

Cours de Physique

Classes de 3e BC

Dan Neri

Version 2019-2020

Lycée Aline Mayrisch – Département de Physique

Document basé sur le cours de A. Dondelinger (LJBM) et A. Robinet (LRSL)

Retravaillé et mis en page par D. Neri et C. Schmitz (LAML) à l'aide de \LaTeX et KOMA-Script

Version du 17 septembre 2019

Table des matières

A. Mécanique	7
I. Forces	9
1. Rappels	9
1.1. Effets et caractéristiques d'une force	9
1.2. Représentation d'une force par un vecteur	9
1.3. Notation de la force \vec{F}	9
1.4. Mesure et unité d'une force	10
2. Force et déformation	11
3. Principe d'inertie (1 ^{er} principe de Newton)	12
4. Principe des actions réciproques (3 ^e principe de Newton)	13
5. Notion d'équilibre	14
6. Équilibre d'un corps soumis à deux forces	15
6.1. Étude expérimentale	15
6.2. Condition d'équilibre	15
6.3. Applications	16
7. Équilibre d'un corps soumis à trois forces	18
7.1. Étude expérimentale	18
7.2. Condition d'équilibre	19
7.3. Méthode de résolution d'un problème à trois forces	21
7.4. Projection d'un vecteur	21
7.5. Décomposition d'un vecteur suivant des directions quelconques	23
8. Exercices supplémentaires	24
II. Le moment d'une force	27
1. Le levier	27
2. Équilibre d'un levier	28
3. Définition du moment d'une force	29
3.1. Théorème des moments	31

4.	Méthode de résolution d'un problème à moments	32
5.	Exercices supplémentaires	32
III.	Machines simples	35
1.	Le fil	36
2.	Les poulies	36
2.1.	Poulie fixe	36
2.2.	Poulie mobile	38
2.3.	Palan	39
3.	Plan incliné	40
IV.	Travail et puissance d'une force	43
1.	Le travail au sens physique	43
2.	La règle d'or de la mécanique	43
3.	Définition du travail d'une force	44
3.1.	Force et déplacement de même direction	44
3.2.	Force et déplacement de directions différentes	45
4.	La puissance d'une force	47
5.	Définition de la puissance	48
6.	Exercices supplémentaires	49
V.	Énergie mécanique	51
1.	Différentes formes d'énergie	51
2.	Énergie cinétique	52
3.	Energies potentielles	52
3.1.	Énergie potentielle de pesanteur	53
3.2.	Énergie potentielle élastique	54
4.	Transferts et transformations d'énergie	54
4.1.	Transferts d'énergie	54
4.2.	Transformations d'énergie	55
5.	Conservation de l'énergie	55
6.	Exercices supplémentaires	56
B.	Électricité	57
VI.	Courant électrique et intensité du courant (Rappels de 4^e)	59
1.	Le courant électrique	59
1.1.	Généralités	59
1.2.	Sens conventionnel du courant électrique	60
2.	Intensité du courant électrique	61
2.1.	Intensité et section du conducteur	62
2.2.	Mesure de l'intensité du courant	63
2.3.	Analogie avec un circuit d'eau	64

3.	mAh / Ah : deux autres unités de la charge électrique	65
4.	Lois des intensités en série et en parallèle	66
4.1.	Le circuit en série	66
4.2.	Le circuit en parallèle	67
VII.	Tension et puissance électrique	69
1.	Transferts et transformations d'énergie dans un circuit électrique	69
2.	Tension électrique	69
2.1.	Notion de tension électrique	69
2.2.	Instrument de mesure	70
3.	Lois des tensions	71
3.1.	Circuit en série	71
3.2.	Circuit en parallèle	71
4.	Energie et puissance électrique	72
5.	Exercices supplémentaires	73
VIII.	Relation entre tension électrique et intensité du courant électrique	75
1.	La loi d'Ohm	75
1.1.	Expérience	75
2.	La résistance électrique	77
3.	Facteurs influençant la résistance	78
3.1.	Influence de la longueur	78
3.2.	Influence de la section	78
3.3.	Influence du matériau	79
3.4.	Résistivité	79
3.5.	Résistance et température	80
4.	Exercices supplémentaires	81
IX.	Lois générales des circuits électriques	83
1.	Le circuit en série	83
2.	Le circuit en parallèle	84
3.	Exercices supplémentaires	86
C.	Thermodynamique	89
X.	Température et modèle corpusculaire	91
1.	Agitation thermique	91
2.	Etats d'un corps (états d'agrégation)	92
3.	Le zéro absolu et les échelles de température	92
XI.	Energie interne	95
1.	Origine et définition de l'énergie interne	95
2.	Relation entre énergie interne et température	95

3.	Conservation de l'énergie	96
4.	La chaleur	96
XII.	Calorimétrie	97
1.	Chaleur massique	97
2.	Chaleurs latentes	98
2.1.	Fusion et solidification	98
2.2.	Vaporisation et condensation	99
3.	Détermination de la température d'équilibre	99
XIII.	Transferts de chaleur	101
1.	La conduction de chaleur (Wärmeleitung)	101
2.	Convection de chaleur (Wärmeströmung)	102
3.	Rayonnement thermique	104
4.	Isolation thermique	105
5.	Questions de compréhension	106
XIV.	Machines thermiques	107
1.	Propriétés thermiques de quelques substances	108

Première partie

Mécanique

Forces

1. Rappels

1.1. Effets et caractéristiques d'une force

Les effets d'une force sont répartis en deux catégories :

- le changement de la nature du mouvement d'un corps : **effet dynamique** ;
- le changement de la forme d'un corps : **effet statique**.

Les caractéristiques d'une force \vec{F} sont :

Caractéristique	Représentation
point d'application	origine de la flèche
droite d'action	direction de la flèche
sens	pointe de la flèche
intensité ou norme	longueur de la flèche

1.2. Représentation d'une force par un vecteur

On peut réunir toutes ces propriétés en une seule grandeur mathématique, le *vecteur* ; une force est donc représentée par un *vecteur force* (figure I.1).

1.3. Notation de la force \vec{F}

La norme du vecteur est égale à l'intensité de la force. L'intensité du vecteur force \vec{F} sera notée F .

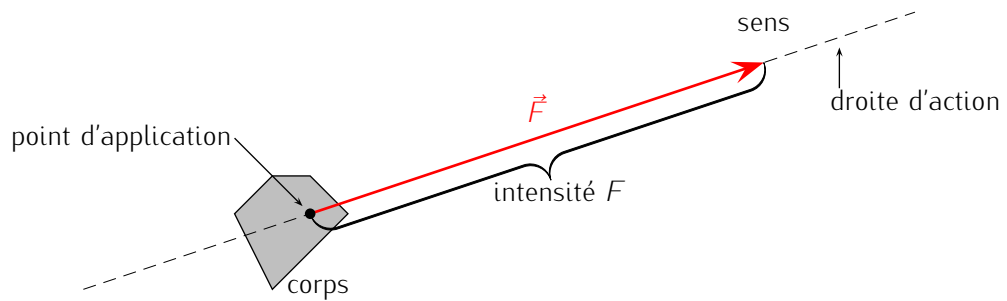


Figure I.1. – Représentation graphique d'une force

Attention :

La signification change avec la notation !

- \vec{F} : vecteur force (intensité, point d'application, direction et sens)
- F : intensité (norme) de la force \vec{F}

1.4. Mesure et unité d'une force

L'intensité d'une force est mesurée à l'aide d'un dynamomètre.
L'unité de la force dans le Système international est le *newton* (N).

$$[F] = 1 \text{ N}$$

1 N correspond à la force nécessaire pour augmenter la vitesse d'un corps de masse 1 kg de $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ chaque seconde.



Figure I.2. – Exemples de dynamomètres

2. Force et déformation

Etude expérimentale

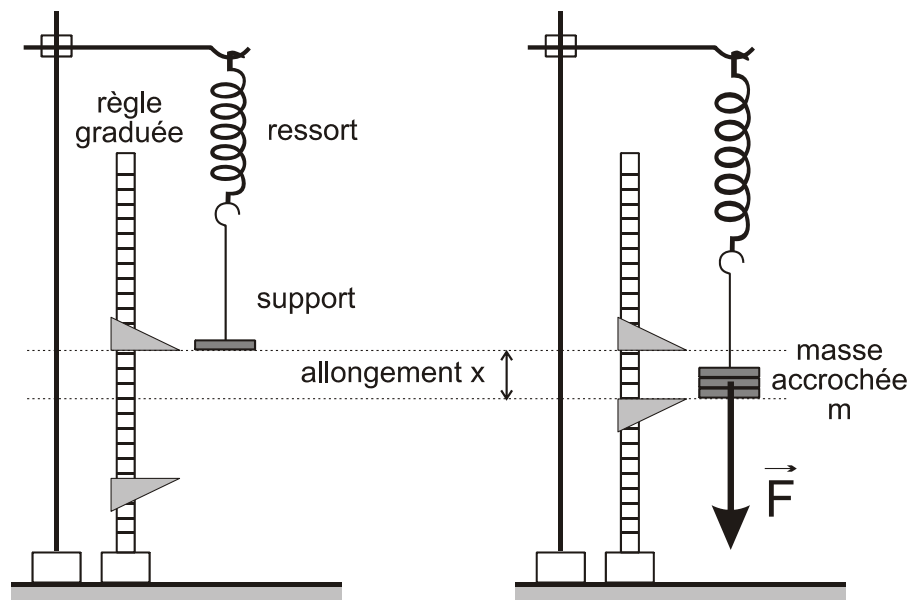


Figure I.3. – Montage expérimental de la loi de Hooke

Dans le cadre des travaux pratiques nous analysons l'effet statique d'une force en mesurant l'allongement x d'un ressort en fonction de l'intensité de la force F qui y est appliquée. Les mesures prises pendant le TP sont ensuite représentées graphiquement.

Conclusions

Nous constatons que les points de mesure se situent sur une droite passant par l'origine. La force F appliquée au ressort est proportionnelle à l'allongement x produit et nous notons $F \sim x$. Ce résultat est connu sous le nom de Loi de Hooke. Le rapport $\frac{F}{x}$ est une constante notée k : $k = \frac{F}{x}$. Plus k est élevé, plus il faut de force pour allonger le ressort d'une certaine distance. Cette caractéristique du ressort est appelée « raideur » et son unité est le newton par mètre ($\frac{N}{m}$).

Enoncé I.1 : Loi de Hooke

Une force d'intensité F appliquée à un ressort de raideur k provoque un allongement (une compression) x de ce dernier, tel que

$$F = kx$$

Unités SI : F en N, x en m et k en $\frac{N}{m}$

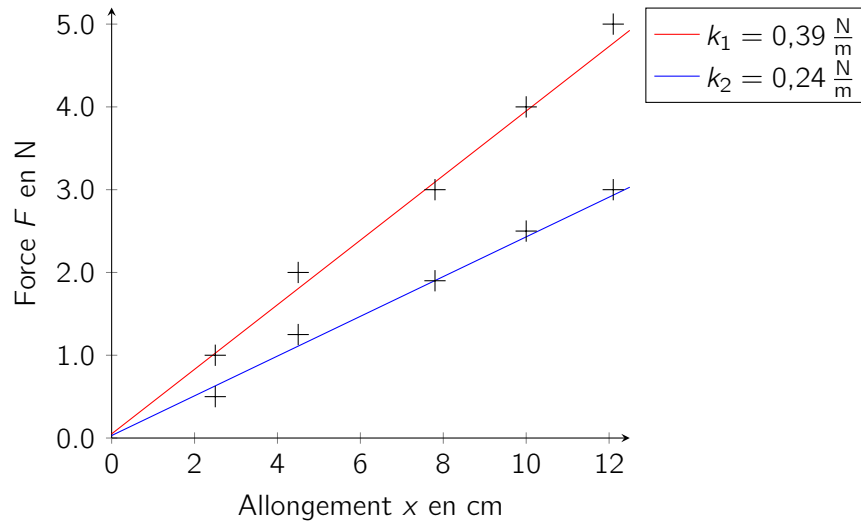


Figure I.4. – Loi de Hooke

Ce résultat n'est valable que dans la mesure où on ne dépasse pas les limites d'élasticité du ressort, c'est-à-dire pour des déformations de faible amplitude. Cette loi est à la base du fonctionnement du dynamomètre.

3. Principe d'inertie (1^{er} principe de Newton)

On a vu que si une force agit sur un corps, elle se manifeste via ses effets. Lorsqu'un corps n'est soumis à aucune force, la nature de son mouvement ne peut pas changer. Cela entraîne que :

- en l'absence de forces, un corps initialement immobile reste immobile,
- un corps en mouvement qui n'est soumis à aucune force continue son mouvement en ligne droite et à vitesse constante.

Cette observation est connue sous le nom de *principe d'inertie*. Il s'agit en fait du premier des trois principes de Newton qui posent les fondements de toute la physique classique.

Enoncé I.2 : Principe d'inertie (1^{er} principe de Newton)

Si un corps n'est soumis à aucune force, ou à un ensemble de forces qui se compensent, alors le centre d'inertie du corps effectue un mouvement rectiligne uniforme (MRU) : si le corps est repos, il reste au repos ; si le corps est en mouvement, il continue son mouvement en ligne droite et à vitesse constante.

Remarque

En pratique, un corps soumis à aucune force n'existe pas. Le principe d'inertie s'appliquera donc toujours à des systèmes où les forces se compensent pour donner une résultante nulle.

4. Principe des actions réciproques (3^e principe de Newton)

Tout le monde sait qu'un aimant attire une boule en acier. L'inverse est moins évident : la boule en acier attire également l'aimant. Il suffit de fixer la boule tout en approchant l'aimant pour remarquer que l'aimant est attiré lui aussi. En fait il faudrait dire que la boule et l'aimant s'attirent mutuellement. De même, la Terre attire un corps qui se trouve à sa surface, et en contrepartie ce corps attire également la Terre. Dû à la grande masse de la Terre il n'y a évidemment pas d'effet observable de cette force, mais elle est bel et bien présente !

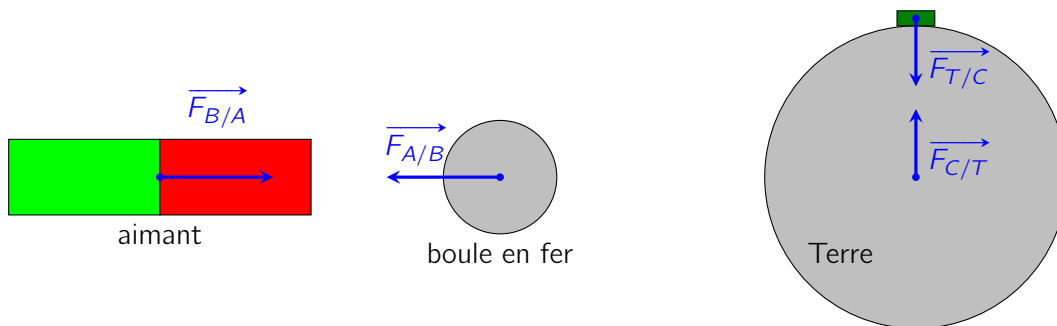


Figure I.5. – Exemples d'actions réciproques

Newton a également observé ces phénomènes et a constaté qu'il s'agit d'un principe valable en général. On l'appelle *principe des actions réciproques* ou *principe de l'action et de la réaction*. Il s'agit du 3^e principe de Newton.

Enoncé I.3 : Principe des actions réciproques (3^e principe de Newton)

Si un corps A exerce une force $\vec{F}_{A/B}$ sur un corps B (l'action), alors le corps B réagit en exerçant une force $\vec{F}_{B/A}$ sur le corps A (la réaction).

Ces deux forces ont même direction, même norme et sens opposé. Elles s'appliquent à deux corps différents et apparaissent et disparaissent simultanément.

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$$

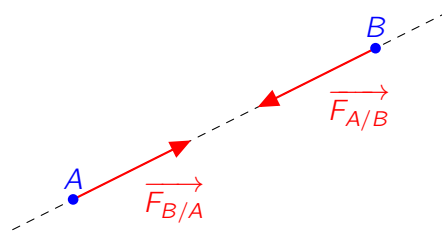


Figure I.6. – Illustration du principe des actions réciproques

Attention

Il ne faut pas confondre le principe de l'action et de la réaction avec l'équilibre d'un corps soumis à deux forces ! En effet, dans le cas de l'équilibre d'un corps, les deux forces sont appliquées au même corps (voir point 6 dans ce chapitre), alors que l'action et la réaction sont toujours appliquées à des corps différents.

Exemples

- la force d'attraction gravitationnelle de la Terre sur la Lune et celle de la Lune sur la Terre
- la force de propulsion du fusil sur la balle et force de la balle sur le fusil (ce qui provoque le recul du fusil)
- la force de traction d'une voiture sur sa remorque et la force de freinage de la remorque sur la voiture
- la force exercée par les pieds d'une personne sur le sol et celle du sol exercée sur les pieds (réaction du sol)

Il est impossible de créer ou d'observer une force seule dans la nature, les forces apparaissent toujours en couple !

5. Notion d'équilibre

Définition I.1 : Équilibre de translation

Un corps est en équilibre de translation si le centre d'inertie du corps se déplace en ligne droite et à vitesse constante (mouvement rectiligne et uniforme), respectivement s'il reste au repos (Le repos n'est qu'un cas particulier de mouvement rectiligne et uniforme avec une vitesse nulle !)

Remarques

- Nous disons aussi qu'il y a *équilibre des forces* qui s'appliquent sur le corps, respectivement que les forces qui s'appliquent au corps se compensent.
- L'état de repos n'est rien d'autre qu'un cas particulier de mouvement rectiligne et uniforme.

Dans la suite, nous allons étudier l'équilibre d'un corps soumis à 2 ou à 3 forces.

6. Équilibre d'un corps soumis à deux forces

6.1. Étude expérimentale

6.1.1. Expérience

Nous allons appliquer deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 à un corps très léger de sorte que son poids soit négligeable par rapport aux intensités des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 (figure I.7).

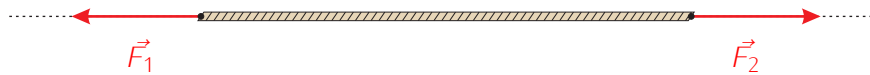


Figure I.7. – Équilibre d'un corps soumis à deux forces

Les forces sont les tensions de deux fils et on mesure leur intensité grâce à deux dynamomètres. De plus, on peut relever sur papier la direction des fils, c'est-à-dire la direction des deux forces.

On répète plusieurs fois l'expérience en changeant la direction et l'intensité des forces.

6.1.2. Observations

Lorsque le corps est en équilibre, les deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 qui s'appliquent sur lui ont

- la même droite d'action ;
- des sens contraires ;
- des intensités égales : $F_1 = F_2$

6.2. Condition d'équilibre

Ces observations se généralisent dans la *condition d'équilibre* :

Si un corps soumis à deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 est en équilibre, les vecteurs-force sont opposés

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

ou encore :

Définition I.2 : Équilibre d'un corps soumis à deux forces

Un corps soumis à deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 de même droite d'action est en équilibre si et seulement si la somme vectorielle des forces est nulle :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0} \quad (I.1)$$

Remarque

En mathématiques, deux vecteurs opposés n'ont pas nécessairement la même ligne d'action. En mécanique, cette condition est nécessaire pour avoir l'équilibre. Pour s'en convaincre, considérons l'exemple de la figure I.8. Les deux forces ont même intensité et des sens contraires, mais n'ont pas la même ligne d'action ; le corps n'est pas en équilibre, il va tourner !

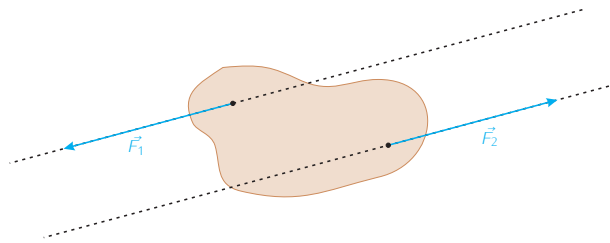


Figure I.8. – Importance de la droite d'action

6.3. Applications

La condition d'équilibre permet de déterminer une des deux forces connaissant l'autre. Voici la procédure à suivre :

- préciser le corps en équilibre ;
- identifier toutes les forces qui s'appliquent à ce corps ;
- appliquer la condition d'équilibre à ces forces.

