

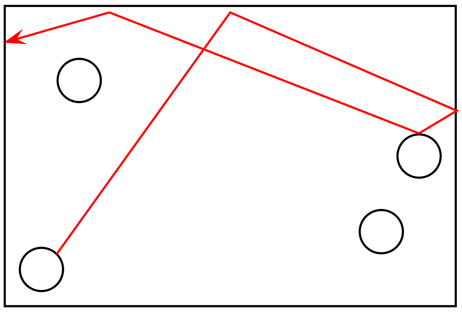


FIGURE II.3 – Etat gazeux

1.2 La température et l'énergie interne

Définition :

La *température* est une mesure de l'agitation des particules des corps.

Pour un corps solide, plus la vibration des particules est vigoureuse (en moyenne), plus sa température est élevée. Pour les liquides et les gaz, les particules d'un corps à température plus élevée se déplacent à une vitesse plus grande que celles d'un corps de température moins élevée.

Comme les particules sont en mouvement (vibrations ou déplacements), elles possèdent toutes de l'énergie cinétique.

Définition :

On appelle *énergie interne* d'un corps l'énergie cinétique moyenne des particules qui le constituent.

Ainsi, on peut aussi dire que :

La température d'un corps est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules qui le constituent.

1.3 Mesure de la température

L'instrument de mesure de la température est le *thermomètre*.
Il existe deux groupes de thermomètres.

1.3.1 Thermomètres qui nécessitent un contact direct

— *thermomètre à résistance* : une résistance électrique (v. chapitre III) varie avec la température. Un montage électronique affiche la température. Plage d'utilisation : -273 °C à 3000 °C.

— *thermomètre à dilatation* : thermomètre à liquide (mercure ou alcool par exemple), à gaz ou à solide. Plage d'utilisation : -250 °C à 1000 °C.

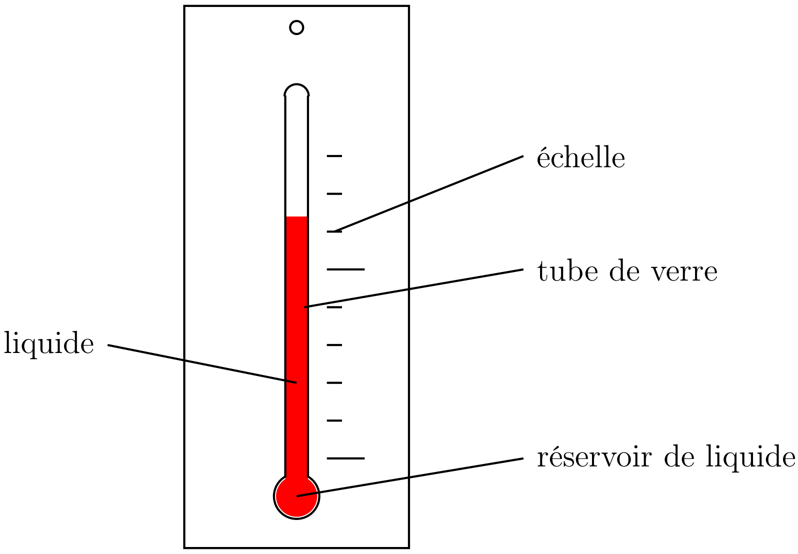


FIGURE II.4 – Thermomètre à liquide

Lorsque la température augmente, le liquide se dilate et le niveau monte.

— *thermomètre à couple thermoélectrique* : l'instrument est un thermocouple. On mesure la différence de potentiel entre deux fils métalliques de nature différente. Plage d'utilisation : -250 °C à 3000 °C.

— *thermomètre bimétallique* : La température est mesurée au moyen d'un système bimétallique situé à l'intérieur du capteur de température. Le bimétal est composé de deux bandes de métal jointes ensemble de manière permanente, chaque métal ayant un coefficient de dilatation thermique différent. Ceci fait que la bande s'incurve en proportion de la variation de température.

— ...

1.3.2 Thermomètres qui ne nécessitent pas de contact direct

— le *pyromètre* : c'est un appareil à l'aide duquel on compare la brillance du corps dont on aimerait connaître la température à celle d'un filament de tungstène chauffé. Plage d'utilisation : 500 °C à 3000 °C.

— le *spectromètre* : Il est essentiellement utilisé pour mesurer la température des étoiles. Celles-ci présentent des couleurs diverses. Cela tient du fait que leur température superficielle est différente. Ainsi par exemple, une étoile bleue est plus chaude qu'une étoile jaune. Plage d'utilisation : 1000 °C à 20000 °C

— ...

1.4 Unités de la température et symboles

1.4.1 Le degré Celsius

Le degré Celsius (°C) est l'unité de l'échelle de température Celsius, introduite en 1744. Son nom est une référence à l'astronome et physicien suédois Anders CELSIUS [1], inventeur en 1742 d'une des premières échelles de température. Cette unité de mesure est d'usage courant à travers le monde, à l'exception de quelques rares pays dont les Etats-Unis.

L'échelle Celsius a deux points fixes :
— la valeur 0 °C correspond à la température de solidification/fusion de l'eau à pression atmosphérique normale (1013, 25 hPa).
— la valeur 100 °C correspond à la température d'ébullition/de condensation de l'eau, également à pression atmosphérique normale.

Entre les deux points fixes, l'échelle est subdivisée en 100 segments de même longueur.

Le symbole utilisé pour exprimer une température en degrés Celsius est la lettre grecque «thêta» : θ.

Ex. : $\theta = 23,5$ °C

1.4.2 Le degré Fahrenheit

Le degré Fahrenheit (°F) est une unité de mesure de la température, proposée par le physicien allemand Daniel FAHRENHEIT [2] en 1724. Aujourd'hui, cette échelle est utilisée aux Etats-Unis, à Bélize et aux Îles Caïman.

Fahrenheit a décidé de définir son échelle par deux températures de référence :
— la valeur de 0°F correspond à la température la plus basse qu'il ait mesurée durant de rude hiver de 1708 à 1709 dans sa ville natale de Danzig.
— la valeur de 100°F correspond à celle du sang du cheval.

Le symbole utilisé pour exprimer une température en degrés Fahrenheit est t_F.

Ex. : $t_F = 95,3$°F.

1. Anders CELSIUS, 1701-1744
2. Daniel Gabriel FAHRENHEIT, 1686-1736

Conversions :

$$t_F(°\text{F}) = 1,8 \cdot \theta(°\text{C}) + 32$$
$$\theta(°\text{C}) = \frac{t_F(°\text{F}) - 32}{1,8}$$

Exemples :

$\theta = 22,0$ °C : $t_F = (1,8 \cdot 22 + 32)$ °F $= 71,6$ °F
$t_F = 85,0$ °F : $\theta = \frac{85,0-32}{1,8}$ °C $= 29,4$ °C.

1.4.3 Le kelvin

Le kelvin est l'**unité SI de la température**!
Son nom est une référence à William THOMSON [3], mieux connu sous le nom de Lord KELVIN.

Cette unité est en relation directe avec l'*énergie interne* d'un corps (cf. p. 73) : si un corps n'a plus aucune énergie interne (c'est-à-dire si ses particules ont complètement arrêté à vibrer et qu'il n' y a plus aucune agitation thermique), il a une température de 0 K (on dit que le corps a atteint *«le zéro absolu»*) : c'est la température la plus basse qui puisse exister.

Le symbole utilisé pour exprimer une température en kelvin est T.

Ex. : $T = 285$ K.

Conversions :

$$T(K) = \theta(°\text{C}) + 273$$
$$\theta(°\text{C}) = T(K) - 273$$

Exemples :

$\theta = 32$ °C : $T = (32 + 273)$ K $= 306$ K
$T = 295$ K : $\theta = (295 - 273)$ °C $= 22$ °C

3. William THOMSON, 1824-1907

2 La chaleur

2.1 Définition, symbole et unité

Dans le chapitre précédent, on a vu que pour augmenter l'*énergie mécanique* d'un corps, il faut qu'on exerce sur lui un *travail*. De même, un corps qui effectue un travail voit son énergie mécanique diminuer. Voilà pourquoi nous avons dit que *le travail est un mode de transfert de l'énergie mécanique* (v. section 10.5 p. 68).

Tout comme l'énergie mécanique d'un corps peut varier, on peut aussi augmenter où diminuer son énergie interne :
- si l'énergie interne d'un corps diminue (i.e. s'il devient plus froid), on dit qu'il *cède* de la *chaleur*.
- si l'énergie interne d'un corps augmente (i.e. s'il devient plus chaud), on dit qu'il *reçoit* de la *chaleur*.

D'où la définition :

La chaleur est un mode de transfert de l'énergie interne.

Tout comme le travail est noté W, la chaleur est notée Q. Comme la chaleur est un transfert d'énergie, son unité SI est évidemment égale à celle de l'énergie : le Joule (J).

Attention !
Dans la vie quotidienne, on utilise souvent (par abus) le terme «chaleur» au lieu du terme «température». Au sens physique, dire que «dehors, il y a une grande chaleur» est faux, comme la chaleur caractérise un *transfert* d'énergie. La phrase «dehors, la température est élevée» est correcte, comme la température caractérise un état (énergétique).

2.2 Transfert et conservation de l'énergie interne

Les transferts d'énergie interne ont lieu entre des corps ayant des températures différentes. Ainsi une assiette de soupe bouillante se refroidit dans l'assiette alors que le lait sorti du réfrigérateur se réchauffe.

Spontanément, l'énergie interne passe du corps ayant la température la plus élevée vers celui dont la température est la plus basse.

Le *principe de conservation de l'énergie* reste évidemment valable pour l'énergie interne :

Si un corps «perd» de l'énergie interne, un autre corps va recevoir cette énergie. Aucune énergie interne ne peut être perdue et aucune énergie ne peut être créée.

L'énergie interne peut se propager par *conduction*, *convection* ou *rayonnement*.

2.2.1 La conduction

Le transfert par *conduction* est un échange d'énergie interne se réalisant dans un système *sans déplacement de matière.*

Ce transfert peut se réaliser au sein d'un seul corps ou par *contact* entre deux corps.