Les exemples suivants illustrent cette procédure.

6.3.1. Brique sur une table

Une brique posée sur une table est en équilibre (figure I.9). Considérons uniquement les forces qui s'appliquent sur la brique : son poids \vec{P} , vertical et appliqué en G, et la réaction \vec{R} de la table. Afin de simplifier on supposera que toutes les forces s'appliquent au centre d'inertie G du corps

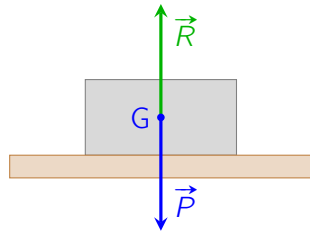


Figure I.9. – La brique posée sur la table est en équilibre

Comme la brique est en équilibre, nous avons : $\vec{R} = -\vec{P}$

Les intensités des deux forces sont égales : $R = P = m \cdot g$

6.3.2. Boule accrochée à un ressort

Une boule accrochée à un ressort est en équilibre (figure I.10). Considérons uniquement les forces qui s'appliquent sur la boule : son poids \vec{P} , vertical et appliqué en G , et la tension \vec{T} du ressort.

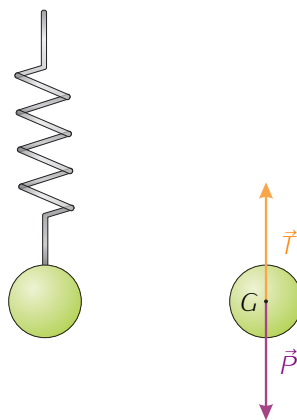


Figure I.10. – La boule accrochée au ressort est en équilibre

Comme la boule est en équilibre, nous avons : $\vec{T} = -\vec{P}$.

Les intensités des deux forces sont égales : $T = P \Rightarrow k \cdot x = m \cdot g$.

7. Équilibre d'un corps soumis à trois forces

7.1. Étude expérimentale

7.1.1. Expérience (voir TP Table de forces)

Utilisons un corps très léger sur lequel on applique trois forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 qui sont les tensions de trois fils (figure I.11).

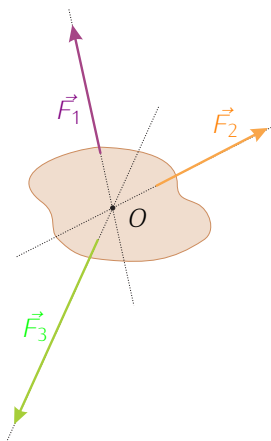


Figure I.11. – Équilibre d'un corps soumis à trois forces

On mesure l'intensité des forces grâce à trois dynamomètres. De plus, on peut relever sur papier la direction des fils, c'est-à-dire la direction des trois forces.

On répète plusieurs fois l'expérience en changeant la direction et l'intensité des forces.

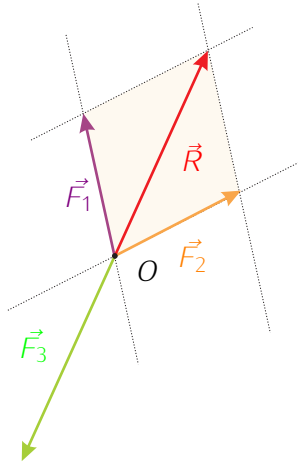
7.1.2. Observations

Lorsque le corps est en équilibre, les trois forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 qui s'appliquent sur lui :

- sont situées dans le même plan, on dit qu'elles sont *coplanaires* ;
- se coupent au même point O , on dit qu'elles sont *concourantes*.

Les valeurs des intensités des trois forces ne nous suggèrent pas immédiatement une relation entre les vecteurs \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 . Pour trouver une telle relation, nous allons choisir une échelle (par exemple 1 cm pour 0,1 N) et dessiner les vecteurs en leur donnant comme origine le point d'intersection O de leurs droites d'action (figure I.12).

L'action de la force \vec{F}_3 doit être équilibrée par une force qui résulte des actions des forces \vec{F}_1

Figure I.12. – Résultante \vec{R} des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2

et \vec{F}_2 . Appelons cette force \vec{R} , *résultante* des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 . D'après la condition d'équilibre dans le cas de deux forces (relation I.1), nous avons :

$$\vec{R} = -\vec{F}_3$$

Nous pouvons remarquer que la résultante \vec{R} est la diagonale d'un parallélogramme de côtés \vec{F}_1 et \vec{F}_2 . Or, ceci est également la somme vectorielle des deux vecteurs \vec{F}_1 et \vec{F}_2 : $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Nous pouvons donc écrire :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -\vec{F}_3 \quad \Leftrightarrow \quad \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$$

7.2. Condition d'équilibre

Nous pouvons formuler la *condition d'équilibre*, valable pour tout corps soumis à l'action de trois forces :

Définition I.3 : Équilibre d'un corps soumis à trois forces

Si un corps soumis à trois forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 est en équilibre :

- les trois forces sont concourantes ;
- la somme vectorielle des trois forces est nulle.

La deuxième condition s'exprime par la relation vectorielle :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0} \quad (I.2)$$

Remarque

Cette condition d'équilibre peut être facilement généralisée à un nombre quelconque de forces. La condition d'équilibre s'écrit alors :

Définition I.4 : Condition générale d'équilibre

Si un corps soumis à plusieurs forces $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_N$ est en équilibre, alors la somme vectorielle de toutes les forces est nulle. Cette condition d'équilibre se note :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{0} \quad (I.3)$$

Exemple : Pendule magnétique

Une boule en acier attachée à un fil et attirée par un aimant est en équilibre (figure I.13). Considérons uniquement les forces qui s'appliquent sur la boule : son poids \vec{P} , vertical et appliqué en G , la tension \vec{T} du fil et la force magnétique \vec{F}_m , horizontale et orientée vers l'aimant.

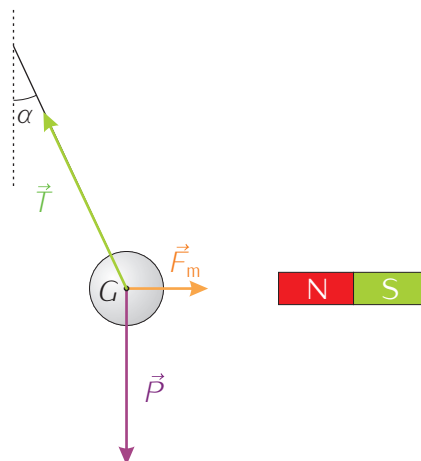


Figure I.13. – La boule soumise à trois forces est en équilibre

Comme la boule est en équilibre, nous avons : $\vec{P} + \vec{T} + \vec{F}_m = \vec{0}$. Connaissant le poids de la boule et l'angle α , quelles sont les intensités des forces \vec{T} et \vec{F}_m ?

7.3. Méthode de résolution d'un problème à trois forces

Pour résoudre un problème comme celui posé dans l'exemple 7.2, nous allons *systématiquement* appliquer la procédure suivante :

1. Préciser clairement le corps considéré et pour lequel la condition d'équilibre est appliquée.
2. Faire un *bilan des forces* appliquées à ce corps : son poids, la force de réaction si le corps est posé sur un support, la tension si le corps est lié à un fil ou à un ressort, éventuellement une force électrique ou une force magnétique.
3. Exprimer la condition d'équilibre (relation I.2). On peut exploiter cette relation vectorielle de trois manières :

1^{re} méthode : Utilisation de la relation vectorielle :

$$\vec{F}_{\text{rés}} = \vec{F}_m + \vec{T} = -\vec{P}$$

qui indique que l'une des trois forces appliquées est égale et opposée à la somme vectorielle des deux autres. Rappelons que le vecteur $\vec{F}_{\text{rés}} = -\vec{P}$ est la diagonale du parallélogramme formé par \vec{T} et \vec{F}_m .

2^e méthode : Projection de la relation vectorielle sur deux axes perpendiculaires de façon à obtenir des relations algébriques entre les intensités des trois forces.

3^e méthode : Décomposition d'une des forces suivant les directions des deux autres. Utiliser ensuite la condition d'équilibre pour deux forces sur chacune des directions.

Les notions de projection et de décomposition d'un vecteur seront présentées dans les deux paragraphes suivants. Il est important de bien maîtriser ces techniques mathématiques.

7.4. Projection d'un vecteur

On choisit un système d'axes perpendiculaires Ox et Oy .

La *projection* du vecteur \vec{F} sur l'axe Ox est obtenue en traçant deux perpendiculaires à cet axe qui passent par les extrémités du vecteur ; la projection F_x est le segment de droite sur l'axe Ox délimité par les deux perpendiculaires (figure I.14).

On procède de la même façon pour déterminer la projection F_y du vecteur sur l'axe Oy .

Pour calculer les mesures algébriques des projections, on considère le triangle rectangle MHM' . Dans ce triangle, l'intensité F est l'hypoténuse, F_x est le côté adjacent et F_y le côté opposé à l'angle α . Il en suit :

$$\cos \alpha = \frac{F_x}{F} \Rightarrow F_x = F \cos \alpha$$

et :

$$\sin \alpha = \frac{F_y}{F} \Rightarrow F_y = F \sin \alpha$$

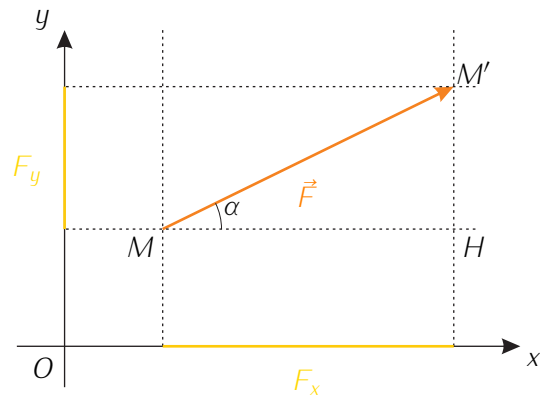


Figure I.14. – Composantes du vecteur \vec{F}

Il est important de noter qu'une projection est une *grandeur algébrique*. Le vecteur \vec{F}_1 de la figure I.15 est orienté dans le sens positif de l'axe Ox et la projection F_{1x} est positive. Le vecteur \vec{F}_2 est par contre orienté dans le sens négatif de l'axe Ox et la projection F_{2x} est négative.

La projection d'un vecteur perpendiculaire à l'axe est nulle.

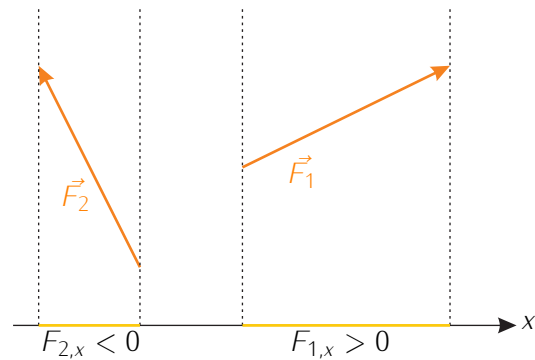


Figure I.15. – La projection est une grandeur algébrique

Pour pouvoir utiliser la condition d'équilibre (relation I.2), il faut remarquer que la projection d'une somme de vecteurs est égale à la somme des projections sur un axe donné. Nous obtenons

ainsi le système de deux équations algébriques :

$$\begin{cases} F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = 0 \\ F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = 0 \end{cases}$$

Remarque

Pour simplifier la solution de ce système d'équations on choisit un système d'axes pour lequel le plus grand nombre de projections s'annulent.

7.5. Décomposition d'un vecteur suivant des directions quelconques

La *décomposition* d'un vecteur \vec{F} consiste à écrire le vecteur comme une somme de deux autres vecteurs \vec{F}_1 et \vec{F}_2 appelés *composantes* du vecteur :

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

La figure I.16a montre le vecteur \vec{F} et les directions (1) et (2) suivant lesquelles on veut le décomposer. Sur ces directions on construit le parallélogramme dont \vec{F} est la diagonale. Les composantes cherchées \vec{F}_1 et \vec{F}_2 sont alors les côtés du parallélogramme (figure I.16b).

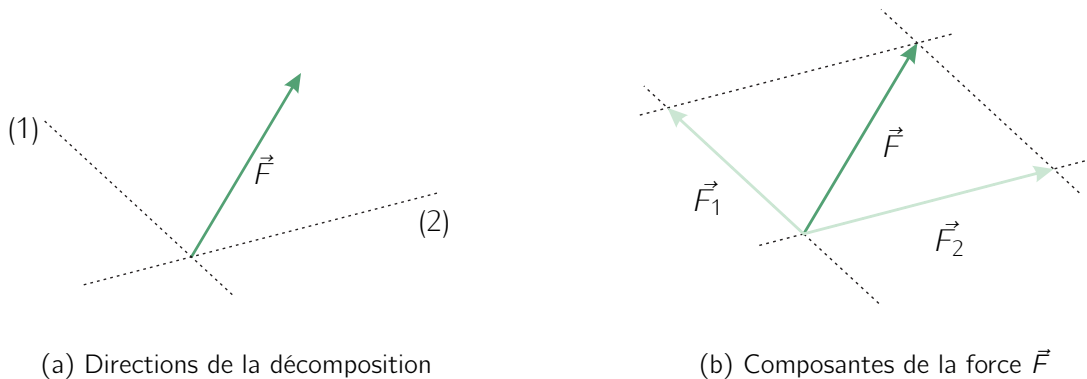


Figure I.16. – Décomposition d'un vecteur suivant deux directions *quelconques*

Pour pouvoir utiliser la condition d'équilibre (relation I.2), il faut décomposer une des forces suivant les directions des deux autres (voir figure I.17). Par exemple, \vec{F}_1 est décomposé suivant les directions de \vec{F}_2 et \vec{F}_3 :

$$\vec{F}_1 = \vec{F}'_1 + \vec{F}''_1.$$

Chacune de ces composantes doit équilibrer la force dans la direction correspondante. Nous obtenons ainsi le système de deux équations vectorielles :

$$\begin{cases} \vec{F}'_1 + \vec{F}_2 = \vec{0} \\ \vec{F}''_1 + \vec{F}_3 = \vec{0} \end{cases}$$

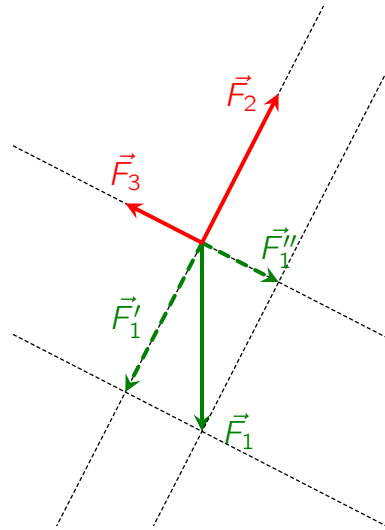


Figure I.17. – Décomposition d'une force suivant les directions de deux autres forces

Remarque

La composante représente l'effet de la force suivant cette direction.

8. Exercices supplémentaires

Exercice I.1

Vous pouvez vous exercer à construire des résultantes et appliquer la condition d'équilibre en utilisant la simulation suivante :

http://www.walter-fendt.de/ph14f/equilibrium_f.htm

Exercice I.2

Décomposer les forces \vec{P} et \vec{T} suivant les directions indiquées. L'échelle est choisie de sorte que 1 cm corresponde à 5 N.



Exercice I.3

Reprendre le cas de l'exemple du paragraphe 7.2 (pendule magnétique) et déterminer les intensités des forces \vec{T} et \vec{F}_{mag} en utilisant les différentes méthodes. La masse de la boule vaut $m = 612 \text{ g}$ et le fil fait un angle de $\alpha = 40^\circ$ avec la verticale.

Résultats : $T = 7,84 \text{ N}$ et $F_{\text{mag}} = 5,04 \text{ N}$

Exercice I.4

Dans la figure I.18, l'intensité de la tension \vec{T}_1 de la corde horizontale vaut 30 N . On donne l'angle $\alpha = 50^\circ$. Déterminer la masse m du corps qui est suspendu aux deux cordes.

Exercice I.5

Une corde est tendue entre deux poteaux. Un garçon de masse 60 kg s'y suspend comme le montre la figure I.19. Trouvez les tensions des deux morceaux de la corde. On donne les mesures des angles $\alpha = 10^\circ$ et $\beta = 5^\circ$.

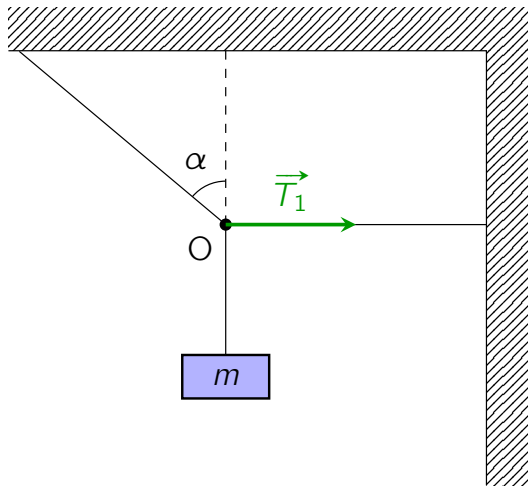


Figure I.18. – Masse suspendue à 2 cordes

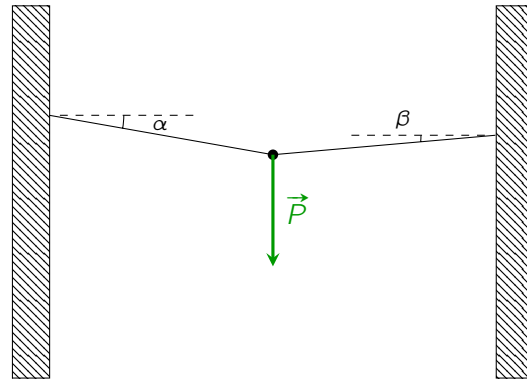


Figure I.19. – Personne se tenant à une corde

Exercice I.6

Une boule de masse $m = 2,5 \text{ kg}$ est fixée le long d'un plan incliné via un ressort de raideur $k = 150 \frac{\text{N}}{\text{m}}$. De combien s'allonge le ressort si le plan incliné forme un angle $\alpha = 35^\circ$ avec l'horizontale ?

Exercice I.7

La boule de masse $m = 8 \text{ kg}$ de la figure I.20 est en équilibre. Les angles des deux fils avec la verticale valent respectivement $\alpha = 25^\circ$ et $\beta = 55^\circ$. Trouvez les tensions dans tous les fils, telles qu'indiquées sur la figure.

Exercice I.8

Le système de la figure I.21 est en équilibre. Le corps posé sur la table reste au repos à cause d'une force de frottement exercée par le support. Cette force peut atteindre au maximum 12 N avant que le corps ne commence à glisser. Déterminer la masse maximale m que peut avoir la boule si l'angle entre le fil et le plafond vaut $\alpha = 30^\circ$.

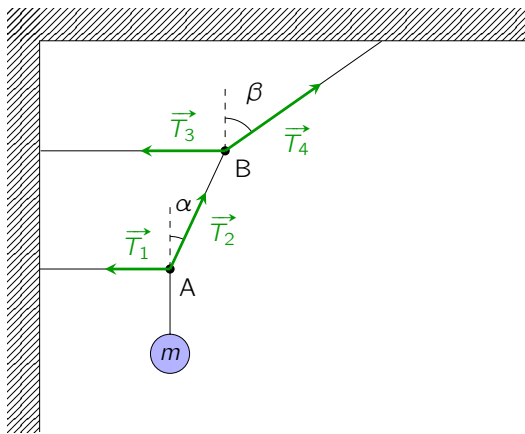


Figure I.20. – Masse suspendue

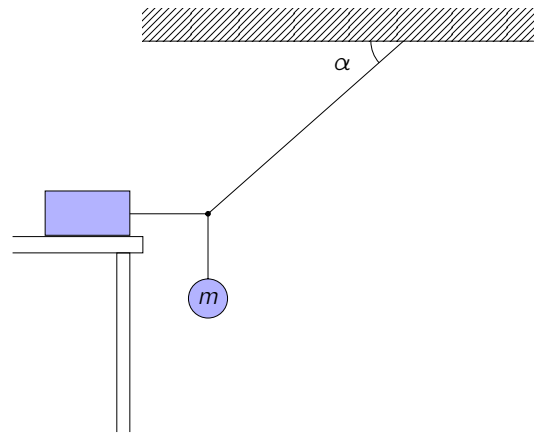


Figure I.21. – Equilibre avec frottement

Le moment d'une force

1. Le levier

Le *levier* fut une des premières machines simples qu'inventa l'homme. De nos jours, on utilise encore des leviers qu'on trouve sous des formes très variées : une tige rigide, une planche, un tourne-vis, un tire-bouchon, une brouette, des tenailles, une paire de ciseaux, ...

La figure II.1 montre l'utilisation d'une simple tige rigide pour soulever une charge.

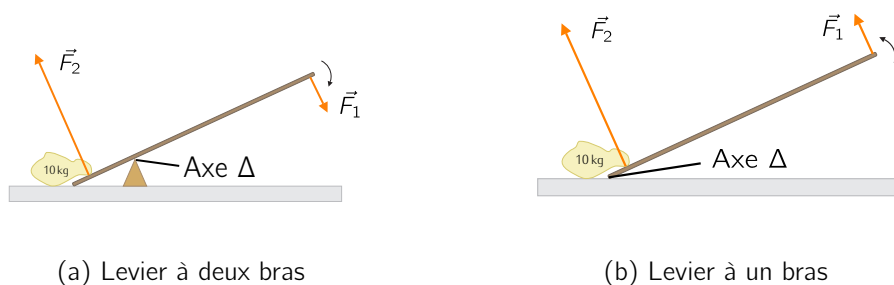


Figure II.1. – Exemples d'utilisation pratique de leviers

Tous les leviers ont deux points communs :

- ce sont des *corps solides* ;
- ils sont mobiles autour d'un *axe de rotation* Δ .

Pour faire fonctionner un levier, on applique une force au levier qui la transmet à un autre corps, par exemple à la charge qu'on veut soulever.

Lorsque le point d'application de la force et le point de contact avec le corps se situent de part et d'autre de l'axe, on parle d'un levier à deux bras (figure II.1a). Lorsque ces deux points se situent sur le même côté du levier par rapport à l'axe ce levier est dit à un bras (figure II.1b).

L'utilité du levier est de :

- réduire l'intensité de la force nécessaire pour agir sur un corps ($F_2 > F_1$) ;
- déplacer le point d'application de cette force.

Dans le cas des exemples de la figure II.1, l'utilisation du levier permet de réduire la force nécessaire pour soulever la charge. Aussi, le point d'application est déplacé à l'extrémité droite de la tige.

2. Équilibre d'un levier

Nous allons étudier l'équilibre d'un levier simple. On considère les forces qui agissent sur ce levier et on essaie de formuler une condition d'équilibre.

Remarques

- Ici nous ne considérons pas la force avec laquelle le levier agit sur un autre corps mais uniquement la force qui agit sur le levier ; ces deux forces sont de même intensité et de sens opposés (d'après le principe de l'action et de la réaction).
- Pour simplifier les figures, la réaction du support n'est pas représentée. Faites-le comme exercice !

Expérience

La figure II.2a montre un levier à deux bras. Pour différentes valeurs de a_1 , a_2 et F_1 nous mesurons l'intensité F_2 de la force \vec{F}_2 nécessaire pour que le levier soit en équilibre. Les distances a_1 , a_2 sont appelées *bras de levier*.

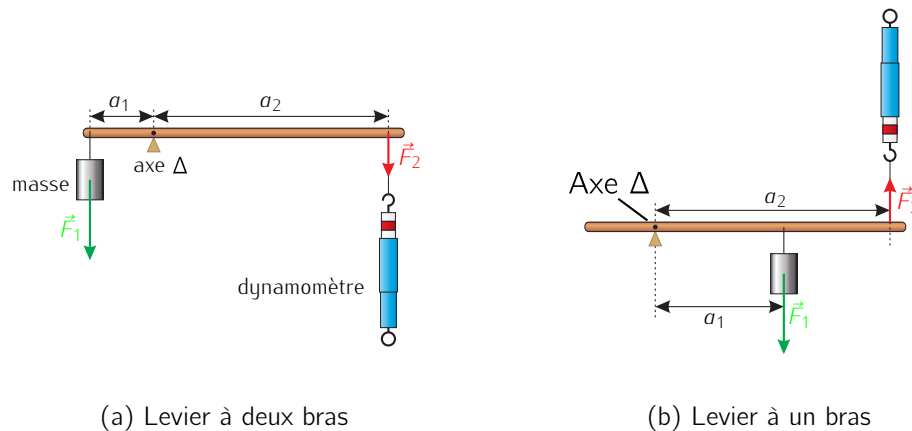


Figure II.2. – Étude expérimentale de l'équilibre d'un levier

Les mesures sont réalisées pendant les travaux pratiques (TP2 : Equilibre d'un corps mobile autour d'un axe) et permettent de formuler les conclusions suivantes :

— Lorsque a_1 et F_1 restent inchangés, F_2 est inversement proportionnel à a_2 :

$$F_2 \sim \frac{1}{a_2}$$

Lorsque a_2 augmente, l'intensité F_2 de la force \vec{F}_2 diminue. Ceci montre bien l'utilité du levier pour réduire l'intensité de la force !

— La *condition d'équilibre* ou *loi du levier* est :

$$F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$$

respectivement

$$F_1 \cdot a_1 - F_2 \cdot a_2 = 0 \quad (\text{II.1})$$

Le produit de l'intensité F par la distance a a la même valeur pour les deux forces.

On refait la même série de mesures avec le levier à un bras de la figure II.2b. Les conclusions sont les mêmes, ce n'est que le sens de la force \vec{F}_2 qui change.

3. Définition du moment d'une force

Intéressons-nous à des situations dans lesquelles le levier n'est pas en équilibre. Que se passe-t-il par exemple si on augmente F_1 ou a_1 de sorte que $F_1 \cdot a_1 > F_2 \cdot a_2$? Le levier se met à *tourner* dans le sens contraire des aiguilles d'une montre !

En général, le levier va tourner dans le sens de la force dont le produit $F \cdot a$ est le plus élevé. Ce produit caractérise donc **l'effet de la force sur la rotation du levier**. On l'appelle *moment* de la force \vec{F} par rapport à l'axe de rotation Δ et on note $M_\Delta(\vec{F})$.

La notion de moment d'une force peut être généralisée au cas d'un solide mobile autour d'un axe. Nous allons nous limiter à des forces orthogonales à cet axe. Il faut également généraliser la définition du bras de levier.

Expérience

Considérons le disque mobile autour d'un axe, tel qu'il est utilisé dans les travaux pratiques et illustré à la figure II.3. Nous allons appliquer les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 de sorte que le disque soit en équilibre.

Observation

On constate que le disque reste en équilibre même si on déplace le point d'application de la force \vec{F}_2 (p.ex.) sur sa droite d'action. L'expression de la loi du levier reste valable si a_2 désigne la distance entre l'axe de rotation et la droite d'action de la force \vec{F}_2 . Ceci revient à dire que la direction du bras de levier a_2 est perpendiculaire à la droite d'action de la force \vec{F}_2 .

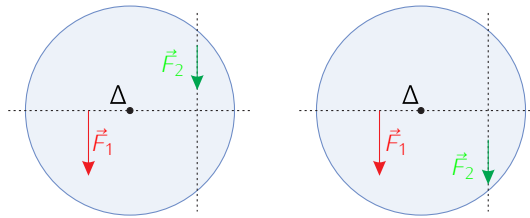


Figure II.3. – Déplacement du point d'application sur la droite d'action

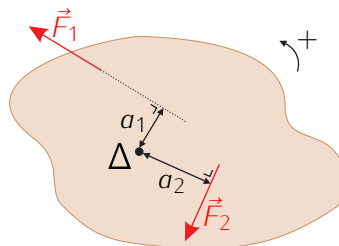


Figure II.4. – Définition du bras de levier d'une force

Définition II.1 : Bras de levier

Le bras de levier a d'une force \vec{F} est la distance de l'axe de rotation Δ à la ligne d'action de \vec{F} (perpendiculaire à la force \vec{F}).

La figure II.4 montre le bras de levier d'une force orthogonale à l'axe de rotation. Le moment d'une force caractérise l'efficacité de la force dans son action de *rotation* du solide.

Définition II.2 : Moment d'une force

Le moment d'une force \vec{F} par rapport à un axe Δ qui lui est orthogonal est en valeur absolue^a égal au produit de l'intensité F de la force par son bras de levier a :

$$|M_{\Delta}(\vec{F})| = F \cdot a$$

L'unité S.I. du moment est le *newton-mètre* (N m) : $[M_{\Delta}(\vec{F})] = 1 \text{ N m}$

^a Le signe du moment d'une force dépend du sens de rotation dans lequel la force entraîne le solide et du sens positif choisi (voir point 3.1)

Remarques

- L'effet de rotation d'une force sur un solide mobile autour d'un axe ne dépend pas seulement de son intensité mais aussi de son bras de levier : pour une même intensité la force est d'autant plus efficace que sa droite d'action est distante de l'axe.
- Le bras de levier d'une force dont la droite d'action passe par l'axe est nul et cette force n'a pas d'effet sur la rotation.
- *Les forces* ont comme effet un changement du mouvement de *translation* d'un corps.
- *Les moments de forces* ont comme effet un changement du mouvement de *rotation* d'un corps.

Exercice

Étudier les effets de différentes forces sur une porte.

En particulier : à quel endroit faut-il pousser la porte pour la fermer avec le moins d'effort possible ?

3.1. Théorème des moments

Les deux forces de la figure II.4 entraînent le solide dans des rotations de sens opposés. Pour distinguer ces deux cas, nous allons choisir un *sens de rotation* positif.

Généralement, on choisit comme *sens positif* le *sens trigonométrique*, c.-à-d. le sens contraire au déplacement des aiguilles d'une montre.

La force \vec{F}_1 entraîne le solide dans le sens positif choisi. Nous allons écrire :

$$M_{\Delta}(\vec{F}_1) = F_1 \cdot a_1$$

La force \vec{F}_2 entraîne le solide dans le sens négatif, et on comptabilise le moment correspondant comme négatif :

$$M_{\Delta}(\vec{F}_2) = -F_2 \cdot a_2$$

Le solide est en équilibre lorsque la somme des deux moments est nulle :

$$\sum M_{\Delta} = 0 \tag{II.2}$$

Cette expression reste valable même s'il y a plusieurs forces qui entraînent le solide dans l'un ou l'autre sens.

La relation (II.2) exprime la condition d'équilibre d'un solide mobile autour d'un axe et est appelé *théorème des moments*. En général :

Enoncé II.1 : Théorème des moments

Si un solide mobile autour d'un axe Δ est en équilibre sous l'action de plusieurs forces, la somme des moments des forces qui agissent sur le corps est nulle.

$$\sum_i M_{\Delta}(\vec{F}_i) = 0 \quad (\text{II.3})$$

Remarque

On rappelle qu'à l'équilibre la somme vectorielle des forces est nulle (voir équation (I.3) page 20).

En général, pour qu'un corps soit en équilibre, il faut donc que deux conditions soient remplies :

- la *somme des forces* doit être nulle, pour qu'il y ait *équilibre de translation* ;
- la *somme des moments* de force doit être nulle, pour qu'il y ait *équilibre de rotation*.

4. Méthode de résolution d'un problème à moments

Pour résoudre un problème faisant intervenir des forces qui agissent sur un solide mobile autour d'un axe, nous allons systématiquement appliquer la procédure suivante :

1. Préciser clairement le corps considéré et pour lequel les conditions d'équilibre sont appliquées.
2. Faire un bilan des forces appliquées à ce corps : son poids, la force de réaction si le corps est posé sur un support, la tension si le corps est lié à un fil ou à un ressort, éventuellement une force électrique ou une force magnétique.
3. Déterminer l'axe de rotation et fixer un sens positif de rotation.
4. Exprimer le moment des différentes forces en faisant attention au signe des moments, selon que la force entraîne le corps dans le sens positif ou dans le sens négatif.
5. Appliquer les relations (I.2) (page 19) et (II.3) (page 32).

5. Exercices supplémentaires

Exercice II.1

Le bas d'une échelle de masse 10 kg et de longueur L repose contre un mur, et le haut est fixé au mur par un fil. L'échelle forme un angle $\alpha = 37^\circ$ avec le mur (voir figure II.5). Un enfant de masse 25 kg se suspend à un barreau qui se trouve à $0,2 \cdot L$ du haut.

1. Représenter sur une figure toutes les forces appliquées à l'échelle ainsi que leurs bras de levier.

- Déterminer la tension de la corde qui retient l'échelle.
- Déterminer la réaction du sol au point où on appuie l'échelle.

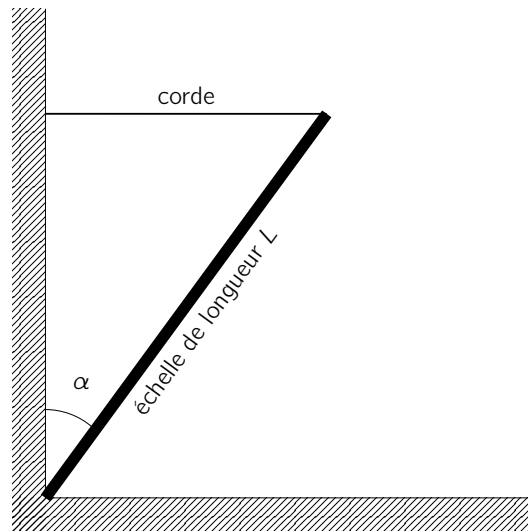


Figure II.5. – Equilibre d'une échelle

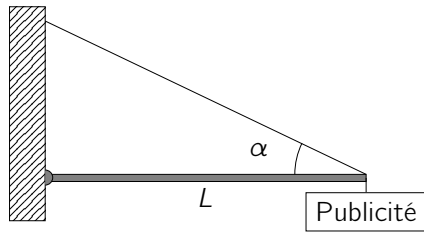
Exercice II.2

Pour les 3 panneaux publicitaires de la figure II.6, trouvez à chaque fois la tension dans le fil. Chaque panneau a une masse de 5 kg. Le mât est uniforme et a une longueur L et une masse m indiquées.

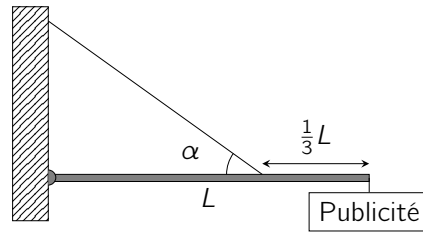
Exercice II.3

L'équerre de la figure II.7 est déposée comme indiqué sur une tige sortant d'un mur. Le bras droit est 2 fois plus long que le bras gauche. Les deux bras sont perpendiculaires entre eux, constitués de la même matière, et ont également même épaisseur. Quel sera l'angle θ à l'équilibre ?

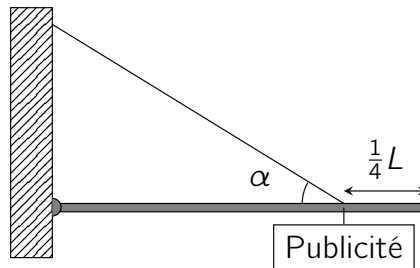
II. Le moment d'une force



(a) Données : $m = 3 \text{ kg}$, $L = 1,5 \text{ m}$ et $\alpha = 30^\circ$



(b) Données : $m = 3 \text{ kg}$, $L = 1,5 \text{ m}$ et $\alpha = 60^\circ$



(c) Données : $m = 4 \text{ kg}$, $L = 2 \text{ m}$ et $\alpha = 30^\circ$

Figure II.6. – Panneaux publicitaires

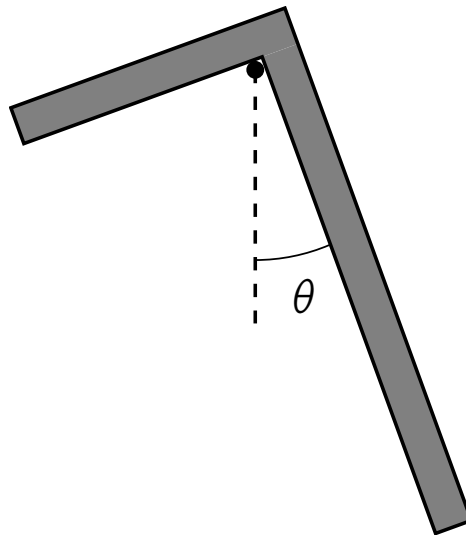


Figure II.7. – Equerre accrochée à un clou

Machines simples

Une *machine simple* est un dispositif mécanique qui sert à simplifier l'accomplissement d'un travail physique, par exemple le levage d'une charge. Elle est constituée d'éléments simples comme des roues, des cordes, des poulies, des planches, des leviers, ... Ces machines font partie des plus importantes inventions de l'homme.

Nous allons étudier en détail les *poulies* et le *plan incliné*. Ces machines simples seront utilisées pour soulever une charge de poids \vec{P} d'une hauteur h .

Sans l'utilisation de machine, il faut appliquer une force \vec{F} égale et opposée au poids de la charge (voir figure III.1). L'intérêt d'une machine simple est donc de changer une ou plusieurs propriétés de la force à appliquer.

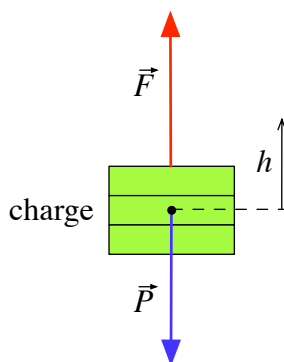


Figure III.1. – Forces appliquées à un corps soulevé sans machine.

1. Le fil

Au lieu d'appliquer une force directement à un objet, ce qui peut se révéler difficile dans certaines situations, on peut transmettre la force via un fil.

On constate que la force à appliquer garde la même intensité (si le poids du fil est négligeable devant le poids de l'objet soulevé).

Enoncé III.1 : Conclusion

Un fil permet de déplacer le point d'application d'une force sans changer l'intensité ni la droite d'action de la force.

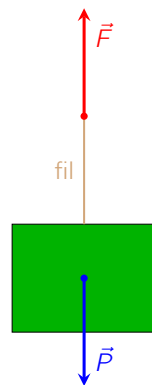


Figure III.2. – Utilisation d'un fil comme machine simple

2. Les poulies

Définition III.1 : Poulie

Une poulie est une roue munie d'une rainure qui reçoit une corde, une chaîne ou une courroie. Selon son utilisation, on distingue la poulie *fixe* et la poulie *mobile*.

2.1. Poulie fixe

La façon la plus simple d'utiliser une poulie est de la fixer à un support (figure III.4).

On constate que la force \vec{F} à appliquer à l'extrémité de la corde a la même intensité que le poids de la charge :

$$F = P$$

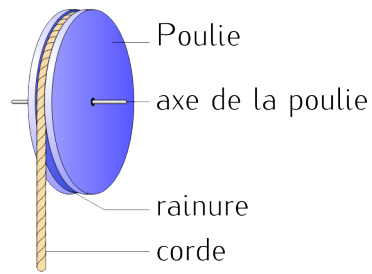


Figure III.3. – Structure d'une poulie

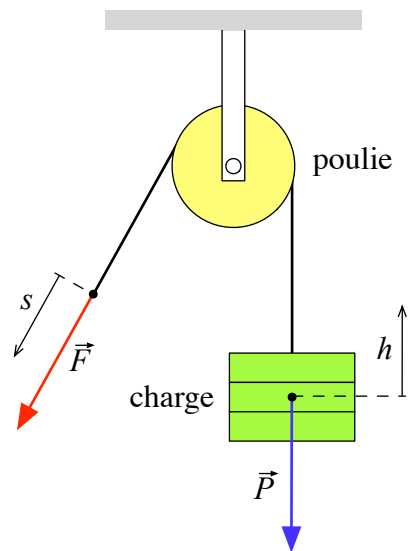


Figure III.4. – Forces appliquées à un corps soulevé à l'aide d'une poulie fixe.