Expérience :

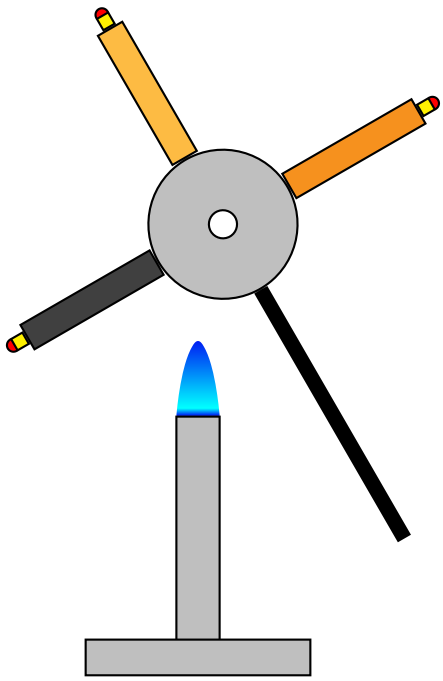


FIGURE II.5 – Expérience - Conduction thermique

Chauffons un cylindre métallique auquel sont attachés 3 tuyaux, l'un étant formé de cuivre, l'autre de laiton et le troisième de fer. Dans les extrémités libres des tuyaux, on insert des allumettes.

On observe que l'allumette insérée dans le tuyau en cuivre s'allume peu après le début du chauffage, suivie, un peu plus tard, par l'allumette dans le tuyau en laiton. L'allumette dans le tuyau en fer est la dernière à s'allumer.

Explication :
L'agitation des particules (atomes ou molécules) se propage par collisions avec les particules voisines. Cette propagation est plus ou moins rapide, selon la matière dont est formée un corps.

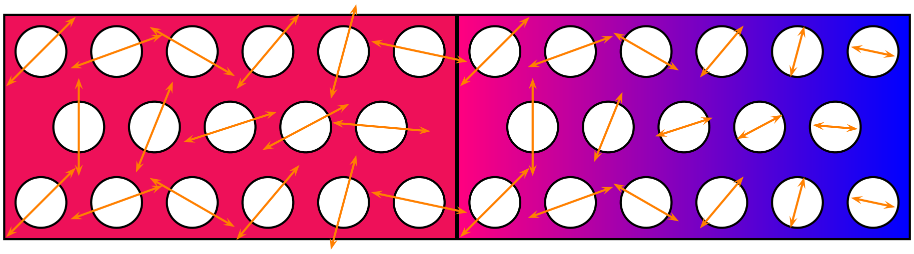


Figure II.6 – Contact entre un corps chaud et un corps froid

— bons conducteurs : en général, les métaux qui sont bons conducteurs d'électricité sont aussi de bons conducteurs thermiques. Ainsi, le cuivre est un bon conducteur de l'énergie électrique, mais aussi un bon conducteur de l'énergie interne (on l'utilise p.ex. dans la fabrication de certaines casseroles).

— mauvais conducteurs (isolants thermiques) : p.ex. le bois (poignée d'ustensiles de cuisine), le liège (dessous de plat), l'air (vitres doubles), ...

2.2.2 La convection

Le transfert *par convection* a lieu grâce au *déplacement de la matière*, dans des liquides et des gaz. Les particules, en bougeant, transportent avec elles leur énergie interne. Ces mouvements sont appelés courants de convection.

Expérience :

Explication :

L'eau qui est chauffée par la flamme se dilate. Sa masse volumique diminue et par conséquence, elle se déplace vers le haut. Peu à peu, l'eau se met en circulation : c'est un *courant de convection*. L'eau chaude monte d'un côté, l'eau plus froide descend de l'autre. L'énergie thermique est ainsi transportée d'un endroit à l'autre par les molécules d'eau qui se déplacent.

Applications :

— L'air qui entoure les radiateurs d'une salle de classe est chauffée. Elle monte vers le haut, y refroidit et redescend de l'autre côté de la salle. Le courant de convection qui s'établit réchauffe ainsi toute la salle de classe. Voilà pourquoi un radiateur est aussi appelé un *convecteur*.

— La convection joue un rôle très important en météorologie. Les surfaces chaudes de la Terre font monter de l'air chaud qui redescend vers les surfaces plus froides. Au-dessus des endroits où se forment des courants de convection on voit souvent apparaître des nuages *cumulus* (l'eau qui se retrouve sous forme gazeuse dans les courants de convection y refroidit et redevient liquide).

— ...

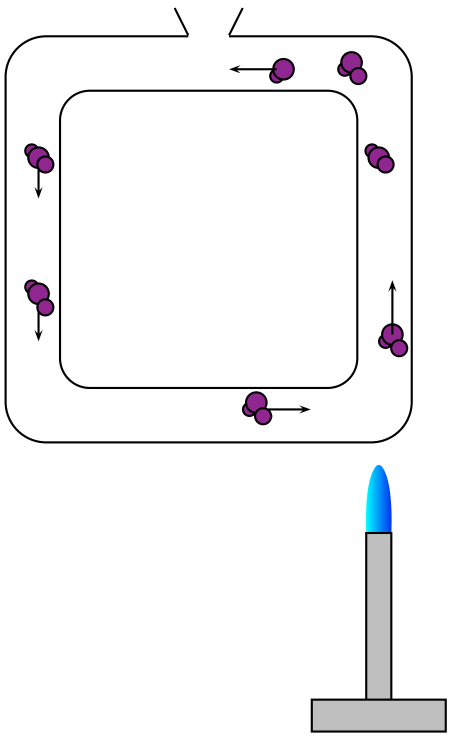


Figure II.7 – Expérience - Convection thermique

2.2.3 Le rayonnement

Tous les corps, dont la température est supérieure au zéro absolu, émettent un *rayonnement* (*ondes électromagnétiques*). L'énergie rayonnée par le corps dépend de sa température.

Expérience :

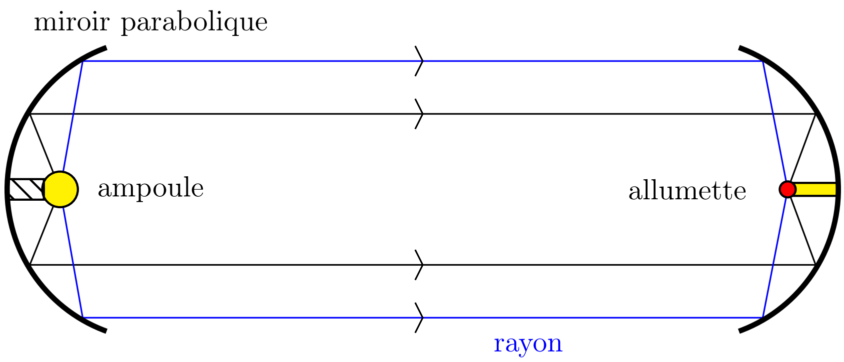


Figure II.8 – Expérience - Rayonnement thermique

Une ampoule électrique est placée dans le foyer d'un miroir parabolique. Tous les rayons de l'ampoule qui sont réfléchis par le miroir sont transformés en rayons parallèles qui se dirigent vers le second miroir parabolique. Ici, les rayons sont réfléchis tels qu'ils passent tous par le foyer du miroir où se trouve la tête d'une allumette. Quelques moments après avoir allumé l'ampoule, l'allumette s'enflamme.

L'énergie thermique a été transportée de l'ampoule à l'allumette par rayonnement.

Applications :

— l'énergie thermique du Soleil nous parvient par rayonnement à travers le vide de l'espace.
— les surfaces noires absorbent le rayonnement et s'échauffent davantage que des surfaces blanches. Ainsi les panneaux solaires sont peints en noir et les maisons dans les pays chauds sont souvent blanches.

2.3 Isolation thermique

Si on veut qu'un système n'échange aucune énergie thermique avec son environnement, il faut l'isoler thermiquement. Cela veut dire qu'il faut éviter tout transfert d'énergie thermique sous forme de conduction, sous forme de convection et aussi sous forme de rayonnement. En entoure le système par des *parois adiabatiques*. En pratique, une paroi adiabatique parfaite n'existe pas, on peut seulement limiter l'échange thermique à un minimum.

Applications :

— les bouteilles *isothermes* : ces bouteilles sont faits de doubles parois. En effet, l'air (mauvais conducteur thermique) enfermé entre cette double paroi limite la conductivité, et les parois sont parfaitement réfléchissantes afin qu'aucun rayonnement thermique ne puisse entrer ou sortir de la bouteille.
— le double vitrage : l'air enfermé entre les 2 vitres empêche une bonne conductivité thermique entre l'intérieur et l'extérieur.
— ...

3 Calorimétrie

La calorimétrie est la partie de la thermodynamique qui a pour objet la mesure des quantités de chaleur. Ce sont p.ex. les quantités de chaleur nécessaires pour augmenter la température d'un corps, pour changer son état, ou bien encore les quantités de chaleur cédées par un corps qui refroidit (ou qui passe de l'état gazeux à l'état liquide ou encore de l'état liquide à l'état solide).

3.1 Expériences d'introduction

3.1.1 Relation entre la chaleur et la différence de température

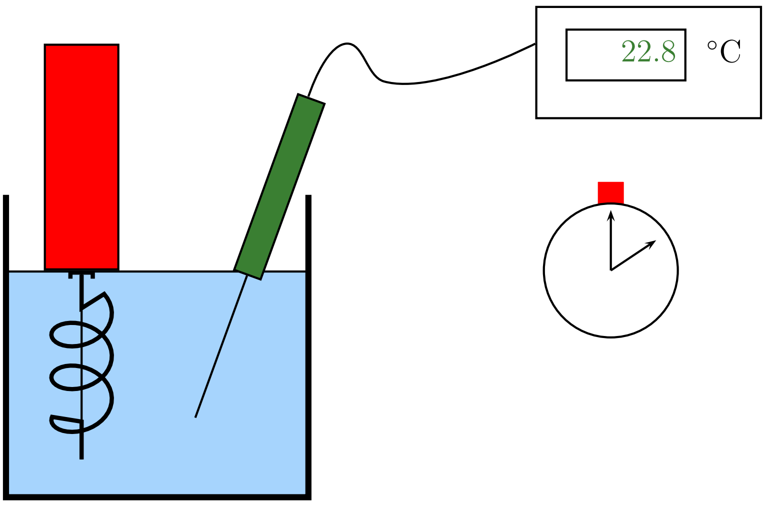
Chauffons une masse de 1 kg d'eau à l'aide d'un thermoplongeur. Le thermoplongeur convertit l'énergie électrique qu'il reçoit entièrement en énergie thermique qui sera transmise à l'eau. Sa puissance électrique $\mathcal{P}$ est donc égale au rapport de l'énergie électrique $E_{él.}$ reçue divisée par l'intervalle du temps Δt pendant lequel il fonctionne, mais elle est aussi égale au rapport entre la quantité de chaleur Q reçue par l'eau divisée par cet intervalle de temps :

$$\mathcal{P}_{él.} = \frac{E_{él.}}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Si on connaît la puissance $\mathcal{P}$ du thermoplongeur, on peut donc facilement calculer la quantité de chaleur reçue par l'eau après un intervalle de temps donné :

$$Q = \mathcal{P} \cdot \Delta t$$

Chauffons une masse m=______ d'eau à l'aide d'un thermoplongeur de puissance P=______ et mesurons la variation de la température ΔT en fonction du temps ($\Delta T = \theta - \theta_0$, où θ_0 est la température à l'instant initial.)