En effet, si on applique l'équilibre de rotation à la poulie, on constate que les moments de \vec{P} et de \vec{F} doivent être égaux. Comme leurs bras de levier sont les mêmes (le rayon de la poulie), l'intensité des forces doit être la même aussi !

Pour monter la charge d'une hauteur h , nous devons déplacer le point d'application de la force \vec{F} d'une distance s égale à la hauteur :

$$s = h$$

Enoncé III.2 : Conclusion

Une poulie fixe sert à changer la direction (voire le sens) de la force à appliquer, mais elle ne change pas son intensité !

Souvent, il est bien plus pratique de pouvoir tirer vers le bas pour monter une charge, car on

peut alors se servir de son propre poids pour tirer la corde.

2.2. Poulie mobile

Une autre façon d'utiliser une poulie est de la fixer à la charge (figure III.5). Une extrémité de la corde est fixée à un support, l'autre est tirée verticalement vers le haut.

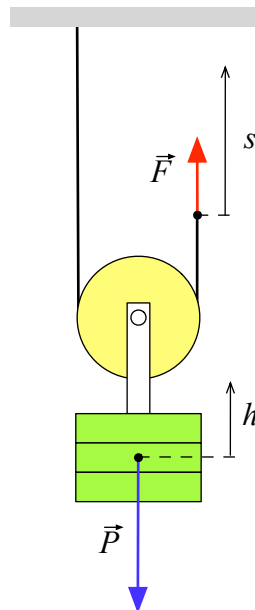


Figure III.5. – Forces appliquées à un corps soulevé à l'aide d'une poulie mobile.

On constate que l'intensité de la force \vec{F} à appliquer à l'extrémité de la corde est égale à la moitié du poids de la charge :

$$F = \frac{P}{2} \quad (\text{III.1})$$

Pour monter la charge d'une hauteur h , nous devons déplacer le point d'application de la force \vec{F} d'une distance s égale au double de la hauteur :

$$s = 2 \cdot h \quad (\text{III.2})$$

Enoncé III.3 : Conclusion

Une poulie mobile ne change ni la direction, ni le sens de la force à appliquer, mais elle permet de réduire son intensité à la moitié ! Le chemin de la force s'allonge pourtant du même facteur 2.

Remarque

La conclusion ci-dessus n'est valable que si le poids de la poulie est négligeable devant le poids de la charge. Si son poids n'est pas négligeable, il faut l'additionner au poids de la charge.

2.3. Palan

On peut associer une poulie fixe à une poulie mobile pour changer à la fois la direction et l'intensité de la force (figure III.6).

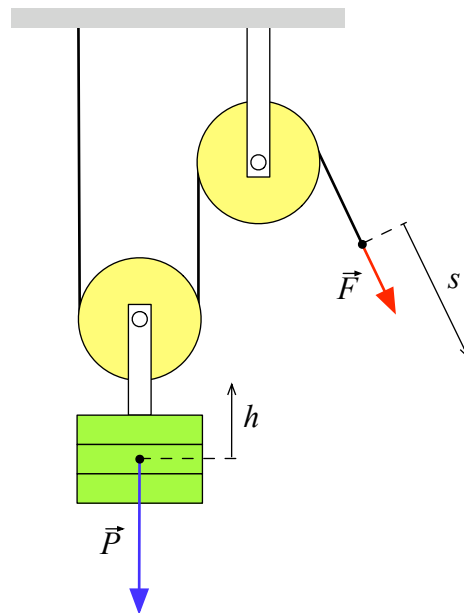


Figure III.6. – Exemple d'un palan simple

Un tel dispositif est appelé *palan*. En général, un palan est un dispositif mécanique constitué de deux groupes, l'un fixe, l'autre mobile, contenant chacun un nombre arbitraire de poulies, et d'une corde qui les relie (figure III.7).

Pour déterminer l'intensité de la force à appliquer et le déplacement de son point d'application, il suffit de déterminer le nombre N de brins de la corde qui portent la charge. Comme la tension de la corde est partout la même (en négligeant son propre poids), chaque brin porte un N -ième du poids de la charge. Cette même force doit être appliquée à l'extrémité de la corde :

$$F = \frac{P}{N} \quad (\text{III.3})$$

Lorsque la charge monte d'une hauteur h , chacun des N brins de la corde est raccourci de h , c'est-à-dire qu'il faudra tirer une longueur totale de corde de $N \cdot h$. La force \vec{F} est donc

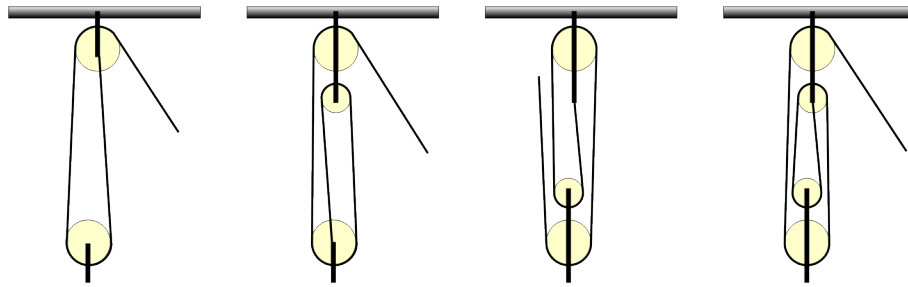


Figure III.7. – Exemples de palans

appliquée sur un chemin de force :

$$s = N \cdot h \quad (III.4)$$

Remarque

Si le brin de corde sur lequel s'applique la force \vec{F} s'enroule autour d'une poulie fixe, il ne fait pas partie des brins qui portent la charge !

3. Plan incliné

Pour monter une charge, on peut également utiliser un plan incliné, par exemple une planche ou une route ascendante. Pour être efficace, le frottement entre le plan et le corps doit être faible, par exemple en utilisant des roues. Dans la suite, nous allons supposer que les forces de frottement sont négligeables.

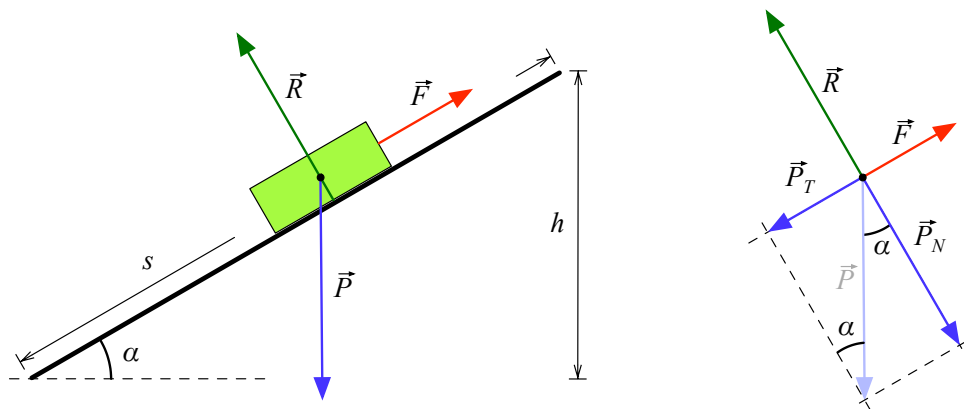


Figure III.8. – Forces appliquées à un corps sur un plan incliné

Pour faire monter le corps d'une hauteur h , nous utilisons un plan incliné d'une longueur s supérieure à la hauteur (voir figure III.8, à gauche). En introduisant l'angle α entre le plan et l'horizontale, nous pouvons écrire :

$$\sin \alpha = \frac{h}{s} \Rightarrow s = \frac{h}{\sin \alpha} \quad (\text{III.5})$$

Comme $\sin \alpha < 1$, on aura $s > h$. Le chemin de la force s'allonge d'un facteur $\frac{1}{\sin \alpha}$.

Pour déterminer l'intensité de la force \vec{F} à appliquer, nous allons décomposer le poids du corps suivant les directions parallèle et perpendiculaire au plan (figure III.8, à droite).

En supposant que le corps est déplacé à vitesse constante, nous pouvons appliquer la condition d'équilibre :

$$\vec{F} = -\vec{P}_T \Rightarrow F = P \cdot \sin \alpha = \frac{P}{\frac{1}{\sin \alpha}} \quad (\text{III.6})$$

On constate que la force est réduite d'un facteur $\frac{1}{\sin \alpha}$, le même facteur duquel le chemin de la force a été allongé. On peut ainsi réduire la force en réduisant l'inclinaison du plan. Or, une réduction de l'inclinaison implique une augmentation du chemin sur lequel la force est appliquée.

Chapitre IV

Travail et puissance d'une force

1. Le travail au sens physique

Dans la vie quotidienne, la notion de *travail* est liée à la sensation d'*effort physique*. La seule application d'une force n'est cependant pas un travail au sens de la *physique*. Une force n'effectue du travail que **lorsque son point d'application se déplace sur la droite d'action de la force**.

Exemple

Un athlète effectue un travail en soulevant une haltère, mais il n'en effectue plus lorsqu'il la maintient au-dessus de sa tête.

En effet, une fois l'haltère soulevée, les points d'application des forces, appliquées sur l'haltère par les mains de l'athlète, ne se déplacent plus. Ces forces n'effectuent donc plus de travail. L'athlète se fatigue à cause du travail effectué par les muscles, mais ce n'est plus un travail au sens physique.

Remarque

Le travail intellectuel, comme penser etc. n'est pas non plus un travail au sens physique !

2. La règle d'or de la mécanique

Les expériences réalisées en classe, les exercices des chapitres précédents ainsi que les travaux pratiques nous ont montré qu'on peut réduire l'intensité d'une force à appliquer, mais à condition d'allonger le chemin de la force (voir leviers, palans, plan incliné, ...).

Nous allons analyser la situation dans un cas simple. Nous voulons soulever d'une hauteur h

IV. Travail et puissance d'une force

une charge de poids P .

Comparons les cas où on soulève la charge directement et si on utilise des machines simples :

Méthode	Force appliquée F	Chemin de la force s	Produit $F \cdot s$
Chemin direct (vertical)	P	h	$P \cdot h$
Palan à N brins	$\frac{P}{N}$	$N \cdot h$	$P \cdot h$
Plan incliné d'un angle α	$P \cdot \sin \alpha$	$\frac{h}{\sin \alpha}$	$P \cdot h$

Dans tous ces cas, on constate que le produit de l'intensité de la force avec le chemin de la force est le même. Ce résultat est vrai en général et constitue la *règle d'or de la mécanique*.

Enoncé IV.1 : Règle d'or de la mécanique

Pour une situation donnée, le produit de la force avec le chemin de la force est une constante. En physique, on l'appelle *le travail*.

Les machines simples permettent de réduire les forces à appliquer, mais elles ne modifient pas le travail à effectuer. En d'autres mots, une machine simple permet de réduire la force à appliquer sous condition que le chemin de force s'allonge du même facteur.

Remarque

Ce résultat s'applique à des situations où le poids des poulies mobiles et le frottement sont négligeables. En réalité, le travail effectué avec une machine simple est supérieur au travail sans machine.

3. Définition du travail d'une force

3.1. Force et déplacement de même direction

À l'aide de l'exemple suivant, nous allons déterminer une expression mathématique qui va nous permettre de calculer le travail W (de l'anglais : *work*) effectué en fonction de l'intensité F de la force et du déplacement s de son point d'application.

Exemple

Madame Martin est en train de déménager et doit monter des caisses de même masse du rez-de-chaussée au 1^{er} étage, 2^e étage, ... On notera W_1 le travail effectué pour monter une caisse au 1^{er} étage. Il s'agit de déterminer le travail dans chacun des autres cas de la figure IV.1 en fonction de W_1 .

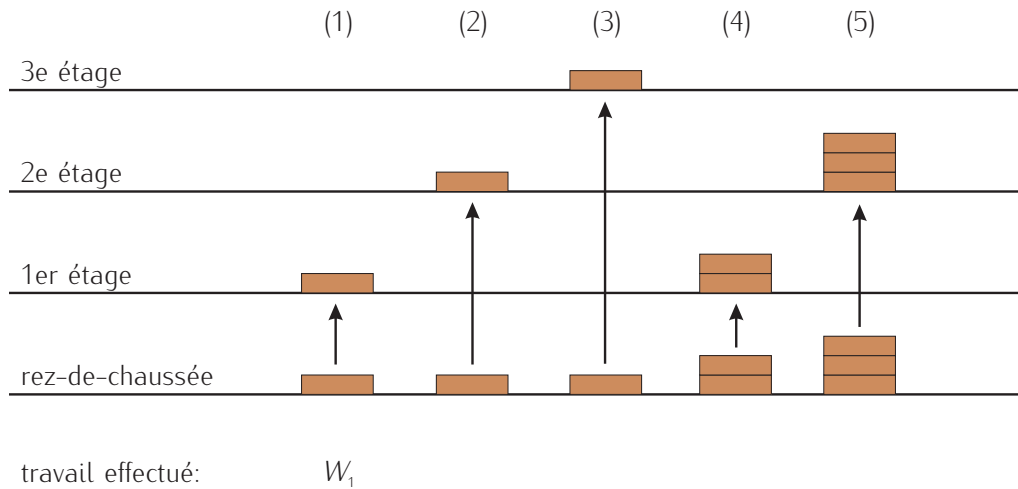


Figure IV.1. – Le travail dépend de la force et du déplacement

Conclusions

- Si l'intensité de la force est la même, comme pour les cas 1, 2 et 3, le travail est proportionnel au déplacement : $W \sim s$ pour $F = \text{cte}$.
- Si le déplacement est le même, comme pour les cas 1 et 4, le travail est proportionnel à l'intensité de la force : $W \sim F$ pour $s = \text{cte}$.

Le travail est donc proportionnel au produit $F \cdot s$: $W \sim F \cdot s$

et on peut écrire : $W = k \cdot (F \cdot s)$ où k est un coefficient de proportionnalité. Le choix de ce coefficient définit l'unité du travail ; dans le Système international, $k = 1$. Si F est exprimé en newtons et s en mètres, alors pour $k = 1$ le travail W s'exprime en Nm.

Définition provisoire

Lorsqu'une force constante \vec{F} , orientée dans la direction et dans le sens du déplacement, est appliquée sur une distance s , elle effectue un travail W donné par :

$$W(\vec{F}) = F \cdot s$$

3.2. Force et déplacement de directions différentes

Comment évaluer le travail si la force n'a pas la même direction que le déplacement ? Pour pouvoir répondre à cette question, remarquons d'abord qu'une force perpendiculaire au déplacement ne travaille pas ! En effet le point d'application de la force ne se déplace pas dans la direction de la force, donc le chemin de force est nul. Exemple : la force avec laquelle une personne porte une valise ne travaille pas.

Dans le cas général, une force a une direction quelconque par rapport à la direction du mouvement. Pour calculer le travail d'une telle force \vec{F} , nous allons la décomposer dans deux directions, une composante tangentielle et une composante perpendiculaire au mouvement (figure IV.2).

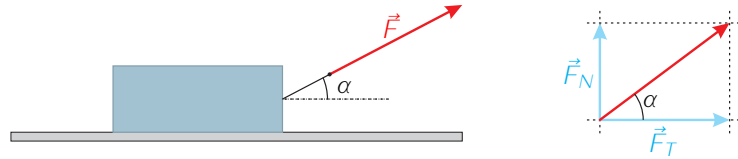


Figure IV.2. – Travail d'une force d'orientation quelconque

La composante normale \vec{F}_N est perpendiculaire au déplacement et ne travaille pas. La composante tangentielle \vec{F}_T est dans la direction du déplacement de sorte que son travail se note :

$$W(\vec{F}_T) = F_T \cdot s$$

Le travail de la force \vec{F} est la somme des travaux de ses composantes :

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

où F_T peut s'exprimer en fonction de α et de F : $F_T = F \cdot \cos \alpha$.

Ainsi, nous pouvons généraliser la définition du travail.

Définition IV.1 : Travail d'une force

Lorsqu'une force constante \vec{F} , dont la direction fait un angle α avec la direction du déplacement, est appliquée sur une distance s , elle effectue un travail W donné par :

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

On définit l'unité du travail par $1 \text{ N m} = 1 \text{ J}$ (1 joule).

Lorsqu'une force de 1 N produit un déplacement de 1 m (de même direction et sens que la force), alors elle effectue un travail de 1 joule.

Notation

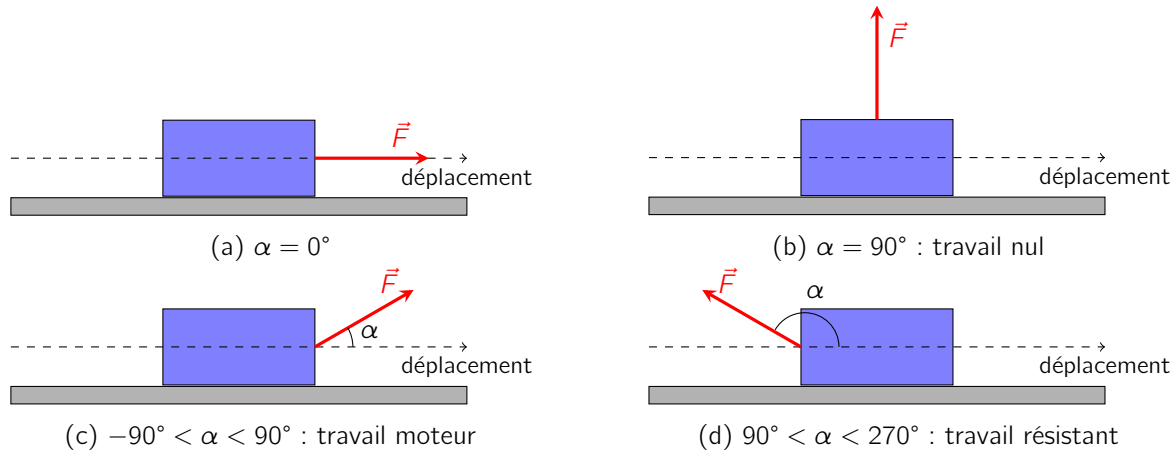
Si nous définissons le déplacement par un vecteur \vec{s} , la définition du travail d'une force constante \vec{F} correspond au *produit scalaire* des deux vecteurs :

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

Remarques

- Lorsque $\alpha = 0$, c'est-à-dire lorsque la force et le déplacement ont la même direction, alors $\cos \alpha = 1$ et $W(\vec{F}) = F \cdot s$ (Fig. IV.3a).

- Lorsque $\alpha = 90^\circ$, c'est-à-dire lorsque la force est perpendiculaire à la direction du déplacement, alors $\cos \alpha = 0$ et la force ne travaille pas (Fig. IV.3b).
- Lorsque $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$, le travail $W(\vec{F}) > 0$ et on parle alors d'un *travail moteur* (Fig. IV.3c).
- Lorsque $90^\circ < \alpha < 270^\circ$, le travail $W(\vec{F}) < 0$ et on parle alors d'un *travail résistant* (Fig. IV.3d).

Figure IV.3. – Travaux réalisés selon la valeur de l'angle α

4. La puissance d'une force

Il est souvent utile de considérer le temps nécessaire pour effectuer un certain travail. Voici quelques exemples :

1. Pour monter une charge au 10^e étage d'un bâtiment, un ouvrier met beaucoup plus de temps qu'une grue. Nous disons que la grue est plus *puissante* que l'ouvrier, bien que les deux réalisent exactement le même travail.
2. Une voiture puissante arrive à monter une côte en moins de temps qu'une voiture de même masse mais moins puissante.

Nous allons définir une nouvelle grandeur appelée *puissance* qui tient compte à la fois du travail W effectué et de la durée Δt nécessaire. Pour trouver cette relation, faisons le raisonnement suivant :

- Plus la puissance d'une machine est élevée, plus elle peut faire de travail pendant la même durée de temps.
- Moins une machine met de temps pour effectuer un certain travail, plus sa puissance sera élevée.

Il serait donc judicieux de définir la puissance comme étant le travail effectué en une seconde ; elle correspond au quotient du travail par la durée de temps. On la note \mathcal{P} de l'anglais pour *power*.