Comparons les valeurs de ΔT aux valeurs de Q. On constate :

La variation de la température est proportionnelle à la chaleur reçue par l'eau : $Q \sim \Delta T$

$\Delta t(s)$	$Q(J)$	$\theta(°C)$	$\Delta T(K)$

3.1.2 Relation entre la chaleur et la masse

Répétons l'expérience précédente avec une masse d'eau deux fois plus grande.
m=______ ; $\mathcal{P}$ = _____

$\Delta t(s)$	$Q(J)$	$\theta(°C)$	$\Delta T(K)$

On constate : Pour une même augmentation de température ΔT, il faut attendre deux fois plus longtemps. La chaleur nécessaire pour chauffer une masse d'eau deux fois plus grande à la même température finale est le double de la chaleur précédente.

Conclusion :

La chaleur reçue par l'eau est proportionnelle à sa masse :
$$Q \sim m$$

3.2 La capacité thermique massique

Les expériences précédentes viennent de montrer que :

$$\begin{aligned} Q &\sim m \\ Q &\sim \Delta T \end{aligned}$$

On peut conclure que :

$$\begin{aligned} & Q \sim m \cdot \Delta T \\ \Leftrightarrow \quad & \tfrac{Q}{m \cdot \Delta T} = c\,(constante)(*) \end{aligned}$$

La constante c est appelée *capacité thermique/calorifique massique*. Elle dépend de la matière qui reçoit/cède la chaleur et est exprimée en $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}}$ (Joule par Kilogramme Kelvin).

La capacité thermique massique c représente la quantité de chaleur échangée par 1 kg de substance lors d'une variation de température de 1 K (ou de 1°C).

Finalement, la chaleur qu'il faut apporter à un corps de masse m et de capacité thermique c se calcule, en transformant l'équation (*), par la formule :

$$Q = m \cdot c\ \Delta T$$

matière	$c(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}})$
mercure	139
cuivre	389
fer	456
béton	800 à 1000
aluminium	900
air	1000
sodium	1256
huile d'olive	2000
pétrole	2093
eau	**4186**
glace	2060
hydrogène	14300

TABLE II.1 – Capacités calorifiques massiques de quelques substances courantes

On remarque que l'eau a une capacité thermique massique particulièrement élevée. C'est la raison pour laquelle elle est couramment utilisée pour transporter la chaleur dans les installations de chauffage ou encore pour évacuer les grandes quantités de chaleur d'un moteur à explosion vers le radiateur.

<u>Remarque :</u> calorie et Calorie - des anciennes unités d'énergie

Pour élever la température de 1 g d'eau de 1 °C, il faut qu'on lui apporte une énergie (chaleur) $Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,001$ kg $\cdot$ 4186 J/kgK $\cdot$ 1 K $= 4,186$ J. Cette quantité d'énergie représente une ancienne unité de l'énergie, *la calorie* (avec un c en minuscule).

Une calorie est l'énergie qu'il faut fournir à 1 g d'eau afin d'élever sa température de 1 °C : 1 cal = 4,186 J

La Calorie (avec un C majuscule), ou *grande calorie* correspond à 1000 calories, soit 4186 joules.

1 Cal=1000 cal=4186 J=4,186 kJ

3.3 Signe de la chaleur

Par convention :

— Si un corps *reçoit* de la chaleur, la chaleur échangée par lui est une chaleur *positive* : Q>0.

— Si un corps *cède* de la chaleur, la chaleur échangée par lui est une chaleur *négative* : Q<0.

Exemple :
Pour élever la température de 1 g d'eau de 1 K, la chaleur reçue par l'eau vaut Q=+4,186 J.
Si 1 g d'eau refroidit de 1 K, la chaleur cédée par l'eau vaut Q=−4,186 J.

3.4 Chaleur et changements d'état

3.4.1 Fusion et chaleur latente de fusion

Comme la glace, toute substance pure fond (c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état liquide) à une température qui lui est propre : sa *température de fusion*, notée θ_F. Le tableau suivant donne les températures de fusion de quelques substances courantes :
Nous avons vu qu'un apport de chaleur peut augmenter la température d'un corps. Cependant, si le corps se trouve à sa température de fusion, un apport de chaleur ne va plus augmenter sa température, mais toute la chaleur reçue sera utilisée pour changer le corps de l'état solide à l'état liquide.

Explication :

Les particules constituant le solide étant animés de mouvements vibratoires, un apport d'énergie thermique augmente l'amplitude de ces oscillations et donc la température du solide augmente. A partir de la température de fusion, les particules peuvent glisser les unes sur les autres car les liaisons qui les tenaient à leur place sont détruites. L'ordre caractéristique de la structure solide disparaît. L'énergie fournie sert à briser cette cohésion.

substance	θ_F(°C)
acier	1515
aluminium	660
éthanol	-117
fer	1535
glace	0
huile	∼-10
mercure	-39
tungstène	3410
hélium	-272
air	-220
plomb	327
or	1064
diamant	3540

TABLE II.2 – Températures de fusion de quelques substances

La chaleur Q nécessaire à la fusion d'un corps solide de masse m se calcule par la formule :

$$\boxed{Q = m \cdot L_F > 0}$$

L_F est la *chaleur latente de fusion*. Elle est caractéristique de la substance. Son unité est le $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$. Sa valeur représente l'énergie qu'il faut fournir à 1 kg de la substance pour la faire fondre entièrement.

substance	$L_F(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}})$
aluminium	396.000
fer	267.000
glace	330.000
mercure	11.000
plomb	25.000

TABLE II.3 – Chaleurs latentes de fusion

3.4.2 Solidification

Tout corps pur se solidifie à une température qui lui est propre. Cette *température de solidification* est la même que la température de fusion θ_F. Durant ce changement d'état, le liquide *cède* de l'énergie thermique à son environnement.

La chaleur Q cédée par un corps liquide de masse m lors de sa solidification se calcule par la formule :

$$\boxed{Q = -m \cdot L_F < 0}$$

avec L_F la chaleur latente de fusion du corps.

3.4.3 Vaporisation et chaleur latente de vaporisation

Comme l'eau, toute substance pure entre en vaporisation (c'est-à-dire passe de l'état liquide à l'état gazeux) à une température qui lui est propre : sa *température de vaporisation*, notée θ_V. Le tableau suivant donne les températures de vaporisation de quelques substances courantes :

substance	θ_V(°C)
aluminium	2467
mazout	210 à 380
mercure	357
eau	100
éthanol	78,5
butane	1
propane	-45
oxygène	-183
azote	-196
hélium	-267

TABLE II.4 – Températures de vaporisation de quelques substances

A la température de vaporisation, toute la chaleur fournie à un liquide sert au changement de l'état liquide à l'état gazeux. La température reste constante durant la vaporisation.

La chaleur Q nécessaire à la vaporisation d'un liquide de masse m se calcule par la formule :

$$\boxed{Q = m \cdot L_V > 0}$$

L_V est la *chaleur latente de vaporisation*. Tout comme pour la chaleur latente de fusion, elle est caractéristique de la substance et son unité est le $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$. Elle représente l0énergie qu'il faut fournir à 1 kg de liquide pour le vaporiser entièrement.

substance	$L_V(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}})$
azote	200.000
eau	2.300.000
éthanol	850.000
fer	6.310.000
dioxyde de carbone	590.000
hélium	25.000
dihydrogène	452.000
mercure	300.000
dioxygène	213.000

TABLE II.5 – Chaleurs latentes de vaporisation

3.4.4 Condensation

Tout corps pur passe de l'état gazeux à l'état liquide à sa *température de liquéfaction*, qui est la même que la température de vaporisation θ_V. Durant ce changement d'état, le gaz *cède* de l'énergie thermique à son environnement.

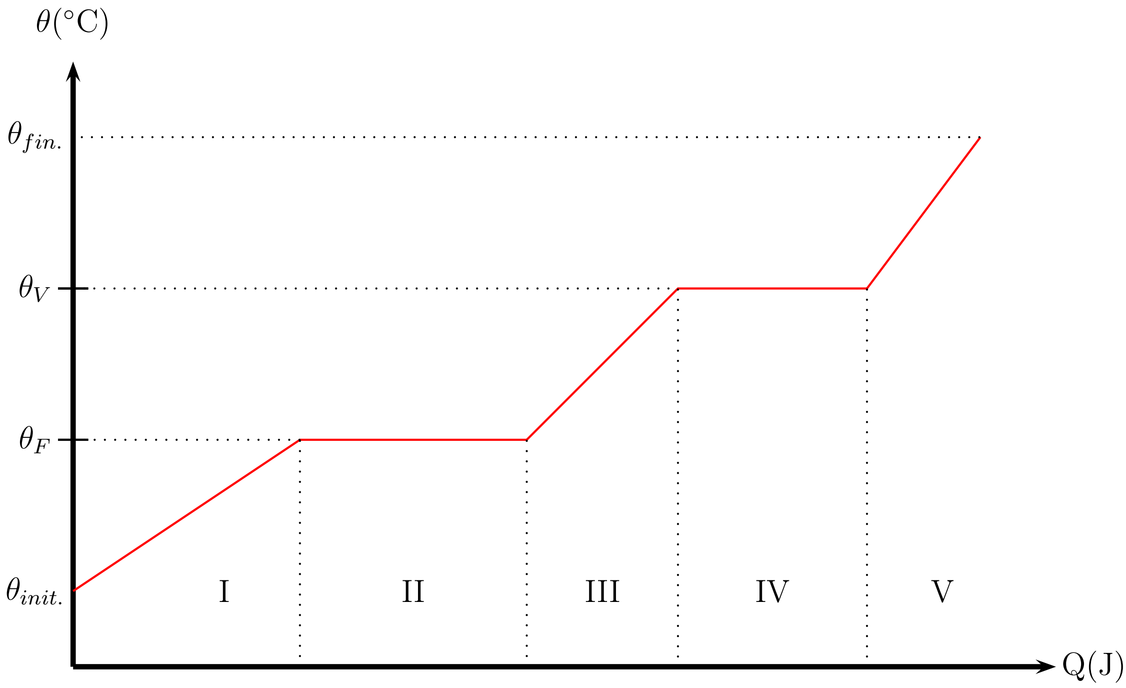
La chaleur Q cédée par un gaz de masse m lors de sa condensation se calcule par la formule :

$$\boxed{Q = -m \cdot L_V < 0}$$

avec L_V la chaleur latente de vaporisation du corps.