5. Définition de la puissance

Définition IV.2 : Puissance

La puissance \mathcal{P} d'une force est le quotient du travail W effectué par cette force par la durée de temps Δt nécessaire :

$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t}$$

L'unité de la puissance est le *watt* (W) : $[\mathcal{P}] = 1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$

Si un travail de 1 J est effectué en 1 s, on développe une puissance de 1 W.

Cheval-vapeur

La puissance peut être exprimée en *chevaux-vapeur* (1 ch, en allemand 1 PS (Pferdestärke)). Cette ancienne unité est basée sur l'observation suivante :

Un cheval peut monter une charge de 75 kg de 1 m en 1 s.

Le travail effectué par le cheval vaut alors

$$W = P \cdot h = m \cdot g \cdot h = 736 \text{ J}$$

Par conséquent :

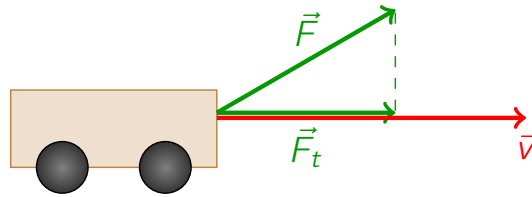
$$\mathcal{P} = \frac{W}{t} = 736 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 736 \text{ W} = 1 \text{ ch}$$

Relation entre la puissance et la vitesse d'un corps

Soit un corps qui se déplace à la vitesse constante v . Il parcourt une distance s pendant la durée Δt et la vitesse vaut ainsi : $v = \frac{s}{\Delta t}$. La force motrice \vec{F} qui maintient ce mouvement (en équilibrant p.ex. la force de frottement) développe la puissance

$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F \cdot s \cdot \cos \alpha}{\Delta t} = F \cdot v \cdot \cos \alpha = F_t \cdot v$$

où F_t correspond à la composante tangentielle de la force, c'est-à-dire la composante colinéaire au mouvement (voir figure IV.4).

Figure IV.4. – Projection de \vec{F} sur la direction du mouvement

6. Exercices supplémentaires

Exercice IV.1

Sur un chantier, un monte-charge est utilisé pour remonter un paquet de 420 kg le long d'une pente formant un angle de 25° avec l'horizontale. Déterminer la puissance que doit fournir le moteur du monte-charge, sachant que le paquet avance à une vitesse constante de $2,5 \frac{m}{s}$.

En réalité on constate que le moteur consomme une puissance de 6000 W. Déterminer son rendement en %.

Exercice IV.2

Un tapis roulant est utilisé pour charger du minerai dans un wagon. La longueur du tapis est de 22,5 m et son inclinaison avec l'horizontale vaut 35° . La force de frottement exercée par le tapis sur les pierres garde le minerai à l'équilibre, de sorte qu'il monte avec une vitesse constante.

1. Calculer le travail fourni par le tapis roulant lorsqu'un bloc de minerai de masse 2 kg parcourt à vitesse constante toute la longueur du tapis.
2. Quelle doit être la puissance du moteur entraînant le tapis si la vitesse de chargement du wagon est de 1,55 tonnes par minute ?

Exercice IV.3

Une voiture de masse 1600 kg remonte une pente formant un angle de 6° avec l'horizontale à la vitesse constante de $120 \frac{km}{h}$. Son moteur développe alors une puissance mécanique de 90 kW. Lors de la transmission du moteur aux roues il y a environ 17% de pertes. Déterminer l'intensité du frottement total agissant sur la voiture.

Énergie mécanique

La notion d'énergie est une notion fondamentale de la physique. Bien que le terme « énergie » soit utilisé couramment, on constate qu'il est difficile de définir la notion d'énergie.

En effectuant un travail, on peut communiquer de l'énergie à un corps (p.ex. énergie potentielle ou cinétique) et vice-versa on a besoin d'énergie pour effectuer un travail. On dit que le travail est un *mode de transfert d'énergie*. Il en suit que l'unité de l'énergie est la même que celle du travail : le *joule* (J).

Lors d'un *transfert d'énergie*, l'énergie passe d'un corps à un autre. Lors d'une *transformation d'énergie*, elle est transformée d'une forme en une autre.

Dans ce chapitre nous allons principalement nous occuper de *l'énergie mécanique*, mais nous allons commencer par faire un inventaire des différentes formes d'énergie qu'on peut rencontrer.

1. Différentes formes d'énergie

L'énergie apparaît sous différentes formes, dont voici quelques exemples :

- Énergie mécanique : elle est due au mouvement d'un corps ou au « potentiel » d'un corps à faire un travail. Cette forme d'énergie est utilisée par exemple pour mettre en mouvement les turbines dans des centrales hydrauliques ou pour faire tourner les éoliennes. On la traitera en détail dans la suite.
- Énergie chimique : c'est l'énergie qui est stockée dans les liaisons chimiques et qui est par exemple à la base des piles électriques ou qui est emmagasinée dans les combustibles et les aliments.
- Énergie de rayonnement : le rayonnement électromagnétique, comme les rayons lumineux du Soleil, transporte de l'énergie rayonnée.
- Énergie nucléaire : la fission (ou la fusion) de noyaux atomiques libère une énergie énorme et la chaleur produite dans cette réaction peut par exemple être transformée en

électricité via des turbines à vapeur.

- Énergie thermique : la combustion du charbon par exemple libère de l'énergie thermique (calorifique). Plus les particules qui composent un corps sont en agitation (mouvement brownien), plus ce corps contient d'énergie thermique.

2. Énergie cinétique

Exemples

- Un courant d'eau fait tourner une roue hydraulique. L'eau en mouvement effectue un travail ; elle possède donc de l'énergie.
- Une voiture en mouvement peut déplacer une autre voiture si elle l'heurte ; elle possède donc de l'énergie.

Nous pouvons conclure de ces exemples que tout corps en mouvement possède de l'énergie, appelée *énergie cinétique*.

Pour déterminer la valeur de l'énergie cinétique d'un corps, nous pouvons calculer le travail nécessaire pour le mettre en mouvement. Ce calcul sera fait en classe de 2^e. On trouve que l'énergie cinétique est proportionnelle à la masse du corps et au carré de sa vitesse.

Définition V.1 : Énergie cinétique

Un corps de masse m animé d'un mouvement de translation de vitesse v possède une énergie cinétique E_c donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

L'unité de l'énergie cinétique est le *joule* (J), celle de la vitesse est le *mètre par seconde* ($\frac{m}{s}$).

3. Énergies potentielles

Sous le terme « énergies potentielles » on regroupe les énergies emmagasinées dans un corps, qu'on ne voit pas directement, mais qui peuvent être libérées pour se manifester sous une autre forme d'énergie. C'est pourquoi les corps ayant une telle énergie potentielle ont la possibilité respectivement le potentiel pour effectuer un travail.

3.1. Énergie potentielle de pesanteur

Exemples

- Lorsqu'on lâche un camion miniature du haut d'un plan incliné, il va acquérir de l'énergie cinétique au cours de sa descente et pourra par conséquent effectuer un travail. Au point de départ le camion possède donc de l'énergie.
- Pour produire de l'électricité, la centrale de Vianden utilise l'énergie de l'eau du bassin supérieur au Mont Saint-Nicolas.

Nous pouvons conclure de ces exemples que tout corps situé à une certaine altitude possède de l'énergie, appelée *énergie potentielle de pesanteur*.

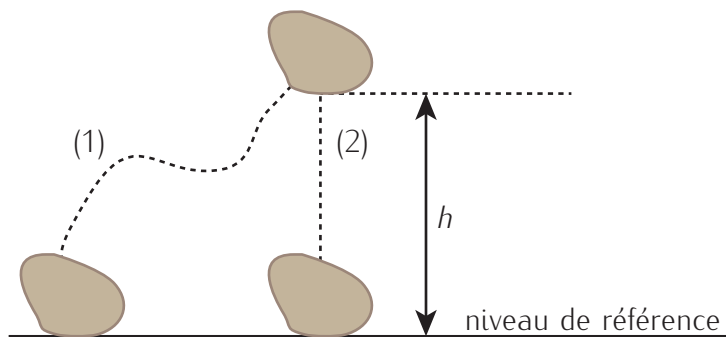


Figure V.1. – Calcul de l'énergie potentielle de pesanteur d'un corps

Pour déterminer la valeur de l'énergie potentielle de pesanteur d'un corps de masse m , nous pouvons calculer le travail nécessaire pour le soulever à une altitude h .

La figure V.1 montre deux chemins différents pour soulever le corps à une altitude h par rapport au niveau de référence. D'après la règle d'or de la mécanique, le travail est indépendant du chemin suivi. Nous calculons le travail sur le chemin (2) :

$$W = P \cdot h = m \cdot g \cdot h$$

Définition V.2 : Énergie potentielle de pesanteur

Un corps de masse m situé à une altitude h par rapport à un niveau de référence et attiré par un corps céleste dont la pesanteur vaut g , possède une énergie potentielle de pesanteur donnée par :

$$E_{p,\text{pes.}} = m \cdot g \cdot h$$

Il convient de définir arbitrairement le niveau de référence où $h = 0$.
L'unité de l'énergie potentielle de pesanteur est le *joule* (J).

Remarque

Les énergies potentielles sont toujours définies par rapport à un niveau de référence, pour lequel l'énergie est posée égale à zéro. Si on choisit un niveau de référence différent, on obtiendra aussi une valeur différente pour l'énergie potentielle. Cela est tout à fait normal ! On remarquera dans les exercices que c'est toujours la différence de l'énergie entre les états initiaux et finaux qui jouera un rôle, et cette différence est indépendante du choix du niveau de référence.

3.2. Énergie potentielle élastique

Un arc tendu peut mettre en mouvement une flèche, le ressort en spirale tendu d'une voiture miniature peut accélérer la voiture. L'arc et le ressort possèdent donc de l'énergie qui est due à leur déformation.

Définition V.3 : Énergie potentielle élastique

On appelle énergie potentielle élastique $E_{p.\text{élast.}}$ l'énergie emmagasinée par un corps élastique qui est déformé.

Son expression ne sera vue qu'en classe de 2^e.

Définition V.4 : Énergie mécanique

On appelle énergie mécanique $E_{\text{méc}}$ d'un corps la somme de l'énergie cinétique et des énergies potentielles d'un corps :

$$E_{\text{méc}} = E_c + E_{p.\text{pes.}} + E_{p.\text{élast.}}$$

4. Transferts et transformations d'énergie

4.1. Transferts d'énergie

L'énergie peut passer d'un corps à un autre ; nous disons qu'il y a un *transfert d'énergie*.

Exemple

Une boule de billard A est en mouvement ; elle possède de l'énergie cinétique. Elle frappe une boule B initialement immobile. La boule A s'immobilise tandis que la boule B est mise en mouvement. L'énergie cinétique est transférée de la boule A à la boule B .

4.2. Transformations d'énergie

Lorsque l'énergie d'un corps passe d'une forme à une autre, on parle de *transformation d'énergie*.

Exemple

Une boule se trouve à 2 m du sol ; elle possède de l'énergie potentielle de pesanteur. Lorsqu'elle tombe sous l'action de son poids, son énergie potentielle de pesanteur se transforme en énergie cinétique.

En mécanique, le travail est un *mode de transfert* d'énergie. Un travail accélérateur change l'énergie cinétique du corps, un travail de levage change son énergie potentielle de pesanteur et un travail tenseur son énergie potentielle élastique.

5. Conservation de l'énergie

L'intérêt de travailler avec la notion d'énergie vient notamment du fait que la quantité totale de l'énergie est conservée. Avant de formuler ce principe fondamental, nous devons définir les notions d'*énergie totale* et de *système isolé*.

Définition V.5 : Énergie totale

L'énergie totale d'un corps est la somme de toutes les formes d'énergie. L'énergie totale d'un système physique est la somme des énergies des corps qui constituent le système.

Définition V.6 : Système isolé et pseudo-isolé

Un ensemble de corps qui n'est soumis à aucune force extérieure est appelé système isolé. Si un système est soumis à plusieurs forces extérieures dont la résultante est nulle, alors on dit que le système est pseudo-isolé.

Ces définitions permettent de formuler le *principe de conservation de l'énergie*.

Énoncé V.1 : Loi de la conservation d'énergie

Lors de transferts ou de transformations d'énergie, l'énergie totale d'un système (pseudo-) isolé est conservée. (Rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme)

On doit remarquer que l'énergie totale comprend toutes les formes d'énergie, mécaniques et non mécaniques.

Exemple

Une voiture en mouvement sur une route horizontale freine. À cause des frottements entre les disques et les plaquettes de frein, son énergie cinétique est transformée en énergie thermique.

Lorsqu'il y a des frottements, de l'énergie mécanique est transformée en énergie thermique. Si les frottements sont négligeables (il n'y a pas d'énergie thermique produite), on peut formuler le *principe de conservation de l'énergie mécanique*.

Énoncé V.2 : Conservation de l'énergie mécanique

Lors de transferts ou de transformations d'énergie mécanique et en absence de frottements, l'énergie mécanique totale d'un système (pseudo-)isolé est conservée.

6. Exercices supplémentaires

Exercice V.1

Le conducteur d'une voiture de masse 1200 kg remarque que celle-ci ralentit de $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ à $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ lorsqu'elle roule en roue libre sur une distance de 130 m sur terrain plat. Déterminer l'intensité de la force de frottement qui s'oppose au mouvement. (Réponse : 808 N)

Exercice V.2

Au niveau de la mer, une molécule d'azote de l'air a une E_c moyenne de translation de $6,2 \cdot 10^{-21}$ J. Sa masse est de $4,7 \cdot 10^{-26}$ kg.

- Si la molécule pouvait se déplacer verticalement sans heurter d'autres molécules de l'air, quelle hauteur atteindrait-elle ?
- Quelle est la vitesse initiale de la molécule ?

(Réponses : a) 13,5 km b) $510 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

Exercice V.3

Un objet de masse 100 g est lancé avec une vitesse de $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sur un plan incliné formant un angle $\alpha = 25^\circ$ avec l'horizontale. Notons le point de lancement A, et le point où l'objet s'immobilise B.

- En supposant que les frottements sont négligeables, calculer la distance AB parcourue jusqu'à l'arrêt.
- En réalité l'objet s'arrête après 8,5 m. Déterminer l'intensité moyenne de la force de frottement.

(Réponses : a) 12,1 m b) 0,17 N)

Deuxième partie

Électricité

Chapitre VI

Courant électrique et intensité du courant (Rappels de 4^e)

1. Le courant électrique

1.1. Généralités

Expérience :

Le circuit de la figure suivante comporte un générateur à haute tension et deux lampes à lueur. Le circuit est ouvert entre les points A et B.

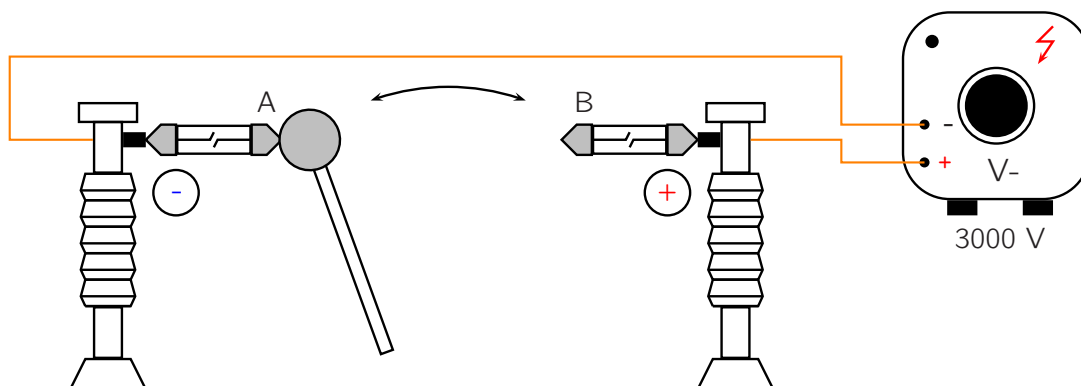


Figure VI.1. – Transport d'électrons

On met alors en contact une boule métallique (portée par une tige isolante), successivement avec les bornes A et B des lampes à lueur.

On observe qu'à chaque contact, la lampe à lueur en contact avec la boule s'allume brièvement.

Interprétation :

En amenant la boule en contact avec A, elle *capte des électrons* (provenant du pôle négatif du générateur). La lampe à lueur émet une lueur lumineuse du côté gauche, d'où proviennent les électrons. En établissant alors un contact avec la borne B, la boule *cède ces électrons* dans l'autre partie du circuit. La lampe à lueur B s'allume également du côté gauche. Ces électrons sont ensuite retirés du circuit à travers la borne positive du générateur. A chaque contact, un *courant électrique* circule (effet lumineux dans les lampes à lueur).

En reliant les bornes A et B par un fil métallique, les deux lampes restent allumées en permanence.

Conclusion :

Dans les conducteurs, les atomes libèrent un ou plusieurs électrons qui peuvent alors se déplacer librement à travers le conducteur. On les appelle *électrons libres*. Ainsi, dans les fils métalliques d'un circuit électrique fermé *circulent des porteurs de charge*, les *électrons*. Ces électrons libres portent des charges négatives qu'ils transportent du pôle négatif de l'alimentation vers le pôle positif. Ce mouvement des porteurs de charge constitue le **courant électrique**.

Définition VI.1 : Courant électrique

Le courant électrique dans un métal est un mouvement orienté d'électrons libres du pôle négatif vers le pôle positif (de la source de courant). Pour assurer ce mouvement, chaque atome du métal libère un à plusieurs électrons, appelés électrons libres, qui sont capables de se déplacer d'un ion métallique à l'autre.

Remarque :

La *vitesse de translation* des électrons libres dans un circuit électrique est *très faible*. En général, un électron libre n'avance que d'une fraction de millimètre par seconde.

Voici un exemple : supposons que les fils d'un circuit comprenant une pile et une lampe à incandescence ont une longueur totale de 60 cm. Un électron met alors plus de 10 minutes pour partir de la pile, traverser la lampe et revenir vers la pile. Malgré cela, l'ampoule s'allume dès l'instant où l'on ferme le circuit ; en effet, tous les électrons libres dans le circuit se mettent *simultanément en mouvement*, comme ils se repoussent mutuellement.

Voir aussi : <http://www.physique.lu/physique/courant/courant.html>

1.2. Sens conventionnel du courant électrique

Historiquement, au début de l'étude de la conduction de l'électricité, les scientifiques ont pensé que les porteurs de charge qui se déplaçaient dans les métaux étaient des particules chargées positivement et ont défini en conséquence un sens conventionnel du courant comme étant le sens de déplacement des charges positives. Plus tard on a mis en évidence que ce sont

très majoritairement les électrons, particules chargées négativement, qui se déplacent dans les métaux et qui permettent la circulation des courants électriques. Pourtant, on a maintenu le sens conventionnel initial.

Définition VI.2 : Sens conventionnel

Par convention, le sens du courant électrique est tel qu'il *sort du pôle positif* de la source de courant et qu'il *rentre par son pôle négatif* (bien qu'on sache aujourd'hui que les électrons se déplacent dans le sens inverse). Ainsi on ne travaillera qu'avec des charges positives et des intensités de courant positives.

Remarque :

Dans les liquides et les gaz, ce sont les ions positifs et négatifs qui sont les porteurs de charge en mouvement.

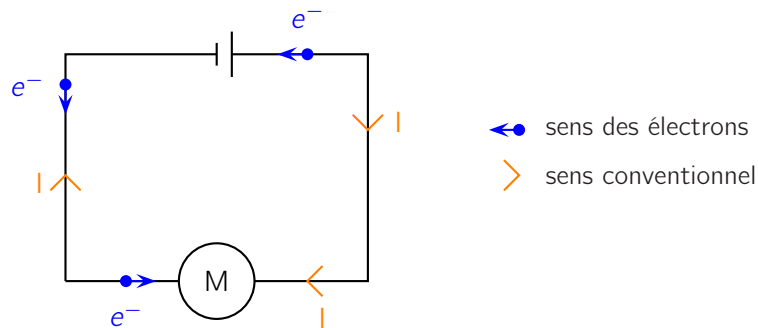


Figure VI.2. – Sens conventionnel et sens réel du courant électrique

2. 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 la même durée de temps, moins de porteurs de charge circulent à travers cette section, le courant est plus faible.