3.5 Apport de chaleur : les différentes étapes en résumé

Considérons un corps *solide* de masse m qui se trouve initialement à la température $\theta_{init.}$. Apportons continuellement de la chaleur à ce corps.



Le graphique (non à l'échelle) montre la variation de la température du corps en fonction de la chaleur qu'il reçoit.

- phase I : la chaleur reçue est utilisée pour augmenter la température du solide jusqu'à la température de fusion :
  $Q_I = m \cdot c_{solide} \cdot (\theta_F - \theta_{init.})$
- phase II : la chaleur reçue est utilisée pour fondre le solide :
  $Q_{II} = m \cdot L_F$
- phase III : la chaleur reçue est utilisée pour augmenter la température du liquide de la température de fusion à la température de vaporisation :
  $Q_{III} = m \cdot c_{liquide} \cdot (\theta_V - \theta_F)$
- phase IV : la chaleur reçue est utilisée pour vaporiser le liquide :
  $Q_{IV} = m \cdot L_V$
- phase V : la chaleur reçue est utilisée pour augmenter la température du gaz :
  $Q_V = m \cdot c_{gaz} \cdot (\theta_{fin.} - \theta_V)$

3.6 Calorimètres

Un calorimètre est un récipient formé de parois quasi-adiabatiques, destiné à mesurer les échanges de chaleur. Cet échange peut se produire entre plusieurs corps et aussi mettre en jeu des changements d'états. Le calorimètre constitue un système thermodynamique isolé, ce qui implique qu'il n'y a pas d'échange de matière et d'énergie (travail ou chaleur) avec l'extérieur.

Le calorimètre participe aux échanges de chaleur avec les corps qu'il contient. Il est caractérisé par sa *capacité calorifique* μ (exprimée en J/K) : c'est la chaleur échangée par le calorimètre si sa température varie de 1K (de 1°C).

Si la température du calorimètre varie de ΔT, la chaleur qu'il reçoit/qu'il fournit vaut :

$$Q = \mu \cdot \Delta T$$

3.7 Calorimétrie et mélanges

<u>Exemple : Détermination de la capacité thermique massique d'un corps inconnu</u>

Dans un calorimètre de capacité thermique μ, on introduit une masse m_1 d'un liquide de capacité calorifique massique c_1, ayant une température initiale θ_1 (après quelque temps, la température initiale du calorimètre est donc aussi égale à θ_1). On ajoute un corps de masse m_2, ayant une température initiale $\theta_2 > \theta_1$. Sa capacité calorifique massique c_2 est inconnue.

Après peu de temps, la température d'équilibre du mélange (calorimètre + liquide + corps inconnu) mesurée vaut θ_E.

— chaleur *reçue* par le calorimètre :

$$Q_0 = \mu \cdot \Delta T_0 = \mu \cdot (\theta_E - \theta_1)$$

— chaleur *reçue* par le liquide :

$$Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot \Delta T_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_E - \theta_1)$$

— chaleur *cédée* par le corps inconnu :

$$Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot \Delta T_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_E - \theta_2)$$

Comme les parois du calorimètre sont adiabatiques, aucune chaleur n'est échangée avec l'extérieur et on a donc l'*équation thermique* suivante :

$$\begin{aligned}
& Q_0 + Q_1 + Q_2 = 0 \\
\Leftrightarrow \quad & \mu \cdot (\theta_E - \theta_1) + m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_E - \theta_1) + m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_E - \theta_2) = 0 \\
\Leftrightarrow \quad & m_2 \cdot c_2 \cdot (\theta_E - \theta_2) = -\mu \cdot (\theta_E - \theta_1) - m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_E - \theta_1) \\
\Leftrightarrow \quad & c_2 = \frac{-\mu \cdot (\theta_E - \theta_1) - m_1 \cdot c_1 \cdot (\theta_E - \theta_1)}{m_2 \cdot (\theta_E - \theta_2)}
\end{aligned}$$

Chapitre III

Electricité

1 Rappels

1.1 Intensité du courant électrique

Lorsque le nombre de porteurs de charge (d'électrons) qui traversent une section (Querschnitt) d'un conducteur en une seconde est élevé, on dit que le courant est **intense**. En revanche, lorsque pendant le même temps, moins de porteurs de charge circulent à travers cette section, le courant est plus faible.

Plus la **charge électrique** (et donc le nombre d'électrons) transportée **par seconde** à travers **une section donnée** d'un conducteur est *grande*, plus le courant est dit *intense*.

1.1.1 Charge électrique

La *charge électrique* (elektrische Ladung) est une notion abstraite, comparable à celle de masse, qui permet d'expliquer certains comportements. C'est une *grandeur physique*.

Le symbole utilisé pour la charge électrique est Q.
L'unité SI de la charge électrique est le *Coulomb* [1].

La *charge élémentaire* **e** a la valeur $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$.
La *charge d'un électron* vaut $Q_{e^-} = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$.

1.1.2 Définition de l'intensité du courant électrique

L'intensité du courant est la charge transportée par seconde à travers une section d'un conducteur.

Symbole de l'intensité du courant : I
Unité SI de l'intensité du courant : A (Ampère) [2]

Formule pour calculer l'intensité du courant, connaissant la charge Q qui traverse une section du conducteur pendant un intervalle de temps Δt :

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

Comme l'unité SI de la charge est le Coulomb (C), celle du temps la seconde (s), on a :

$$1A = 1\frac{C}{s}$$

Lorsqu'une charge de 1C traverse donc une section donnée d'un conducteur en 1s, on a un courant de 1A.

1. nom de l'unité en honneur de Charles Augustin Coulomb (1736-1806), officier, ingénieur et physicien français
2. nom de l'unité en honneur de Andrée Marie Ampère (1775-1836), mathématicien et physicien français

Comme la charge de 1 électron vaut $Q_{e^-} = 1,6 \cdot 10^{-19}C$, un courant de 1A correspond donc au passage de $\frac{1C}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \frac{C}{e^-}} = 6,25 \cdot 10^{18}$ électrons par seconde!!!

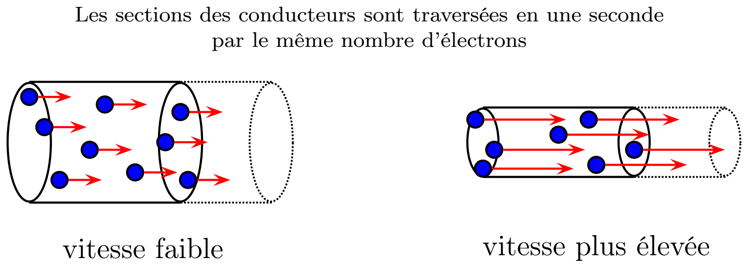


FIGURE III.1 – Electrons qui traversent une section de conducteurs

1.1.3 Mesure de l'intensité du courant

Pour mesurer l'intensité du courant électrique, on utilise un **ampèremètre** (Strommessgerät).

L'ampèremètre est toujours branché **en série** dans la partie du circuit de laquelle on veut connaître l'intensité du courant.
Il doit être branché tel que le courant entre par sa prise marquée **A,+** (ou mA) et qu'il sorte par la prise **COM,-**.

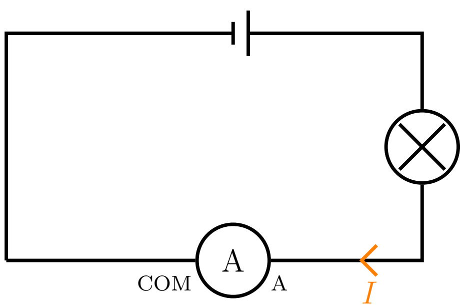


FIGURE III.2 – Ampèremètre branché correctement

Avant de mesurer une intensité de courant, il faut se rassurer d'avoir adapté l'ampèremètre à la **nature du courant (DC/AC)** :

- DC (-) : courant continu - un courant qui a toujours même sens
- AC (∼) : courant alternatif - un courant dont le sens alterne plusieurs fois par seconde

Les sources de courant utilisés au laboratoire sont généralement des sources de courant continu (piles, accumulateurs, ...). Le courant du réseau domestique est un courant alternatif (de fréquence 50 Hz (Hertz), ce qui veut dire que le courant change de sens, 50 fois par seconde).

Finalement, il faut choisir un **calibre de mesure** supérieur à l'intensité maximale que l'on veut mesurer. Si on mesure un courant dont on ne connaît pas l'intensité approximative, on commence par le calibre le plus grand, ensuite on descend, si c'est possible, vers les calibres inférieurs (ce qui permet une meilleure précision de mesure).

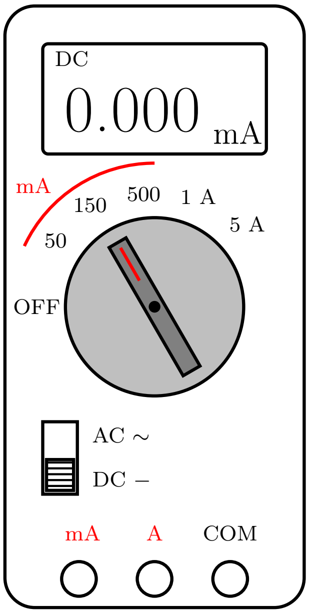


FIGURE III.3 – Un ampèremètre numérique

Exemple :

A l'aide de l'ampèremètre de la figure III.3, on veut connaître l'intensité d'un courant dont on sait que la valeur approximative se situe autour de 160mA. On commence donc la mesure avec le calibre de 500mA. Si on constate ensuite que le courant est inférieur à 150mA, on peut passer au calibre de 150mA et ainsi de suite.

Comme le courant du circuit traverse entièrement l'instrument de mesure, un calibre trop petit mène instantanément vers la destruction du *fusible* interne qui protège l'ampèremètre.

2 Tension électrique

2.1 Analogie avec le circuit d'eau

Dans un **circuit d'eau**, il faut une pompe pour mettre les molécules d'eau en mouvement. En effet, il faut que la pompe fournisse à chaque molécule d'eau une certaine quantité d'énergie pour qu'elle puisse traverser le circuit. Lorsqu'une molécule traverse le moteur hydraulique, son énergie est transférée de la molécule à la roue (en effet, la roue a besoin, elle-aussi, d'énergie, sinon elle ne pourra pas tourner).