Plus la quantité de **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*.

Définition VI.3 : Intensité du courant

L'intensité I du courant électrique est numériquement égale au quotient de la quantité de charge électrique Q qui traverse une section du conducteur par la durée de temps Δt correspondante.

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

Unité SI : 1 A (ampère)^a

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

Si une charge de 1 C traverse une section du conducteur en 1 s, alors le courant électrique a une intensité de 1 A.

a. nom de l'unité en l'honneur d'André Marie Ampère (1775-1836), mathématicien et physicien français

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

On utilise aussi des **multiples** et **sous-multiples** de l'Ampère :

$$1 \text{ mA} = \frac{1}{1000} \text{ A} = 10^{-3} \text{ A} = 0,001 \text{ A} \quad 1 \mu\text{A} = \frac{1}{1000000} \text{ A} = 10^{-6} \text{ A} = 0,000001 \text{ A}$$

$$1 \text{ kA} = 1000 \text{ A} = 10^3 \text{ A} \quad \dots$$

montre à quartz	0,001 mA
ampoule d'éclairage (100W)	0,43 A
réfrigérateur	0,5 A
grille-pain	1,8 A
machine à laver	16 A
démarrreur de voiture	100 A
locomotive	200 A
éclair	300.000 A

Tableau VI.1. – Quelques exemples d'intensités de courant électrique

2.1. Intensité et section du conducteur

Plus la section d'un fil de longueur définie est grande, plus il renferme d'électrons libres.

Pour que les courants électriques à travers deux fils de *sections différentes* aient la *même intensité*, il faut que les électrons se déplacent à des *vitesses différentes* : dans un fil mince, les électrons sont plus rapides que dans un fil plus gros (voir figure VI.3).

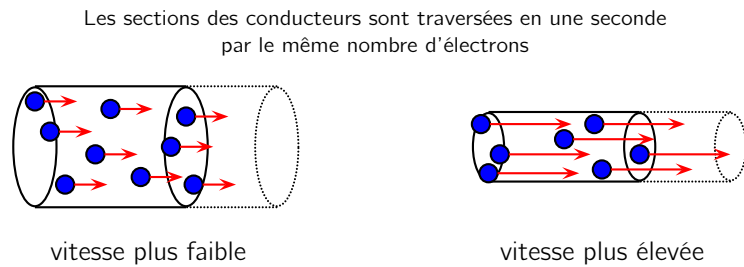


Figure VI.3. – différentes sections, même intensité de courant

2.2. Mesure de l'intensité du courant

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

L'ampèremètre est toujours branché **en série** dans la partie du circuit dans laquelle on veut connaître l'intensité du courant électrique. En effet le courant électrique doit passer par l'ampèremètre pendant la mesure.

Il doit être branché tel que le courant entre par sa prise marquée **A,+** (ou mA) et qu'il sorte par la prise marquée **COM,-** ou \perp .

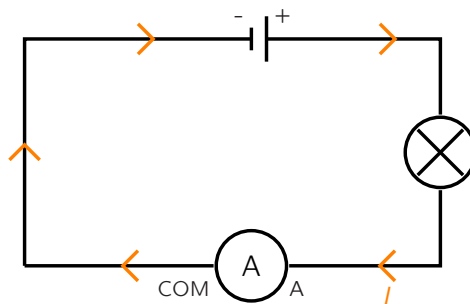


Figure VI.4. – Ampèremètre branché correctement

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, 100 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).

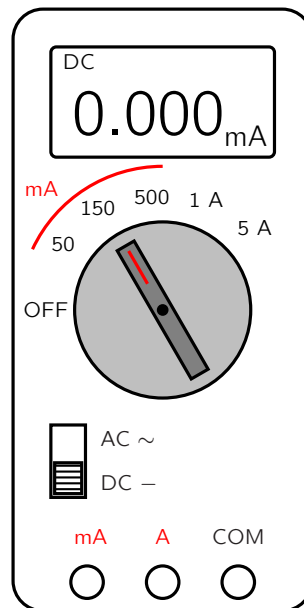


Figure VI.5. – Un ampèremètre numérique

Exemple :

A l'aide de l'ampèremètre de la figure VI.5, on veut connaître l'intensité d'un courant dont on sait que la valeur approximative se situe autour de 160 mA. On commence donc la mesure avec le calibre de 500 mA. Si on constate ensuite que le courant est inférieur à 150 mA, on peut passer au calibre de 150 mA et ainsi de suite.

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

2.3. Analogie avec un circuit d'eau

Afin de mieux comprendre la circulation du courant électrique, on peut comparer la circulation des électrons dans un circuit électrique à la circulation des molécules d'eau dans un circuit d'eau :

Dans le *circuit d'eau*, la pompe met les molécules d'eau en mouvement. Elles peuvent circuler à travers la conduite d'eau si la vanne est ouverte. Lorsqu'elles traversent une turbine, celle-ci commence à tourner. Le débit d'eau (quantité d'eau par seconde) peut être mesuré en n'importe quel endroit du circuit (il a partout même valeur) et correspond au nombre de molécules qui traversent une section donnée du circuit par seconde.

Dans le *circuit électrique*, la source de tension met les électrons en mouvement. Ils peuvent circuler à travers le câble électrique si l'interrupteur est fermé. Lorsqu'ils traversent un moteur électrique, celui-ci commence à tourner. L'intensité du courant (quantité de charge électrique

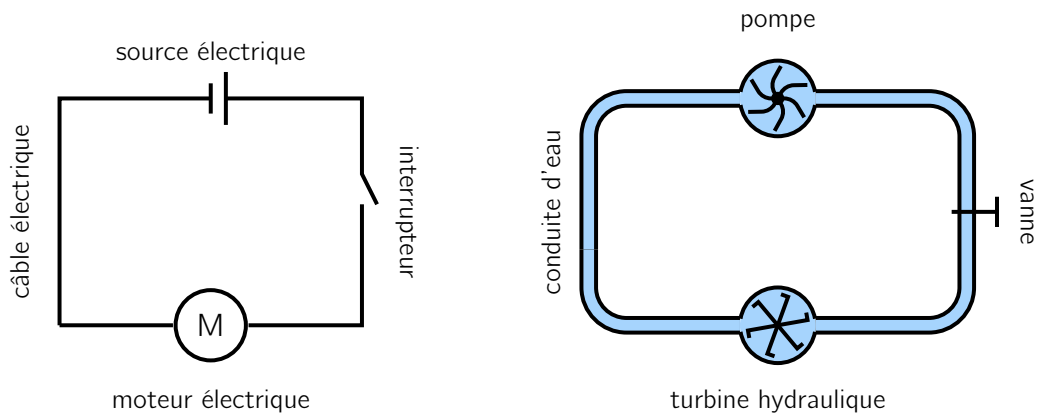


Figure VI.6. – Circuit électrique / Circuit d'eau

par seconde) peut être mesurée n'importe où dans le circuit (elle a partout même valeur) et correspond à la quantité de charge qui traverse une section donnée du circuit par seconde.

	circuit d'eau	circuit électrique
source d'énergie	pompe	source électrique
mise en marche / arrêt	vanne	interrupteur
moyen de transport	conduite d'eau	câble électrique
récepteur d'énergie	turbine	moteur électrique
débit	nombre de molécules/s	quantité de charge/s (intensité)

Tableau VI.2. – Analogies entre un circuit d'eau et un circuit électrique

Tout comme le circuit électrique, le circuit d'eau ne peut fonctionner que s'il est *fermé*. Si on veut avoir le même débit d'eau dans un tuyau étroit, il faut que les molécules d'eau se déplacent avec une vitesse plus élevée que dans un tuyau plus large.

3. mAh / Ah : deux autres unités de la charge électrique

D'après la définition VI.3, on sait que :

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

Si $I = 1 \text{ A}$ et $t = 1 \text{ h}$ (1 heure), on a :

$$Q = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ h} = 1 \text{ Ah}$$

1 Ah (prononcé ampère-heure) est une unité alternative de la charge électrique.

VI. Courant électrique et intensité du courant (Rappels de 4^e)

Comme $1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}}$ et $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$, on a :

$$1 \text{ A h} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ C}$$

De la même façon, on utilise le *mAh* (milliampère-heure).

$$1 \text{ mAh} = 0,001 \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ C}$$

Ces unités sont utilisées surtout pour indiquer la capacité (charge maximale) des piles ou accumulateurs.

Exemple :

La capacité typique de l'accumulateur d'une voiture vaut 90 Ah. Cela signifie que cet accumulateur peut délivrer un courant de 10 A pendant 9 h, un courant de 20 A pendant 4,5 h, un courant de 45 A pendant 2 h etc.

4. Lois des intensités en série et en parallèle

4.1. Le circuit en série

Considérons deux récepteurs (ici une ampoule et un moteur) placés en série dans un circuit électrique (voir figure VI.7). L'ampoule *L* est traversée par un courant I_1 , ce qui correspond à un certain nombre d'électrons passant par seconde à travers cette ampoule. Comme il ne peut pas y avoir de perte ou de gain d'électrons, le même nombre d'électrons va également traverser le moteur *M*. Il faut donc que dans un circuit en série, l'intensité du courant soit identique en tout point du circuit.

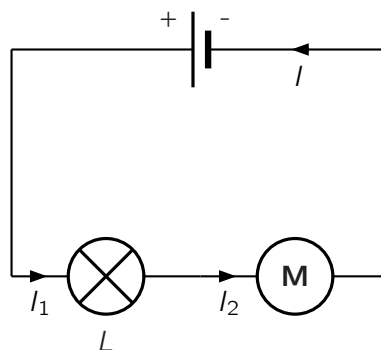


Figure VI.7. – Circuit en série

Enoncé VI.1 : Loi des intensités en série

Dans un circuit en série, l'intensité du courant électrique traversant chaque élément est la même :

$$I = I_1 = I_2 = \dots$$

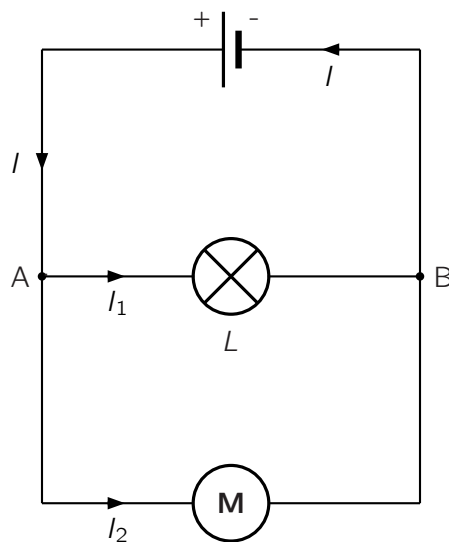
4.2. Le circuit en parallèle

Figure VI.8. – Circuit en parallèle

Considérons maintenant deux récepteurs placés en parallèle dans un circuit (voir figure VI.8). Au nœud A, le courant d'intensité I doit se répartir pour alimenter les deux récepteurs. Cette répartition ne se fait pas forcément en deux parties égales. Cependant, comme aucun électron n'est perdu en chemin, tous les électrons arrivant au nœud A passent soit par l'ampoule L , soit par le moteur M . Tous les électrons se rejoignent ensuite au nœud B pour reformer le courant initial. Il s'ensuit que l'intensité totale I est égale à la somme des intensités dans les deux branches en parallèle I_1 et I_2 .

Enoncé VI.2 : Loi des intensités en parallèle (Loi des nœuds)

Dans un circuit en parallèle, l'intensité du courant dans la branche principale est égale à la somme des intensités dans les branches dérivées :

$$I = I_1 + I_2 + \dots$$

On peut également dire que la somme des courants *entrant* dans un nœud est égale à la somme des courants *sortant* de ce nœud. C'est pourquoi ce résultat est aussi connu sous le nom de **loi des nœuds**.

Chapitre VII

Tension et puissance électrique

1. Transferts et transformations d'énergie dans un circuit électrique

Considérons un circuit avec une dynamo qui alimente une lampe ou un moteur :

- Le générateur propulse les électrons du pôle - vers le pôle +. Il effectue donc un travail. Dans le cas de la dynamo, l'énergie mécanique fournie par un opérateur (qui tourne la manivelle) est transformée en énergie électrique transférée aux électrons qui constituent le courant électrique.
- Lorsque les électrons arrivent à l'ampoule (respectivement au moteur), ils transfèrent leur énergie au récepteur et l'énergie sera transformée en énergie lumineuse (respectivement en énergie mécanique).

Comme en mécanique, on peut aussi définir une puissance en électricité qui représente le travail effectué par seconde, ou en d'autres termes l'énergie transférée ou transformée par seconde. Ainsi on peut par exemple définir la puissance de la dynamo comme énergie mécanique transformée en énergie électrique par seconde. De même la puissance d'un moteur représente l'énergie transférée par les électrons au moteur par seconde.

2. Tension électrique

2.1. Notion de tension électrique

On dit qu'il règne une tension électrique entre deux points d'un circuit électrique si, entre ces deux points, il y a un échange d'énergie entre les charges (qui véhiculent le courant électrique) et un récepteur ou générateur. Par analogie avec un circuit d'eau, on peut s'imaginer la situation suivante :

- Une pompe remonte l'eau à une certaine hauteur en effectuant un travail. Elle commu-

nique de cette façon une certaine énergie (potentielle de pesanteur) à l'eau. De même un générateur propulse les électrons à travers le circuit, comme s'ils étaient soumis à une différence de pression. Pour les mettre en mouvement, il faut que le générateur effectue un travail et transmette de l'énergie aux électrons. On dit alors qu'il règne une tension aux bornes du générateur.

- De l'eau qui tombe d'une certaine hauteur peut mettre en mouvement une turbine. Elle effectue un travail et transmet de l'énergie à la turbine. De même les électrons en passant à travers un récepteur donnent de l'énergie au récepteur et on observe alors une tension aux bornes de ce dernier.

Définition VII.1 : Tension électrique

On appelle tension électrique U entre deux points d'un circuit, l'énergie électrique échangée par unité de charge entre les composantes du circuit et les charges électriques :

$$U = \frac{E_{\text{él}}}{Q}$$

Unité SI : 1 V (volt)^a

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

^a. nom de l'unité en l'honneur d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien italien et inventeur de la première pile électrique

Attention !

Il faut clairement distinguer entre l'intensité et la tension. L'intensité indique en quelque sorte le « débit » des charges qui circulent dans un circuit électrique alors que la tension est une sorte de « pression électrique » qui existe entre deux points du circuit et avec laquelle les porteurs de charge sont propulsés par le générateur à travers le circuit électrique. On dit donc qu'**un courant circule à travers un appareil**, alors qu'**une tension règne aux bornes d'un appareil**. De même un courant ne circule que si le circuit est fermé, alors qu'une tension peut régner entre les pôles d'un générateur, ou aux bornes d'un interrupteur, alors que le circuit est ouvert.

2.2. Instrument de mesure

Une tension électrique est mesurée à l'aide d'un voltmètre (symbole voir figure VII.1). Il est branché en parallèle entre les deux points du circuit entre lesquels on veut relever la tension. L'entrée V est connectée à la borne reliée au pôle positif du générateur (donc la borne par laquelle entre le courant électrique) et l'entrée COM est connectée à la borne reliée au pôle négatif du générateur (la borne par laquelle sort le courant électrique).

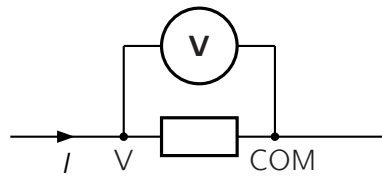


Figure VII.1. – Branchement d'un voltmètre

3. Lois des tensions

3.1. Circuit en série

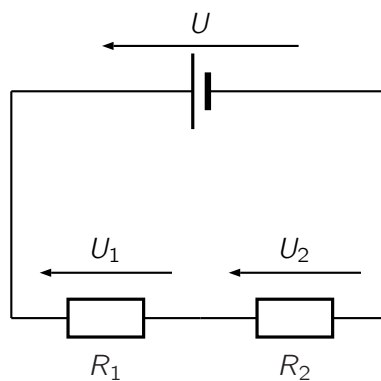


Figure VII.2. – Circuit en série

Considérons deux récepteurs placés en série dans un circuit électrique (voir figure VII.2). Chaque électron passant par le circuit a reçu une certaine quantité d'énergie du générateur. Il donne ensuite une partie de son énergie au premier récepteur et une partie au deuxième récepteur avant de retourner au générateur. Comme l'énergie par unité de charge est égale à la tension électrique, cela veut dire que :

$$U = U_1 + U_2$$

Enoncé VII.1 : Lois des tensions en série

Dans un circuit en série, la tension aux bornes de plusieurs récepteurs est égale à la somme des tensions aux bornes des différents récepteurs :

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

3.2. Circuit en parallèle

Considérons deux récepteurs placés en parallèle dans un circuit électrique (voir figure VII.3). Chaque électron ne passe que par un des deux récepteurs et il lui donne toute l'énergie qu'il a

reçue du générateur. En d'autres termes, comme l'énergie par unité de charge est égale à la tension, cela veut dire que la tension entre les deux nœuds A et B est la même, quelle que soit la branche considérée.

$$U = U_1 = U_2$$

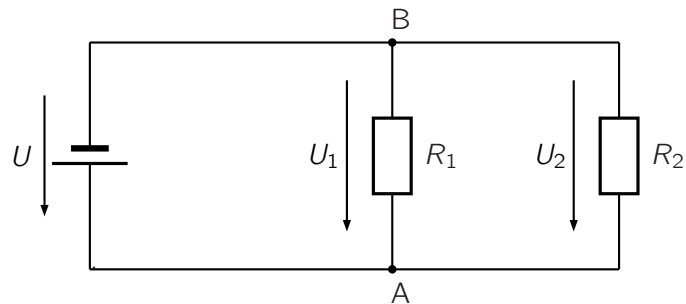


Figure VII.3. – Circuit en parallèle

Enoncé VII.2 : Lois des tensions en parallèle

Dans un circuit en parallèle, la tension aux bornes du générateur est égale à la tension aux bornes des différents récepteurs (la tension est la même entre deux nœuds considérés, quel que soit le chemin choisi entre ces nœuds) :

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots$$

4. Energie et puissance électrique

Comme nous l'avons déjà mentionné au point 1, la puissance électrique peut être traitée de façon analogue à la puissance mécanique. Elle représente l'énergie électrique transformée respectivement le travail effectué par unité de temps.

Définition VII.2 : Puissance électrique

On appelle puissance électrique \mathcal{P}_{el} le quotient de l'énergie électrique E_{el} échangée par la durée de temps Δt de cet échange :

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

Unité SI : 1 W (watt)

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

Si une énergie électrique de 1 J est transformée par seconde, une puissance électrique de 1 W est dissipée.

Compte tenu des définitions VI.3 et VII.1 , nous pouvons également écrire :

$$\mathcal{P}_{\text{él}} = \frac{E_{\text{él}}}{\Delta t} \Leftrightarrow \mathcal{P}_{\text{él}} = \frac{U \cdot Q}{\Delta t} \Leftrightarrow \mathcal{P}_{\text{él}} = U \cdot I$$

La puissance électrique peut donc également être définie comme le produit de la tension aux bornes d'un appareil et de l'intensité du courant qui le traverse. Inversement la tension électrique peut être considérée comme le quotient de la puissance électrique qui est échangée par l'intensité du courant qui traverse l'appareil.

Pour les unités, cela nous donne comme relations :

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V A} \quad \Leftrightarrow \quad 1 \text{ V} = 1 \frac{\text{W}}{\text{A}}$$

Nouvelle unité d'énergie

L'énergie électrique est souvent exprimée en kilowatt-heure (kWh) qui est une unité beaucoup plus grande que le joule :

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ W s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

5. Exercices supplémentaires

Exercice VII.1

La batterie d'un caméscope porte l'inscription « 2700 mAh ; 9,6 V ». Si elle est complètement chargée, on peut filmer pendant 50 minutes jusqu'à ce qu'elle soit vide.

1. A quelles grandeurs correspondent les inscriptions sur la batterie ? Que signifient les symboles (abréviations) utilisées ?
2. Quelles sont l'intensité et la puissance électrique de ce caméscope ?
3. Le chargeur utilisé pour recharger la batterie fonctionne avec un courant de 0,42 A. Combien de temps dure une recharge complète de la batterie ?

Exercice VII.2

Un restaurant utilise un four électrique branché à une tension de 230 V qui chauffe avec une puissance de 3,5 kW. Le restaurant est ouvert tous les jours et le four fonctionne en moyenne pendant 4h.

1. Quelle doit être l'intensité minimale supportée par le fusible qui doit protéger le four ?

VII. Tension et puissance électrique

2. Pour de grandes quantités d'énergie on utilise l'unité kilowatt-heure (kWh), qui correspond à l'énergie consommée par un appareil de puissance 1 kW fonctionnant pendant 1 h. Que vaut cette énergie en unités du S.I. ?
3. Quelle est le prix à payer pour l'énergie électrique utilisée par le four en une année entière ? (Prix actuel : 0,15 €/kWh)

Chapitre **VIII**

Relation entre tension électrique et intensité du courant électrique

La tension électrique U est la cause du courant électrique, respectivement le courant électrique est l'effet de la tension électrique. Dans ce chapitre nous allons rechercher un lien entre ces deux grandeurs.

1. La loi d'Ohm

1.1. Expérience

1.1.1. But

On étudie la variation de la tension U mesurée aux extrémités d'une composante électrique (p. ex. un résistor) en fonction de l'intensité I du courant qui la parcourt (figure VIII.1).

1.1.2. Dispositif expérimental

1.1.3. Tableau des mesures

→ voir mesures prises pendant les travaux pratiques

1.1.4. Observation et conclusion

La représentation graphique (figure VIII.2 et graphique établi en travaux pratiques) prend l'allure d'une droite passant par l'origine. La tension U aux bornes de la composante électrique et

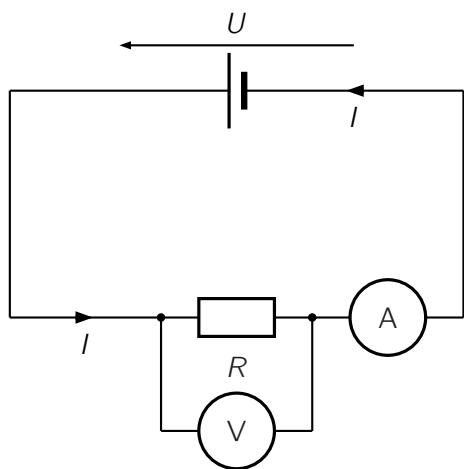


Figure VIII.1. – Montage expérimental

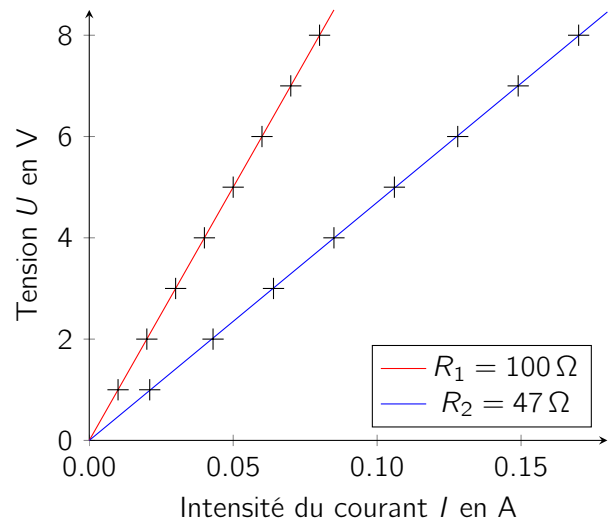


Figure VIII.2. – Diagramme U - I

l'intensité I du courant qui la parcourt varie proportionnellement si la température T du conducteur reste constante :

$$\text{si } T = \text{cte} : U \sim I$$

Le facteur de proportionnalité (constant) dépend du conducteur et est appelé la *résistance électrique* :

$$\frac{U}{I} = R = \text{facteur de proportionnalité constant}$$

Enoncé VIII.1 : Loi d'Ohm

Un conducteur obéit à la loi d'Ohm si et seulement si à température constante l'intensité du courant qui le traverse est proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes.

$$\text{si } T = \text{cte} : U \sim I$$

Remarques

1. La loi d'Ohm n'est pas valable pour un conducteur métallique dont la température varie notablement (p.ex. une lampe à incandescence)
2. Un conducteur qui vérifie la loi d'Ohm est appelé conducteur *ohmique*.
3. Il existe des conducteurs qui n'obéissent pas à cette loi : moteur électrique, électrolyseur, diodes, transistors, ...

2. La résistance électrique

Le courant électrique dans un fil métallique est constitué par un écoulement d'électrons. Or, dans un métal, comme dans tout autre solide, les atomes sont disposés régulièrement et ne peuvent quitter leur place fixe. Lorsqu'on applique une tension entre les extrémités du fil, les électrons libres se mettent en mouvement, mais ils se heurtent continuellement contre les ions qui se trouvent sur leur chemin (voir figure VIII.3).

Ceci se manifeste par une augmentation de l'agitation thermique des ions positifs du réseau métallique et donc de la température du fil (*effet thermique*). Comme les électrons perdent ainsi une partie de leur énergie en passant par ce fil, on dit que le fil oppose une *résistance* au passage des électrons.

Définition VIII.1 : Résistance électrique

On appelle résistance électrique la propriété des matériaux à s'opposer au déplacement des électrons. Quantitativement, la résistance R d'un récepteur est le rapport entre la tension U appliquée à ses bornes et l'intensité I du courant qui le traverse.

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

La résistance est mesurée en ohms (Ω) : $1\ \Omega = 1\ \frac{\text{V}}{\text{A}}$

Si une tension de 1 V appliquée aux bornes d'un conducteur génère un courant électrique d'intensité 1 A, la résistance électrique de ce conducteur vaut $1\ \Omega$.

Dans la suite nous allons étudier de plus près de quels facteurs peut dépendre cette résistance.

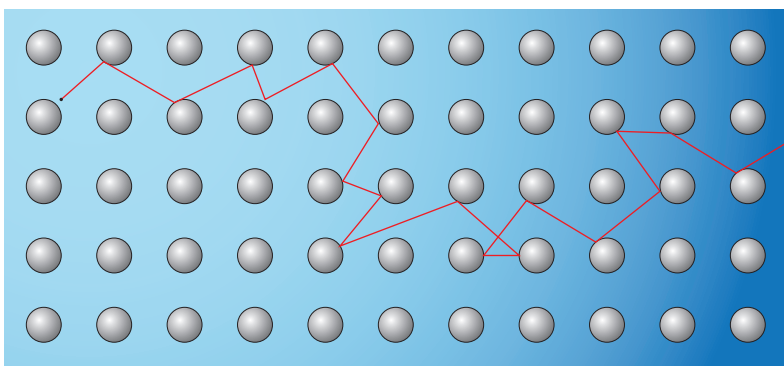


Figure VIII.3. – Trajectoire d'un électron dans le réseau métallique.

3. Facteurs influençant la résistance

Considérons un fil métallique de longueur ℓ et de section S . On applique une tension aux bornes du fil et on analyse comment l'intensité du courant varie si on modifie la longueur du fil, sa section ou encore sa température.

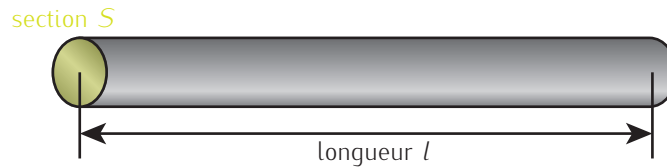


Figure VIII.4. – Géométrie d'un fil métallique

3.1. Influence de la longueur

On travaille avec des fils de même section, même matériau et à la même température. Nous appliquons une tension U aux bornes d'un fil de longueur ℓ . L'intensité du courant passant à travers le fil vaut : $I =$ _____.

Prenons maintenant un fil de longueur 2ℓ et refaisons la mesure : $I' =$ _____.

Nous constatons que si la longueur du fil double, l'intensité du courant qui passe à travers le fil (à tension constante) est _____. La résistance a donc été _____. Retenons que :

$$R \sim \ell \quad (\text{si } S, T \text{ et matériau constants})$$

3.2. Influence de la section

D'une manière analogue à l'expérience précédente, faisons passer un courant à travers des fils métalliques d'un même matériau, de même longueur et de même température, mais de diamètres et donc de sections différents.

Intensité pour un diamètre d : $I =$ _____

Intensité pour un diamètre $2d$: $I' =$ _____

Remarquons d'abord que si le diamètre d'un fil (cylindrique) est doublé, alors sa section est multipliée par 4. En observant nos mesures, nous constatons que si la section est quadruplée, alors l'intensité du courant est _____. Ceci signifie que la résistance du fil a été _____. Retenons que :

$$R \sim \frac{1}{S} \quad (\text{si } \ell, T \text{ et matériau constants})$$

3.3. Influence du matériau

En répétant l'expérience avec 2 fils de même longueur et de même section, mais constitués de matériaux différents, on remarque que la résistance électrique est différente.

3.4. Résistivité

En combinant les deux proportionnalités (3.1 et 3.2) il vient :

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

En introduisant une constante de proportionnalité ρ qui dépend du matériau du conducteur et qui est appelée *résistivité* on peut formuler la définition suivante :

Définition VIII.2 : Résistivité d'un matériau

Un fil métallique de résistance R , de section S et de longueur ℓ est caractérisé par sa résistivité ρ qui dépend du matériau et de la température, tel que :

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \quad \Leftrightarrow \quad \rho = R \cdot \frac{S}{\ell}$$

Unité SI : 1 ohm-mètre ($1 \Omega \text{ m}$)

Unités usuelles

L'unité standard du SI étant très grande, on exprime souvent la résistivité en $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$.

Conversion : $1 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{ m}$

Application : le rhéostat (résistance variable, voir figure VIII.5)



Figure VIII.5. – Rhéostat

Un fil isolé est enroulé sur un cylindre en céramique. Le fil est nu (non enrobé d'une isolation) à l'endroit où il est en contact avec le curseur. Explique le fonctionnement d'un tel rhéostat.

Tableau VIII.1. – Résistivité de certains métaux à 20 °C

matériau	ρ en $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$	matériau	ρ en $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$
argent	0,016	zinc	0,12
cuivre	0,017	acier	ca. 0,13
or	0,020	plomb	0,21
aluminium	0,027	constantan	0,50
tungstène	0,055	mercure	0,96
nickel	0,087	chrome-nickel	1,10
fer	0,10	graphite	8,0
platine	0,11	carbone	50...100

3.5. Résistance et température

Comme mentionné au début du chapitre, les électrons libres subissent tout au long de leur parcours à travers le fil conducteur des chocs avec les ions. Ils cèdent donc une partie de leur énergie cinétique aux ions. 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. C'est ce qu'on appelle l'*effet Joule* (effet thermique, effet calorifique).

Or la température du métal a une influence sur sa résistance électrique : plus les ions du métal s'agitent, plus le passage des électrons libres devient difficile.

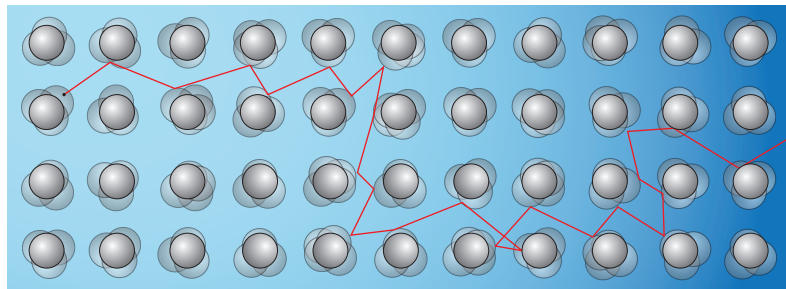


Figure VIII.6. – L'agitation thermique des ions métalliques ralentit le passage des électrons.

Prenons un fil de fer et mesurons sa résistance s'il est froid, respectivement s'il est chaud. Nous constatons que la résistance est d'autant plus élevée que la température du fil est grande. La résistivité ρ et par conséquent aussi la résistance R d'un conducteur est donc aussi dépendante de la température T .

Remarque

Le constantan est un alliage (55% cuivre, 45% nickel) dont la résistivité est quasiment indépendante de la température.

4. Exercices supplémentaires

Exercice VIII.1

La spirale de chauffage d'un barbecue électrique délivre une puissance de 1800 W. En mesurant sa résistance, on obtient $7,35 \Omega$.

1. Déterminer l'intensité et la tension à laquelle fonctionne cet appareil.
(Résultats : $I = 15,65 \text{ A}$; $U = 115 \text{ V}$)
2. Si on utilise le barbecue pendant 3 heures, quel sera le prix à payer pour l'énergie électrique consommée ? (Prix actuel : $0,15 \text{ €/kWh}$)
(Résultat : $0,81 \text{ €}$)
3. Combien d'électrons vont passer par la spirale de chauffage pendant ce temps ?
(Résultat : $1,05 \cdot 10^{24}$ électrons)

Exercice VIII.2

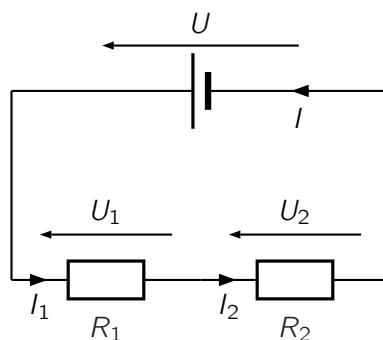
La spirale de chauffage d'un sèche-cheveux est formée d'un fil métallique de résistivité $0,40 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$, de longueur 86 cm et de 0,1 mm de diamètre.

1. Déterminer la résistance du fil chauffant. (Résultat : $R = 43,8 \Omega$)
2. Sachant que le sèche-cheveux fournit une puissance de 1200 W déterminer la tension et l'intensité auxquelles il fonctionne.
(Résultats : $I = 5,23 \text{ A}$; $U = 229 \text{ V}$)

Chapitre IX

Lois générales des circuits électriques

1. Le circuit en série



Considérons un circuit comprenant une pile et deux résistors de résistance R_1 respectivement R_2 branchés en série. La tension aux bornes d'un résistor peut être considérée comme énergie fournie au résistor par unité de charge électrique. Il s'ensuit que dans un circuit en série, où chaque électron doit donner plusieurs fois de l'énergie à un récepteur, la tension totale est égale à la somme des tension aux bornes des différentes composantes :

$$U = U_1 + U_2$$

D'autre part, comme chaque électron passe par toutes les composantes du circuit, la quantité de charge électrique qui passe par seconde dans le circuit est la même en tout point du circuit. Ceci signifie que pour l'intensité, on aura :

$$I = I_1 = I_2$$

Imaginons maintenant qu'on remplace les deux résistors par un seul qui aura le même effet sur le circuit que les deux autres résistors ensemble. L'intensité du courant dans le circuit ainsi que

la tension totale resteront la même. La résistance de ce résistor s'appelle *résistance équivalente*. En utilisant la loi d'Ohm, on établit la relation suivante :

$$\begin{aligned}U &= U_1 + U_2 \\R \cdot I &= R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 \\R \cdot I &= (R_1 + R_2) \cdot I \\R &= R_1 + R_2\end{aligned}$$

Dans un circuit contenant plusieurs résistors en série, de résistances R_1, R_2, \dots, R_n , la résistance équivalente R du branchement est égale à la somme de ces résistances :

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$

La résistance équivalente R d'un branchement en série est par conséquent plus élevée que chacune des résistances R_j qui la constituent.

En résumé, on obtient donc pour le circuit en série :

Loi des tensions :	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$
Loi des intensités :	$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$
Loi des résistances :	$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

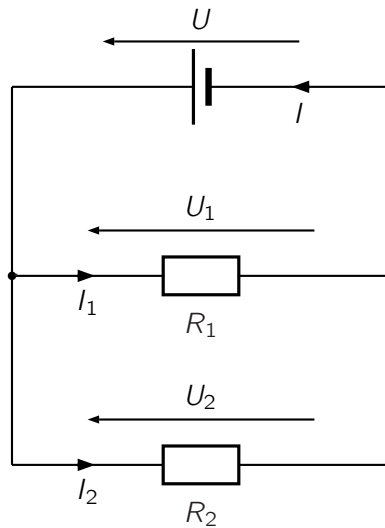
2. Le circuit en parallèle

Considérons un circuit comprenant une pile et deux résistors de résistance R_1 respectivement R_2 branchés en parallèle. Dans un montage en parallèle chaque électron ne donne qu'une seule fois de l'énergie à un récepteur, la tension fournie par le générateur est donc égale à celle aux bornes de chacune des deux résistances :

$$U = U_1 = U_2$$

D'autre part, comme le flux d'électrons doit se partager entre les deux résistors, la charge électrique qui passe par seconde dans une branche du circuit dépend de la résistance dans cette branche. Cependant, le nombre d'électrons, et donc la charge électrique, qui part par seconde du générateur, est égale à celle qui rentre dans le générateur à l'autre pôle. Ceci signifie que pour l'intensité, on aura :

$$I = I_1 + I_2$$



Déterminons maintenant de nouveau la *résistance équivalente* d'un résistor qui remplacerait les deux résistors placés en parallèle. En combinant la loi d'Ohm avec les deux relations précédentes, on établit que :

$$\begin{aligned}
 I &= I_1 + I_2 \\
 \frac{U}{R} &= \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} \\
 \frac{U}{R} &= U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \\
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}
 \end{aligned}$$

Dans un circuit contenant plusieurs résistors en parallèle, de résistances R_1, R_2, \dots, R_n , l'inverse de la résistance équivalente R du branchement est égale à la somme des inverses de ces résistances :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

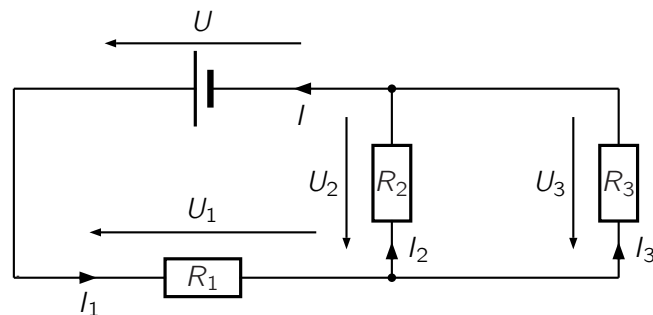
La résistance équivalente R d'un branchement en parallèle est par conséquent plus faible que chacune des résistances R_i qui la constituent. En résumé, on obtient donc pour le circuit en parallèle :

Loi des tensions :	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$
Loi des intensités :	$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$
Loi des résistances :	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

3. Exercices supplémentaires

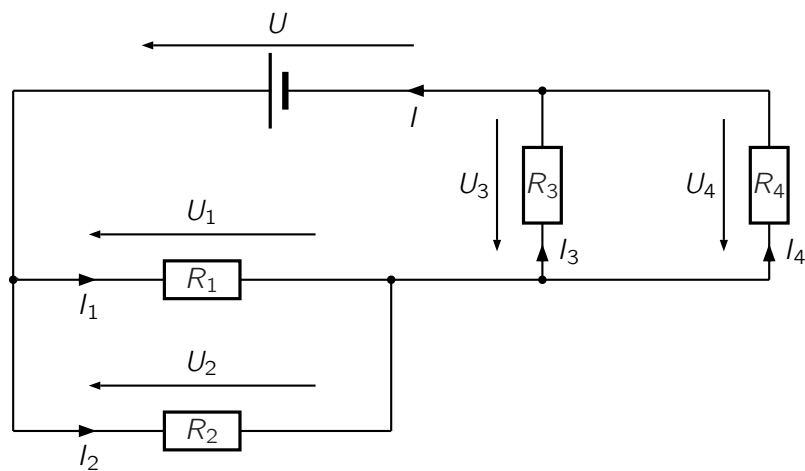
Exercice IX.1

Dans le circuit suivant déterminer les courants dans les différentes branches du circuit, ainsi que les tensions aux bornes de chaque résistor. On donne : $U = 12\text{ V}$; $R_1 = 3\ \Omega$; $R_2 = 6\ \Omega$; $R_3 = 8\ \Omega$.