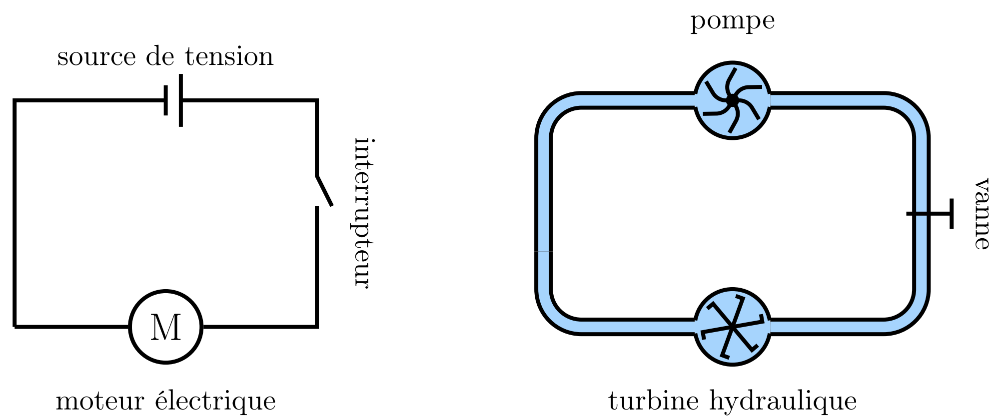


FIGURE III.4 – Circuit électrique / Circuit d'eau

De la même façon, un électron a besoin d'énergie pour qu'il puisse circuler à travers un **circuit électrique**. Chaque quantité de charge a donc besoin d'une certaine quantité d'énergie qu'elle reçoit dans le générateur et qu'elle cède, lors de son passage, au récepteur (un moteur électrique p.ex.). La *quantité d'énergie* qui est *reçue par unité de charge dans une source électrique* resp. *cédée par unité de charge dans un récepteur d'électricité* s'appelle **tension électrique**.

2.2 Définition de la tension électrique

La **tension d'un générateur** est l'énergie transmise du générateur à une charge de 1 Coulomb lorsque cette charge traverse le générateur.
La **tension d'un récepteur** est l'énergie transmise d'une charge de 1 Coulomb au récepteur lorsque cette charge traverse le récepteur.

Symbole de l'énergie électrique : $E_{él}$
Unité SI de l'énergie (électrique) : J (Joule)

Symbole de la charge électrique : Q
Unité SI de la charge électrique : C

Symbole de la tension électrique : U

Formule :

$$U = \frac{E_{él}}{Q}$$

L'**unité SI de la tension électrique** est le $Volt$ (V) [3] :

$$1V = 1\frac{J}{C}$$

Si une charge de 1 Coulomb traverse donc un générateur et qu'elle reçoit de celui-ci une énergie de 1 Joule, on dit que la tension du générateur vaut 1 Volt.

Autrement dit : si une charge de 1 C traverse un générateur dont la tension est réglée à 1 Volt, la charge reçoit du générateur une énergie de 1 Joule. Si la charge de 1 C traverse un récepteur auquel il cède une énergie de 1 Joule, la tension aux bornes de ce récepteur vaut 1 V.

2.3 Mesure de la tension électrique

La tension électrique aux bornes d'un appareil (générateur ou récepteur) est mesurée par un **voltmètre** (Spannungsmessgerät).

Le voltmètre est toujours branché **parallèlement** à la composante aux bornes de laquelle on veut mesurer la tension (on mesure en fait la différence de l'énergie électrique que possède une charge de 1 C après et avant de traverser une composante) :

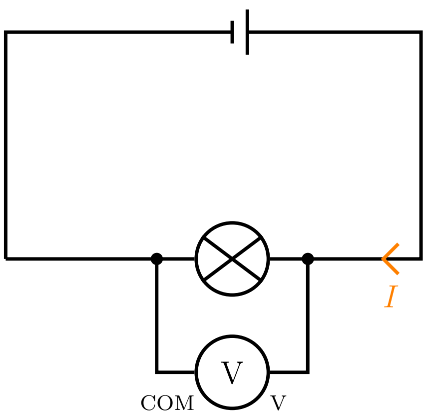


Figure III.5 – Un voltmètre branché correctement

La prise **V,+** est branché du côté par lequel le courant arrive. La prise **COM, -** est le pôle négatif de l'instrument de mesure.

3. nom de l'unité en honneur de Alessandro Volta (1745-1827), physicien italien

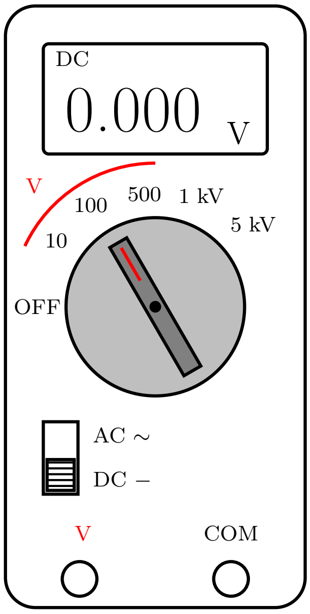


Figure III.6 – Un voltmètre numérique

Les choix du calibre et de la nature du courant se font de la même façon que pour l'ampèremètre (v. 1.1.3 p. 92).

3 L'énergie électrique

La tension, par définition, est l'énergie échangée entre une charge de 1 C et le générateur/le récepteur qu'elle traverse (cf. p.94) :

$$U = \frac{E_{él.}}{Q}$$

Ainsi :

$$E_{él.} = U \cdot Q \quad (1)$$

L'intensité du courant est définie par (cf. p. 91) :

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

Ainsi :

$$Q = I \cdot \Delta t \quad (2)$$

En combinant les équations (1) et (2), on obtient :

$$\boxed{E_{él.} = U \cdot I \cdot \Delta t}$$

L'unité SI de la tension est le Volt ($1V = 1\frac{J}{s}$), celle de l'intensité est l'Ampère ($1A = 1\frac{C}{s}$) et celle du temps la seconde. Ainsi :

$$[E_{él.}] = \frac{J}{C} \cdot \frac{C}{s} \cdot s = J$$

L'unité de l'énergie électrique est donc la même que celle de toute autre forme d'énergie, le Joule.

Exemple numérique :
La tension eaux bornes d'un fer à repasser est égale à 230 V. L'intensité du courant qui le traverse est égale à 5 A. Si le fer à repasser est utilisé pendant une demi-heure, l'énergie électrique qu'il consomme est égale à :

$$E_{él.} = U \cdot I \cdot \Delta t = 230 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} \cdot 1800\text{s} = 230 \, \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot 5 \, \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot 1800 \text{ s} = 2.070.000 \text{ J} = 2,07 \text{ MJ}.$$

4 La puissance électrique

4.1 Définition de la puissance électrique

La puissance électrique d'un générateur / d'un récepteur est l'**énergie électrique** échangée entre les charges électriques et le générateur / le récepteur **par unité de temps**.

Symbole de la puissance électrique : $\mathcal{P}_{él.}$

Formule :

$$\mathcal{P}_{él.} = \frac{E_{él.}}{\Delta t}$$

L'unité SI de la puissance électrique est le **Watt (W)** [4].

Comme l'unité SI de l'énergie électrique est le Joule (J), celle du temps la seconde (s), on a :

$$1W = 1\frac{J}{s}$$

Si les électrons reçoivent de la part du générateur une énergie de 1 Joule en 1 seconde, la puissance électrique fournie par le générateur vaut donc 1 Watt.

Comme (cf. p. 97) :

$$E_{él.} = U \cdot I \cdot \Delta t$$

on obtient :

$$P_{él.} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{\Delta t} = U \cdot I$$

Si on connaît la tension U aux bornes d'une composante électrique ainsi que l'intensité I du courant qui la traverse, on peut donc facilement calculer la puissance électrique $\mathcal{P}_{él.}$ par la formule :

$$\boxed{\mathcal{P}_{él.} = U \cdot I}$$

Exemple :

La tension aux bornes d'une ampoule électrique vaut $U = 5V$. Le courant qui la traverse a une intensité égale à $I = 1,3A$. La puissance électrique reçue par l'ampoule vaut alors : $\mathcal{P}_{él.} = U \cdot I = 5V \cdot 1,3A = 6,5W$.

Remarque :

4. nom de l'unité en honneur de James Watt (1736-1819), ingénieur écossais

On utilise aussi les multiples et sous-multiples de l'unité SI de la puissance :

$1kW = 10^3W = 1000W$ $1MW = 10^6W = 1.000.000W$ ...

calculatrice de poche	0,4 mW
phare de bicyclette	2,4 W
congélateur	150 W
fer à repasser	1 kW
téléviseur en couleurs	80 W
cuisinière électrique	6 kW
locomotive électrique	3 MW
pile solaire ; $1cm^2$	5 mW
monocellule	2 W
dynamo de bicyclette	3 W
générateur de centrale électrique	300 MW

TABLE III.1 – Puissances électriques de quelques récepteurs/générateurs

4.2 Le kWh : une autre unité pour l'énergie électrique

Comme

$$\mathcal{P}_{él.} = \frac{E_{él.}}{t}$$

on peut calculer l'énergie électrique $E_{él}$ à partir de la puissance $\mathcal{P}_{él.}$ et du temps t :

$$E_{él.} = \mathcal{P}_{él.} \cdot t$$

> L'énergie électrique est proportionnelle à la puissance électrique et au temps.

Si la puissance $\mathcal{P}_{él.} = 1kW$ et le temps vaut $t = 1h$ (1 heure) on a :

$$E_{él} = 1kW \cdot 1h = 1kWh$$

Le kWh (prononcé 'Kilo Watt heure') est une unité alternative de l'énergie électrique, utilisée couramment (factures d'électricité[5], ...).

Comme $1kW = 1000W = 1000\frac{J}{s}$ et $1h = 60min = 3600s$, on a :

$$1kWh = 1000\frac{J}{s} \cdot 3600s = 3.600.000J$$

Pour des quantités d'énergies élevées, le kWh est donc une unité beaucoup plus maniable que le J.

Exemple :
Une machine à laver a une puissance électrique de $\mathcal{P}_{él.}$=8500W. Si elle tourne pendant 90 minutes, l'énergie électrique consommée vaut :

$$E_{él} = \mathcal{P}_{él.} \cdot t = 8,5kW \cdot 1,5h = 12,75kWh$$

5. sur les factures d'électricité, on indique le tarif par kWh. Finalement, on paye l'énergie électrique totale consommée.

5 La résistance électrique

5.1 La nature de la résistance électrique

Expérience :

Appliquons une tension U à un *fil de cuivre* de longueur et de diamètre connus et mesurons l'intensité du courant I.
Ensuite, appliquons la *même tension* U un *fil de fer* de *mêmes dimensions*.

On constate qu'à même tension, l'intensité du courant est bien supérieure dans le fil de cuivre que dans le fil de fer.

Conclusion :
Le fil de fer conduit moins bien le courant électrique que le fil de cuivre.

Explication :

Dans un métal (comme dans tout autre solide), les atomes sont disposés régulièrement et ne peuvent quitter leur place fixe. Ces atomes perdent facilement un ou deux de leurs électrons périphériques ; de cette façon, ils se transforment en *ions chargés positivement*. Chaque ion continue à occuper la même place que l'atome dont il provient. Au contraire, les *électrons* libérés peuvent se déplacer dans le métal.

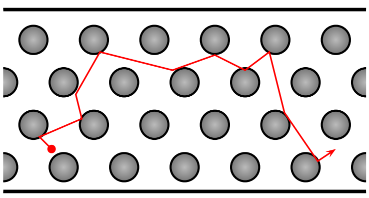


FIGURE III.7 – Trajet d'un électron dans un fil métallique sous tension

Lorsqu'on applique une *tension* aux bornes du fil métallique, ces *électrons libres* se mettent en mouvement, mais **ils se heurtent continuellement contre les ions** qui se trouvent sur leur chemin. Lors de chaque choc, l'électron est **freiné**, mais les autres électrons qui suivent le font récupérer sa vitesse perdue.

Lors d'un choc, l'électron cède une partie de son énergie à l'ion heurté. Il en résulte une plus forte *agitation de l'ion* autour de sa position d'équilibre, ce qui se manifeste par une *élévation de la température* du métal. Ceci explique **l'effet calorifique** du courant électrique.

La résistance électrique est la propriété des conducteurs électriques de s'opposer au passage des électrons.

La résistance électrique dépend de la nature et des dimensions du conducteur. La résistance d'un conducteur de matériau donné est d'autant plus élevée que la longueur du conducteur est élevée et que son diamètre est petit.

5.2 Variation de la résistance avec la température

Si la température d'un conducteur *augmente*, ses ions vont s'agiter plus fortement. La conséquence en est que les électrons passent encore moins bien à travers le conducteur : la résistance *augmente*.

Ceci est valable pour la plupart des conducteurs solides (cuivre, fer, ...). Cependant, il existe un certain nombre d'alliages pour lesquels la résistance est constante (dans un intervalle de température assez grand). Le **Constantan (CuNi)**, ainsi que le **Chrom-Nickel (CrNi)** sont des exemples de tels alliages.

5.3 La résistance électrique : une grandeur physique

Définition :

> La résistance électrique d'un conducteur est le quotient de la tension appliquée à ses bornes par l'intensité du courant qui le traverse.

Symbole de la résistance électrique : R

Formule :

$$R = \frac{U}{I}$$

Unité SI de la résistance : Ω (Ohm)

Comme l'unité SI de la tension est le Volt (V), celle de l'intensité du courant l'Ampère (A), on a :

$$1\Omega = 1\frac{V}{A}$$

Si un courant de 1 Ampère circule à travers un conducteur lorsqu'on applique une tension de 1 Volt à ses bornes, la résistance de ce conducteur vaut 1Ω.

Pour une tension donnée, la résistance est d'autant plus élevée que l'intensité du courant est faible.

5.4 Résistivité

A une température donnée, la résistance R d'un conducteur (un fil p.ex.) est :

— inversement proportionnelle à l'air S de la section du conducteur (si l'aire de la section est grande, les électrons peuvent plus facilement passer à travers les obstacles formés par les noyaux atomiques)

— proportionnelle à la longueur l du conducteur (si le conducteur est plus long, les électrons rencontreront plus d'obstacles sur leur chemin)

En résumé :

$$\begin{aligned} R &\sim l \\ R &\sim \frac{1}{S} \end{aligned}$$

On a donc que :

$$R \sim \frac{l}{S}$$

ou encore :

$$\boxed{R = \rho \cdot \frac{l}{S}}$$

La constante de proportionnalité ρ est la *résistivité*. Elle est une *caractéristique du matériau* du conducteur.

En transformant l'équation précédente, on obtient $\rho = \frac{R \cdot S}{l}$. Comme l'unité SI de la résistance est Ω, celle de la section le m^2 et celle d'une longueur le m, on trouve pour l'unité SI de la résistivité :

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{m}} = \Omega \cdot \mathrm{m}$$

Comme les sections des fils sont le plus souvent exprimées en mm^2, une *unité courante* de la résistivité est $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$. Comme 1 mm^2=10^{-6} m^2 :

$$1 \ \frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}} = 10^{-6} \ \frac{\Omega \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{m}} = 10^{-6} \ \Omega \cdot \mathrm{m}$$

substance	$\rho \left(\frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}\right)$
argent	$15 \cdot 10^{-3}$
cuivre	$17 \cdot 10^{-3}$
or	$22 \cdot 10^{-3}$
aluminium	$26 \cdot 10^{-3}$
fer	$104 \cdot 10^{-3}$
constantan	$500 \cdot 10^{-3}$

TABLE III.2 – Résistivité de quelques matériaux courants à 27°C

Exemple :
Calculons la résistance d'un fil de cuivre de section $2,5$ mm^2 et d'une longueur de 80 m :

$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 17 \cdot 10^{-3} \ \frac{\Omega \cdot \mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}} \cdot \frac{80 \ \mathrm{m}}{2{,}5 \ \mathrm{mm}^2}$=$0,544 \ \Omega$.

5.5 Applications pratiques

5.5.1 Résistance de fils conducteurs

Pour éviter une perte importante d'énergie électrique (en chaleur) dans les fils conducteurs, on a intérêt à choisir des conducteurs à faible résistance électrique.

Si on veut cependant utiliser l'effet électrique du courant (dans les chauffages électriques, les sèche-cheveux, ...), il faut utiliser des fils à résistance élevée.

5.5.2 Résistances techniques

Dans les circuits électriques et électroniques, il faut parfois **limiter l'intensité du courant** afin d'éviter l'endommagement de certaines composantes. On utilise à ces fins des **«résistances techniques**[6]» : ce sont des composantes électriques/électroniques dont la résistance a une valeur bien déterminée. Usuellement, elles sont de forme cylindrique et sont constituées d'un support en porcelaine, autour duquel on a enroulé une couche hélicoïdale en carbone. L'ensemble est recouvert d'une couche de vernis protecteur.

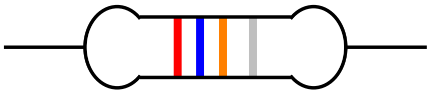


FIGURE III.8 – Une résistance technique

Code de couleurs :

0	noir	±5%	or
1	marron	±10%	argent
2	rouge		
3	orange		
4	jaune		
5	vert		
6	bleu		
7	violet		
8	gris		
9	blanc		

TABLE III.3 – Code couleurs

On peut voir sur une résistance des *anneaux de couleur*. Chaque couleur correspond à un chiffre (v. tableau III.3). La correspondance entre les chiffres et les couleurs des anneaux constitue ce qu'on appelle le **code des couleurs** et permet de déterminer la valeur en Ohm d'une résistance. Pour lire cette valeur, il faut d'abord placer la résistance dans le bon sens. En général, la résistance a un anneau doré ou argenté, qu'il faut placer à droite. Dans d'autres cas, c'est l'anneau le plus large qu'il faut placer à droite.

Les deux premiers anneaux sont les chiffres significatifs et le troisième est le multiplicateur (la puissance de 10 avec laquelle il faut multiplier les chiffres significatifs). Le 4$^{\text{ème}}$ anneau correspond à la tolérance.

$$\text{Valeur de la résistance} = [\text{chiffre } 1^{\text{er}} \text{ anneau}][\text{chiffre } 2^{\text{ème}} \text{ anneau}] \cdot 10^{[\text{chiffre } 3^{\text{ème}} \text{ anneau}]}$$

6. Couramment, on appelle les résistances techniques simplement 'résistances', bien qu'il y ait une différence entre une résistance technique et la grandeur physique 'résistance'

Exemple :

La résistance de la figure III.8 est caractérisée par les anneaux

rouge bleu orange argent

$$\text{On a donc : } R = 26 \cdot 10^3\ \Omega \pm 10\%$$

$$R = 26\ k\Omega = 26.000\ \Omega$$

Symbole d'une résistance :
Dans les circuits électriques, on représente une résistance par son symbole normalisé :

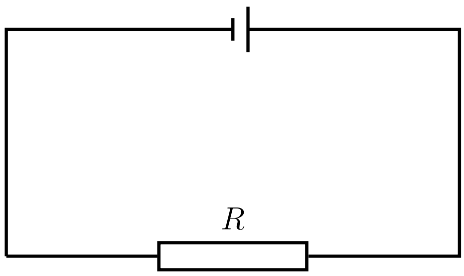


FIGURE III.9 – résistance dans un circuit électrique

5.6 La loi d'Ohm

5.6.1 Expérience

Appliquons différentes tensions aux bornes d'un **fil de constantan**. Pour chaque tension U, mesurons l'intensité I du courant électrique qui traverse le fil.

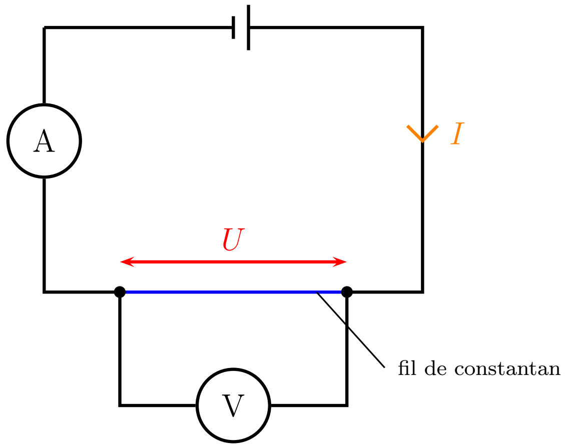


FIGURE III.10 – Circuit électrique

$U(V)$	$I(A)$	$\frac{U}{I}\ (\frac{V}{A})$

TABLE III.4 – Tableau de mesure

<u>On constate</u> *(aux erreurs expérimentales près)* :

— si la tension U est doublée, l'intensité du courant I est doublée.

— si la tension U est triplée, l'intensité du courant I est triplée.

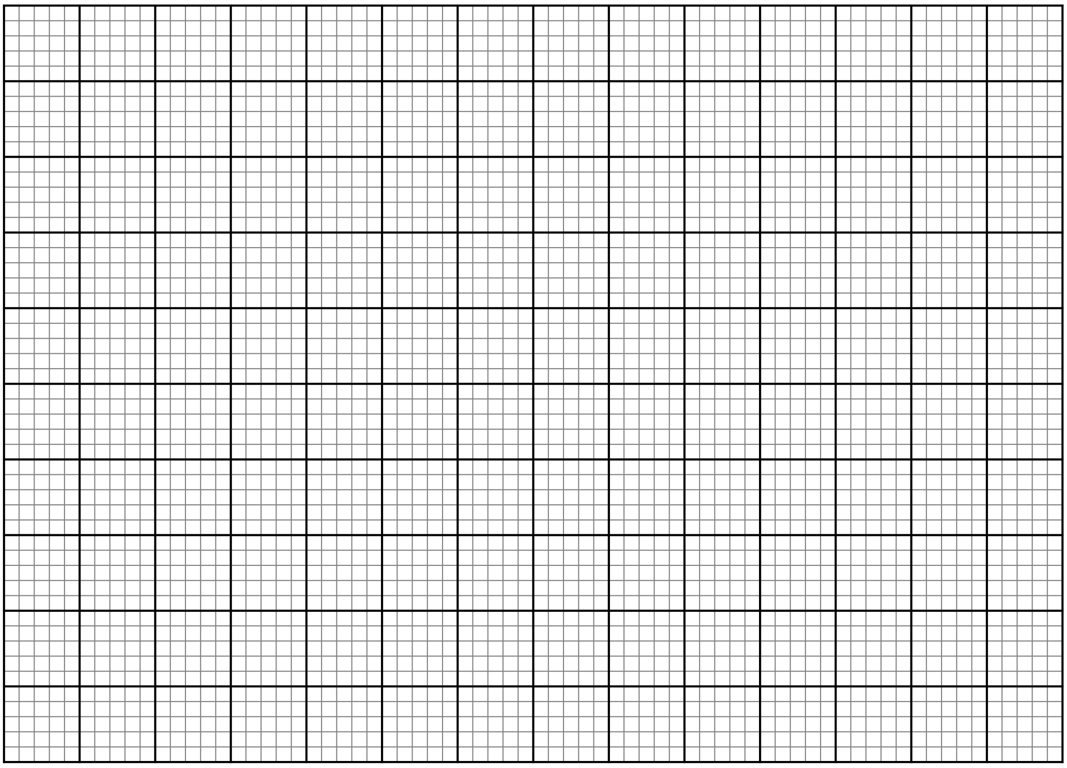
— si la tension U est multipliée par n , l'intensité du courant I est multipliée par n.

<u>Conclusion :</u>

L'intensité I du courant qui traverse le fil de constantan est **proportionnelle** à la tension U appliquée à ses bornes.

Calcul du rapport des couples de valeurs :

Pour chaque couple de valeurs, calculons le rapport $\frac{U}{I}$:
On constate qu'aux erreurs expérimentales près, ce rapport est une constante. Ceci confirme le fait que l'intensité I est proportionnelle à la tension U.
Représentation graphique :
Représentons les points de mesure sur un graphique (U en fonction du I) :



Aux erreurs expérimentales près, on constate que les points se trouvent sur une **droite passant par l'origine**.

Ajoutons cette droite au graphique et calculons sa **pente** :

Coordonnées de 2 points se trouvant sur la droite :

A(,) B(,)

$$\text{pente} = \frac{\mathrm{U_B} - \mathrm{U_A}}{\mathrm{I_B} - \mathrm{I_A}} =$$

Conclusion :

Comme la pente est le rapport entre la variation de la tension par la variation de l'intensité, la valeur de la pente correspond à la **résistance** R du fil de constantan (cette valeur correspond à peu près à la valeur moyenne du rapport calculé dans le tableau III.4.

Le fil de constantan de l'expérience a donc une résistance de :

$$R =$$

Remarque :

Si on répète l'expérience avec (p.ex.) un fil de fer, on constate que celui-ci n'obéit pas à la loi d'Ohm. En fait, lorsqu'on augmente la tension aux bornes d'un fil de fer, l'intensité du courant va aussi augmenter. Mais cette augmentation de l'intensité du courant entraîne en même temps une **augmentation de la température** du fil. Or plus la température augmente, plus **la résistance du fil augmente** aussi. La conséquence en est que l'intensité du courant n'est **pas proportionnelle** à la tension appliquée.

Pour qu'un fil de fer obéisse à la loi d'Ohm, il faudrait le maintenir à température constante (par exemple en le refroidissant dans un bain d'eau).

5.6.2 Enoncé de la loi d'Ohm

Quand l'intensité du courant à travers un conducteur est proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes, on dit que le conducteur obéit à la loi d'Ohm.

La loi d'Ohm est valable pour des fils conducteurs maintenus à température constante[7]. Elle est aussi valable (indépendamment de la température) pour les résistances techniques ainsi que pour les fils faits de certains alliages (Constantan, CrNi, ...).

7. Souvent, le courant dans un fil métallique est tellement faible que le dégagement de chaleur y est négligeable : la loi d'Ohm est alors vérifiée

6 Lois des circuits

6.1 Circuit série

Considérons le circuit suivant, où deux résistances sont branchées en série à un générateur de courant :

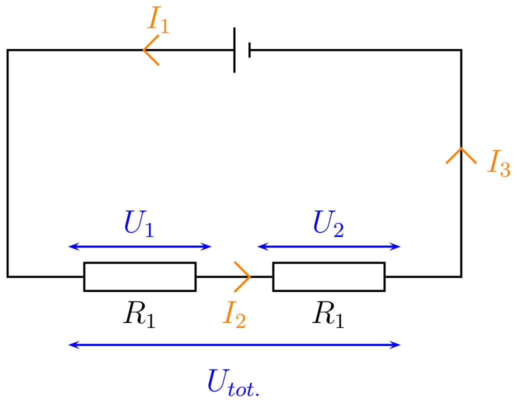


FIGURE III.11 – deux résistances en série

6.1.1 Intensité du courant

La charge qui traverse une section du circuit par seconde est la même en tout point du circuit. L'intensité du courant dans un circuit série est donc la même à travers toutes les composantes du circuit :

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

6.1.2 Tension

Si une charge de 1 C traverse la première résistance, elle cède une énergie correspondant à la tension U_1 à la résistance R_1. Si cette charge traverse ensuite R_2, elle perd une énergie correspondant à U_2. L'énergie totale cédée par la charge de 1 C aux deux résistances est donc la somme des deux énergies échangées.

La tension totale aux bornes de deux composantes, branchées en série, est égale à la somme des tensions de chacune des composantes :

$$U_{tot.} = U_1 + U_2$$

6.1.3 Résistance

On se propose de remplacer deux résistances R_1 et R_2 en série par une seule résistance $R_{tot.}$, sans que l'intensité du courant électrique dans le circuit ne change :

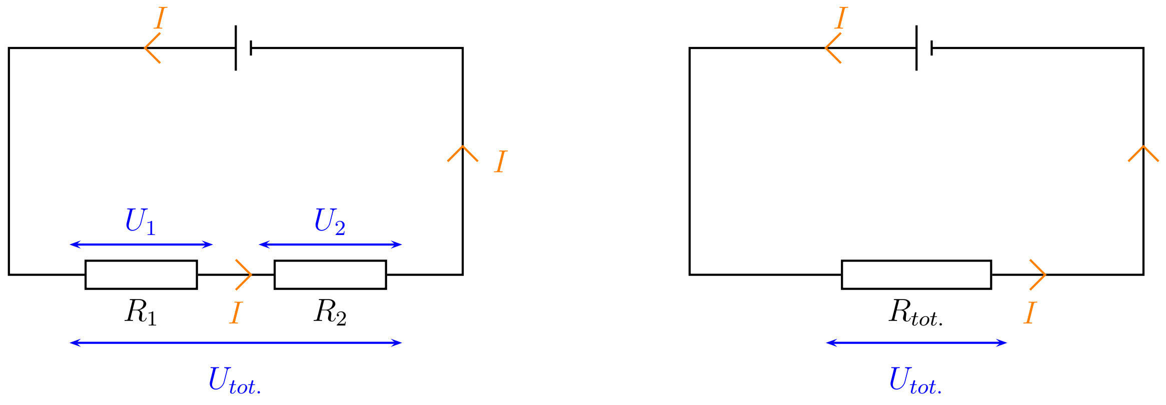


FIGURE III.12 – remplacer 2 résistances en série par une seule résistance

Pour la première résistance, la loi d'Ohm s'écrit :

$$U_1 = R_1 \cdot I \ (1)$$

Pour la deuxième résistance, la loi d'Ohm s'écrit :

$$U_2 = R_2 \cdot I \ (2)$$

Pour la résistance totale, la loi d'Ohm s'écrit :

$$U_{tot.} = R_{tot.} \cdot I \ (3)$$

Comme les tensions aux bornes des deux résistances s'additionnent, on a :

$$U_{tot.} = U_1 + U_2 \ (*)$$

En remplaçant (1), (2) et (3) dans (*) :

$$R_{tot.} \cdot I = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I$$

après simplification par I, on obtient finalement :

$$\boxed{R_{tot.} = R_1 + R_2}$$

La valeur totale de deux résistances branchées en série est égale à la somme des deux résistances individuelles.

6.2 Circuit parallèle

Considérons le circuit suivant, où deux résistances sont branchées en parallèle à un générateur de courant :

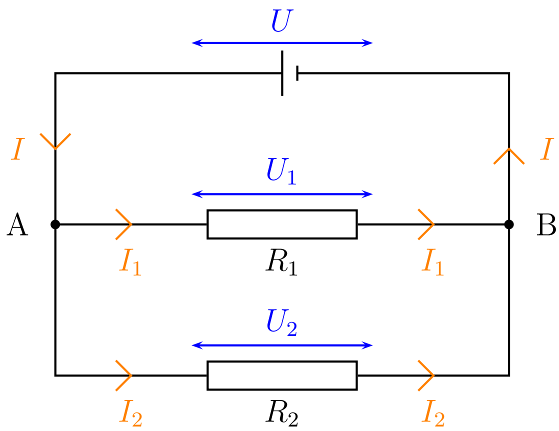


FIGURE III.13 – deux résistances branchées en parallèle

6.2.1 Intensité du courant

Au nœud A, le courant I se divise en un courant I_1 qui traverse la branche renfermant R_1 et un courant I_2 qui traverse la branche renfermant R_2. Au nœud B, les deux courants se rejoignent. On a donc :

$$I = I_1 + I_2$$

6.2.2 Tension

Toutes les charges qui se trouvent du côté gauche du circuit ont la même énergie. Il en est de même pour toutes les charges qui se trouvent du côté droit du circuit. Si une charge de 1 C passe donc de la gauche vers la droite, la différence d'énergie (et donc la tension) est la même, peu importe la branche du circuit traversée :

$$U = U_1 = U_2$$

6.2.3 Résistance

On se propose de remplacer deux résistances R_1 et R_2 en parallèle par une seule résistance $R_{tot.}$, sans que l'intensité du courant électrique dans le circuit ne change :

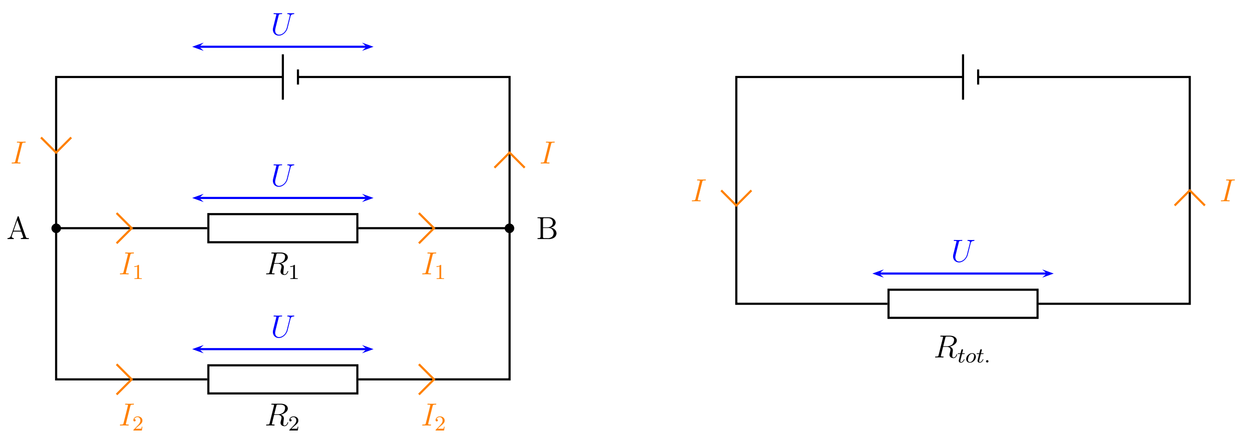


FIGURE III.14 – remplacer deux résistances en parallèle par une seule résistance

En utilisant la loi d'Ohm, nous obtenons :

— pour la première résistance :

$$\begin{aligned} & U = R_1 \cdot I_1 \\ \Leftrightarrow \quad & I_1 = \tfrac{U}{R_1}\ (1) \end{aligned}$$

— pour la deuxième résistance :

$$\begin{aligned} & U = R_2 \cdot I_2 \\ \Leftrightarrow \quad & I_2 = \tfrac{U}{R_2}\ (2) \end{aligned}$$

— pour la résistance totale :

$$\begin{aligned} & U = R_{tot.} \cdot I \\ \Leftrightarrow \quad & I = \tfrac{U}{R_{tot.}}\ (3) \end{aligned}$$

Comme les intensités du courant s'additionnent :

$$I = I_1 + I_2 (*)$$

En remplaçant (1), (2) et (3) dans (*), on obitent :

$$\frac{U}{R_{tot.}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

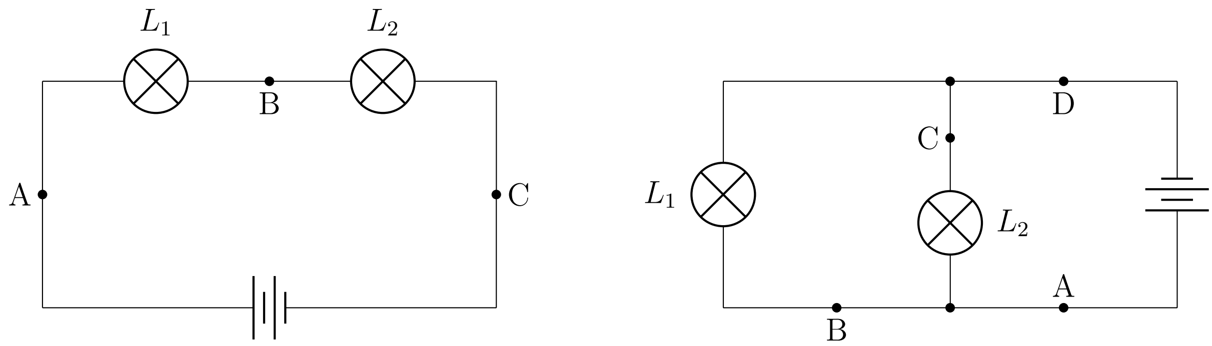
Après simplification par U, nous avons finalement :

$$\boxed{\frac{1}{R_{tot.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Sui deux résistances sont branchées en parallèle, alors l'inverse de la résistance totale est égal à la somme des inverses des résistances individuelles.

7 Exercices

1. A quels endroits marqués des circuits suivants peut-on insérer l'interrupteur pour allumer ou éteindre les deux lampes simultanément ? Justifie ta réponse.



2. La sonnette d'un appartement est commandée par deux interrupteurs poussoirs : l'un fixé près de la porte de la maison, l'autre fixé près de la porte d'appartement. Fais un schéma de montage et explique le fonctionnement du circuit.

3. Une machine à laver ne doit fonctionner que si la porte d'accès au tambour est fermée et si l'interrupteur de mise en marche est sur la position 1. Fais un schéma du montage.

4. Quels sont les effets du courant électrique utilisés dans a) une machine à laver b) un sèche-cheveux c) un fer à repasser d) un ventilateur e) l'électrolyse de l'eau

5. Quelle est la raison pour laquelle une ampoule traditionnelle consomme beaucoup plus d'énergie électrique (pendant une durée déterminée) qu'une lampe électroluminescente, même si les lampes deux auraient la même luminosité ?

6. Cherche de trouver sur internet le principe de fonctionnement d'un haut-parleur. Fais un schéma représentant les principales composantes.

7. On dispose d'une plaque métallique initialement neutre. On la touche brièvement avec un bâton de verre frotté avec du drap. Explique ce qui se passe avec les charges du métal et du bâton. Faire une figure représentant la répartition des charges au début, puis à la fin. Quelle sera la charge finale de la plaque ?

8. Qu'est-ce qui se passe lorsqu'on approche l'un de l'autre : a) un électron et un proton b) un électron et un neutron c) un électron et un autre électron

9. On charge un électroscope (initialement neutre) en touchant son plateau avec une sphère chargée négativement. Faire un schéma de l'électroscope sur lequel on représente la répartition des charges positives / négatives : a) à l'instant initial b) lorsque la sphère est en contact avec le plateau c) lorsque la sphère est de nouveau écartée.

10. Une charge de 590 mC traverse la section d'un circuit électrique en 2 secondes. Quelle est l'intensité du courant ?

11. Un courant a une intensité de 870 mA. Quelle est alors la charge qui traverse la section d'un circuit : a) par seconde b) en une minute ?

12. On veut construire un circuit électrique dans lequel un moteur et une ampoule électriques sont branchés en parallèle à une pile. Faire le schéma du circuit électrique. Où doit-on placer un ampèremètre qui mesure l'intensité du courant : a) à travers le moteur b) à travers la lampe c) à travers la pile ?

13. Un accumulateur a une capacité de 2600mAh. a) Quel est le temps maximal nécessaire pour le recharger complètement avec un courant d'intensité 0,35 A ? b) Quelle est la valeur de la capacité en Coulomb ?

14. Lorsqu'un électroaimant est parcouru par une charge de 9 Coulomb, il reçoit de la part des charges une énergie de 108 J. Quelle est la tension aux bornes de l'électroaimant ?

15. Complète le tableau suivant :

U(V)	I(A)	P(W)
3,6	1,8	
108		6580
	0,5	1,3

16. Une ampoule a une puissance de 5W, lorsqu'elle est alimentée par une pile de 6V. a) Calculer l'intensité du courant b) Pendant quelle durée l'ampoule va-t-elle briller si la pile a une capacité de 4500mAh ?

17. Un moteur a une puissance électrique de 1,5 kW. L'intensité du courant qui le traverse est alors égale à 6,8 A. Quelle est la tension aux bornes du moteur ?

18. Pendant une soirée (de 19h à 23h30), on a allumé 3 ampoules de 60W, 2 ampoules de 45W, et un moteur électrique de 380 W. Quelle sera le coût total de l'électricité consommée ? Tarif : 15 ct/kWh

19. La tension aux bornes d'une machine à laver vaut 380 V. L'intensité du courant qui la traverse vaut 35 A. Quelle est l'énergie électrique consommée en 3 heures (en J et en kWh) ?

20. Le courant qui circule à travers une résistance technique vaut 480mA lorsqu'on applique une tension de 3V à ses bornes. a) Quelle est la valeur de sa résistance électrique b) Quelle est l'intensité du courant lorsque la tension vaut 7 V ?

21. Compléter le tableau suivant :

U(V)	I(mA)	R(Ω)
20	1800	
0,05		50
	0,5	130

22. Le filament d'une ampoule électrique a une résistance de 650 Ω. La tension à ses bornes vaut 230 V. a) Calculer la puissance électrique de l'ampoule. b) Quelle est la puissance dissipée sous forme de chaleur lorsque le rendement de l'ampoule vaut 20 % ?
23. Dans une expérience, on mesure l'intensité du courant I circulant à travers un fil de constantan pour différentes tensions U appliquées à ses bornes. Voici les résultats de la mesure :

U(V)	I(A)
0	0
1,0	0,79
1,5	1,25
2,0	1,70
3,0	2,35
4,0	3,30
6,0	4,60

Représenter les points de mesure sur un graphique 'U en fonction de I'. Ajouter la droite de régression, calculer sa pente et en déduire la valeur de la résistance du fil.

Table des figures

Liste des tableaux