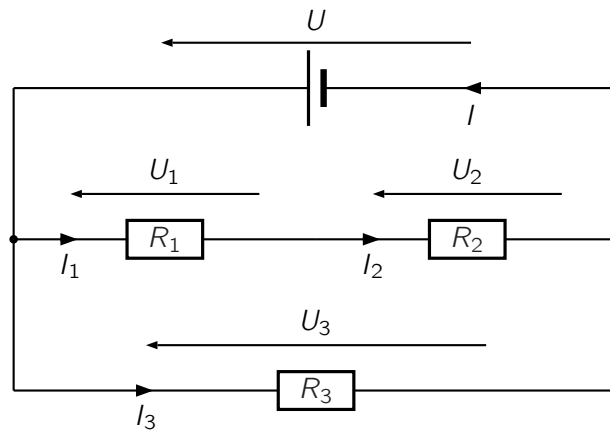
Exercice IX.2

Dans le circuit suivant déterminer les courants et tensions manquants ainsi que la valeur de la résistance R_2 . On donne : $I = 3\text{ A}$; $R_1 = 4\ \Omega$; $R_3 = 4\ \Omega$; $R_4 = 6\ \Omega$; $U_1 = 2\text{ V}$.



Exercice IX.3

Dans le circuit suivant déterminer les courants et tensions manquants ainsi que la valeur de la résistance R_3 . On donne : $U = 3\text{ V}$; $R_1 = 6\ \Omega$; $R_2 = 2\ \Omega$; $I_3 = 0,5\text{ A}$.

**Exercice IX.4**

Dans un circuit alimenté par une tension de 230 V, on veut placer deux ampoules électriques portant les inscriptions suivantes : « 115 V ; 100 W » respectivement « 115 V ; 60 W ». On dispose en plus d'un rhéostat (résistance variable, réglable de $0\ \Omega$ à $500\ \Omega$).

1. Comment faut-il construire le circuit pour qu'il puisse fonctionner (schéma) ?
2. Quelle sera l'intensité du courant à travers le circuit ?
3. A quelle valeur faut-il régler le rhéostat pour que le circuit fonctionne correctement ?

Troisième partie
Thermodynamique

Température et modèle corpusculaire

1. Agitation thermique

Observations :

- les disques de freinage d'une voiture s'échauffent lorsqu'on freine
- la mèche (*Bohrer*) d'une perceuse s'échauffe lorsqu'on fore un trou dans le mur
- les mains s'échauffent si on les frotte l'une contre l'autre

Conclusion :

Un corps peut s'échauffer sans qu'on l'approche d'une source de chaleur, en le frottant p.ex. contre un autre corps.

Explication :

Tout corps est constitué de minuscules particules (atomes, ions, molécules) qui ne sont pas immobiles, mais en *agitation permanente*. En 1827, Robert Brown¹ a observé en premier ce phénomène en s'intéressant au pollen de fleurs, qu'il regardait sous le microscope. Les grains de pollen ne restaient pas immobiles, mais étaient animés d'un mouvement désordonné continu. Ce n'est que 60 ans plus tard qu'on a compris qu'en fait le pollen était mis en mouvement par les chocs des molécules d'eau qui l'entouraient. Cette agitation moléculaire porte aussi le nom de *mouvement brownien*.

En analysant plus en détail ce phénomène (début du 20^e siècle), on constate que la vitesse moyenne des corpuscules dépend de la température. Plus elles sont rapides, plus la température du corps est élevée. C'est pourquoi cette agitation qui dépend de la température est aussi appelée *agitation thermique*. On peut ainsi chauffer un corps en augmentant le mouvement des particules qui le constituent. En d'autres termes, **la température d'un corps nous renseigne**

1. médecin et botaniste anglais, 1773–1858

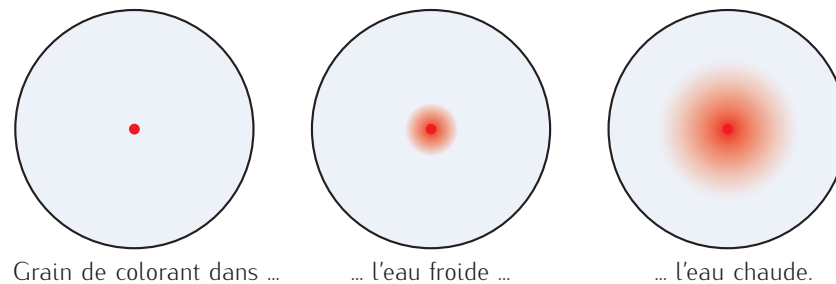


Figure X.1. – Expérience mettant en évidence le mouvement brownien

sur la vitesse moyenne des particules qui le forment et donc sur leur énergie cinétique.

Ce principe s'illustre très bien à l'aide de l'expérience de la figure X.1. Nous constatons que le grain (respectivement la goutte) de colorant se dissout plus rapidement dans l'eau chaude que dans l'eau froide. En effet, les particules de l'eau chaude ont une énergie cinétique et donc une vitesse plus élevée que celles de l'eau froide. Les collisions avec les molécules du colorant sont plus intenses et le colorant est mis en mouvement plus rapidement.

2. Etats d'un corps (états d'agrégation)

Selon les conditions de température et de pression, un corps peut se retrouver dans 3 états (d'agrégation), qui se distinguent selon le comportement des particules qui le composent :

Etat solide : chaque particule occupe une place fixe autour de laquelle elle effectue des oscillations et chaque particule est liée par des forces intenses à ses voisines, appelées *forces de cohésion*.

Etat liquide : les particules glissent les unes sur les autres, mais il reste une forte cohésion entre elles. Ceci explique par exemple la formation d'une surface de séparation entre deux milieux (p.ex. air-eau), et les phénomènes liés à la tension superficielle (*Oberflächenspannung*).

Etat gazeux : il y a un déplacement désordonné des particules dans tout l'espace disponible. Les grandes distances entre les particules font disparaître les forces d'attraction.

3. Le zéro absolu et les échelles de température

A mesure que la température baisse, l'agitation des particules diminue. A un moment elles vont finir par s'immobiliser complètement, ce qui explique qu'il doit y avoir une limite inférieure à la température. Cette limite est appelée le *zéro absolu*. Il se situe à $-273,15^{\circ}\text{C}$.

L'échelle de Celsius, inventée en 1742 par Anders Celsius², est la plus utilisée dans nos régions

2. astronome et physicien suédois, 1701–1744

pour la mesure d'une température. Elle est basée sur les deux « points fixes » suivants :

- 0 °C correspond à la température de fusion de la glace
- 100 °C correspond à la température d'ébullition de l'eau à une pression d'une atmosphère au niveau de la mer

Physiquement il serait cependant plus judicieux d'utiliser une échelle de température *basée sur le mouvement des particules*. Ainsi, sur cette échelle, le zéro correspondrait à la température pour laquelle il n'y a plus de mouvement, ce qui semble plus logique. Cette échelle est appelée « échelle de Kelvin³ » et correspond en fait à l'échelle de Celsius, mais décalée tel que le zéro de l'échelle corresponde au zéro absolu :

- 0 K = -273,15 °C
 - Une différence de température de 1 K correspond également à une différence de 1 °C.
 - On utilisera dans la suite le symbole θ pour indiquer une température en degrés Celsius, et T pour une température en kelvins, encore appelée la *température thermodynamique*.
- Attention :** l'unité kelvin n'est jamais précédée du terme (respectivement du signe) degré !
- Conversion entre les deux échelles :

$$T = \theta \frac{\text{K}}{^\circ\text{C}} + 273,15 \text{ K}$$

$$\text{mais } \Delta T = \Delta \theta$$

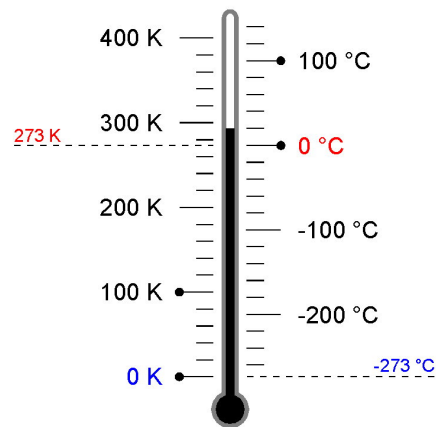


Figure X.2. – Echelles de Kelvin et de Celsius

3. d'après Lord Kelvin, William Thomson, physicien et ingénieur anglais, 1824–1907

Chapitre XI

Energie interne

1. Origine et définition de l'énergie interne

Au chapitre précédent, nous avons remarqué qu'un corps peut se réchauffer rien que par le biais du travail des forces de frottement, donc sans l'approcher d'une source de chaleur. Ces forces effectuent un travail, mais le corps n'a été ni accéléré, ni levé à une certaine altitude. L'énergie mécanique n'a donc pas changée. Où est alors passée l'énergie qui a été transférée au corps via le travail des forces de frottement ?

Nous avons constaté que suite aux frottements appliqués à un corps, la température du corps a augmenté. Le travail des forces de frottement a donc augmenté *l'énergie cinétique* des particules du corps. En plus, nous savons qu'un corps se dilate en se réchauffant. En chauffant un corps, on doit donc effectuer un travail contre les forces de cohésion de la matière. Ce travail donne aux particules une énergie qui est *due à leur position relative* les unes par rapport aux autres.

Définition XI.1 : Energie interne

L'énergie totale emmagasinée dans un corps sous forme d'énergie cinétique des particules d'une part et de leur énergie de position d'autre part est regroupée sous le terme *énergie interne* U .

$$U = \sum E_{c \text{ particules}} + \sum E_{p \text{ particules}}$$

2. Relation entre énergie interne et température

Etant donné que la vitesse et donc l'énergie cinétique des particules augmente avec la température, l'énergie interne d'un corps augmente également avec la température. En plus, l'augmentation de la distance entre les particules (dilatation) mène à une augmentation de

l'énergie de position. On peut donc retenir de façon générale que l'énergie interne d'un corps augmente si la température du corps augmente.

Mais attention : énergie et température sont des grandeurs physiques bien distinctes ! En apportant la même énergie à deux corps de masses différentes, la variation de température sera évidemment différente pour les deux corps.

3. Conservation de l'énergie

Comme les forces de frottement sont omniprésentes sur Terre, une partie de l'énergie mécanique est toujours « perdue » lors des transformations et transferts d'énergie (voir chapitre sur la mécanique). Cette énergie est dissipée sous forme de chaleur et se retrouve comme énergie interne dans les corps. Le principe de la conservation de l'énergie reste cependant valable, il faut seulement tenir compte du frottement :

L'énergie ne se perd pas, l'énergie ne se crée pas, elle se transforme.

4. La chaleur

On a vu dans le chapitre de l'énergie mécanique que le travail est un *mode de transfert d'énergie*. Ainsi on peut réchauffer un corps, donc augmenter son énergie interne, par le travail des forces de frottement. Cependant nous pouvons aussi réchauffer un corps en l'approchant d'un autre corps à température plus élevée, qu'on appelle alors une *source de chaleur*.

Dans ce cas, aucun travail visible n'est effectué, mais l'énergie passe *spontanément* du corps chaud vers le corps froid, jusqu'à ce que les deux corps aient atteint la même température qu'on appelle alors la *température d'équilibre*. La cause de ce transfert d'énergie interne est la différence de température entre les deux corps.

On appelle *quantité de chaleur*, notée Q , l'énergie interne qui est transférée d'un corps à l'autre. La chaleur est un mode de transfert d'énergie interne. Elle est en thermodynamique l'équivalent de ce qu'était le travail en mécanique.

Exercices

1. Expliquez ce qui se passe du point de vue corpusculaire lorsque deux corps de températures différentes sont mis en contact, respectivement mélangés.
2. Expliquer par le modèle corpusculaire la mesure de température à l'aide d'un thermomètre.
3. Si vous mettez une pincée de sel dans un verre d'eau chaude, toute l'eau aura le goût du sel après quelques minutes, même si vous ne remuez pas. Expliquez.

Chapitre XII

Calorimétrie

1. Chaleur massique

De quoi peut dépendre la quantité de chaleur à fournir à un corps pour lui imposer une certaine variation de température ? Un raisonnement logique, mais aussi les expériences réalisées en classe respectivement pendant les travaux pratiques nous conduisent aux résultats suivants :

La quantité de chaleur Q reçue ou cédée par un corps est proportionnelle à

- la variation de température du corps $\Delta\theta$
- la masse du corps m

Q est donc proportionnel au produit $m \cdot \Delta\theta$ et le rapport $\frac{Q}{m \cdot \Delta\theta}$ est constant.

Définition XII.1 : Capacité thermique massique

On appelle *capacité thermique massique* ou *chaleur massique* c d'une substance le rapport

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\theta}$$

où Q représente la chaleur reçue ou cédée par le corps, m sa masse et $\Delta\theta$ sa variation de température.

La chaleur massique dépend du matériau et elle représente l'énergie qu'il faut fournir à un corps de masse 1 kg pour élever sa température de 1 K.

Son unité est le $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

Remarque

Dans certaines situations, un corps peut être composé de différentes parties, toutes en différents matériaux, ce qui peut rendre les calculs compliqués. Par exemple pour un calorimètre, on a la

paroi autour du récipient, le couvercle plus un bouchon, éventuellement un thermomètre, un mélangeur, une spirale de chauffage... Le plus simple est alors de décrire le corps entier par une seule valeur : on définit ainsi une *capacité thermique* C telle que :

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta}$$

exprimée en $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Il s'agit en quelque sorte de la somme de tous les produits $m \cdot c$ des différentes parties du corps.

2. Chaleurs latentes

Pour les changements d'état, la situation est légèrement différente : on apporte ou enlève de l'énergie à un corps, mais sans observer de variation de température ! Logiquement, l'énergie à apporter ou à enlever à un corps pour qu'il fasse un changement d'état doit être proportionnelle à la masse du corps et dépendre du matériau considéré.

2.1. Fusion et solidification

Comme le processus de fusion se fait à température constante, appelée *température de fusion*, l'énergie cinétique des particules ne varie pas. Où est donc passée l'énergie qu'on a fournie au corps ?

En fait elle correspond à l'énergie nécessaire pour séparer les particules, c'est-à-dire pour effectuer un travail contre les forces de liaison qui maintiennent les particules à leurs positions fixes dans l'état solide. Elle se retrouve donc sous forme d'énergie de position dans le corps et contribue à l'augmentation de l'énergie interne du corps.

Définition XII.2 : Chaleur latente de fusion

On appelle *chaleur latente de fusion*, et on note L_f , le quotient de la quantité de chaleur Q_f à fournir à un corps pour le faire fondre divisée par la masse fondue m .

$$L_f = \frac{Q_f}{m}$$

Elle est exprimée en $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Lors de la solidification, un corps cède exactement la même quantité d'énergie qu'il a absorbé lors de sa fusion. La chaleur latente de solidification a même valeur que la chaleur latente de fusion.

2.2. Vaporisation et condensation

De même que pour le passage solide-liquide, le passage liquide-gaz se fait également à température constante, appelée *température d'ébullition*.

Définition XII.3 : Chaleur latente de vaporisation

On appelle *chaleur latente de vaporisation*, et on note L_v , le quotient de la quantité de chaleur Q_v à fournir à un corps pour le faire passer de l'état liquide à l'état gazeux divisée par la masse m transformée en vapeur.

$$L_v = \frac{Q_v}{m}$$

Elle est exprimée en $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

On peut de nouveau se poser la question où est passée l'énergie investie pour ce changement d'état, étant donné que la température n'a pas varié. A l'intérieur d'un liquide, les forces attractives agissant sur chaque particule se compensent mutuellement. Les particules se trouvant à la surface du liquide ne sont cependant attirées que par les particules se trouvant en dessous d'elles (\rightarrow origine de la tension superficielle). C'est pourquoi une particule qui veut quitter le liquide doit vaincre les forces d'attraction des particules voisines. L'énergie fournie a donc été utilisée pour organiser différemment les particules et elle se retrouve sous forme d'énergie interne dans la vapeur produite.

Lors de la condensation, un corps cède exactement la même quantité d'énergie qu'il a absorbé lors de sa vaporisation. La chaleur latente de condensation a même valeur que la chaleur latente de vaporisation.

3. Détermination de la température d'équilibre

Supposons qu'on mélange deux substances de températures initiales différentes dans un récipient qui est thermiquement isolé de l'extérieur (on parle souvent d'un *calorimètre*). Dans ce cas, il n'y a ni pertes de chaleur vers l'extérieur, ni apports de chaleur de l'extérieur. La conservation de l'énergie nous amène donc à dire que la somme de toutes les chaleurs échangées dans le système doit être nulle. La chaleur $Q_c < 0$ cédée par le corps chaud est égale en valeur absolue à la chaleur $Q_r > 0$ reçue par le corps froid :

$$Q_c + Q_r = 0 \quad (\text{en absences de pertes})$$

En remplaçant ensuite les données dans cette relation, on peut aisément déduire la température d'équilibre atteinte par le mélange.

Chapitre XIII

Transferts de chaleur

En général il y a des différences de température entre les différentes parties d'un corps, respectivement entre plusieurs corps formant un système. On observe alors un transport de la chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid jusqu'à ce qu'ils aient atteint la même température. Ce transport peut se faire de trois manières différentes que nous allons détailler dans la suite : par conduction, par convection et par rayonnement.

1. La conduction de chaleur (Wärmeleitung)

Expérience

De petites billes en acier sont fixées à l'aide de cire sur plusieurs tiges métalliques disposées en forme d'étoile autour d'un anneau central. On place le milieu de ce dispositif au-dessus d'une flamme.

Observations

Après quelque temps, les billes commencent à tomber. Selon le matériau auquel elles sont fixées, cela dure plus ou moins longtemps.

Conclusion

La cire a fondu, ce qui fait tomber les billes en acier. La chaleur s'est donc propagée du centre (extrémité chaude) vers l'extérieur (extrémité froide) des tiges métalliques, à une vitesse différente selon le matériau. L'agitation thermique plus intense au centre s'est transmise par des collisions aux atomes voisins. Cette méthode de transport de la chaleur est appelée *conduction*

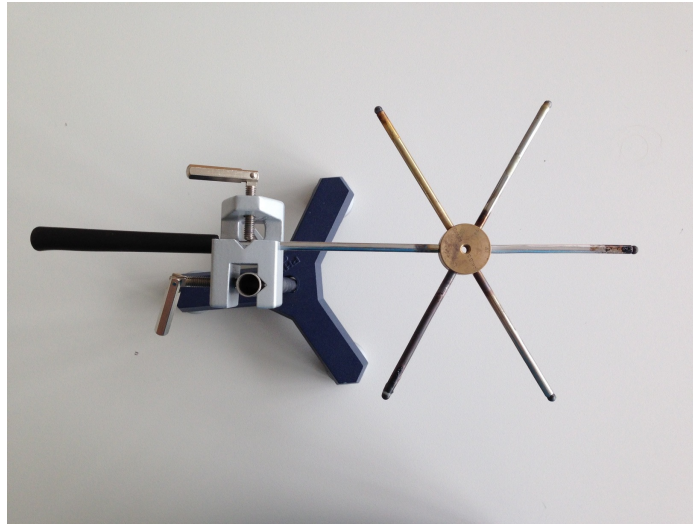


Figure XIII.1. – Conduction de la chaleur

Définition XIII.1 : Conduction de la chaleur

On appelle conduction de chaleur le mode de transfert de la chaleur dans lequel l'énergie interne est transmise de proche en proche, par agitation thermique et collisions entre particules, sans transport de matière.

La conductivité thermique dépend fortement des matériaux. Alors que les métaux (argent, cuivre, aluminium, fer, ...) sont en général de bons conducteurs thermiques, on connaît aussi de mauvais conducteurs comme le bois, le verre, la laine, le styropor ainsi que les gaz. C'est pourquoi on les utilise en tant qu'isolants thermiques (p.ex. laine de roche).

2. Convection de chaleur (Wärmeströmung)

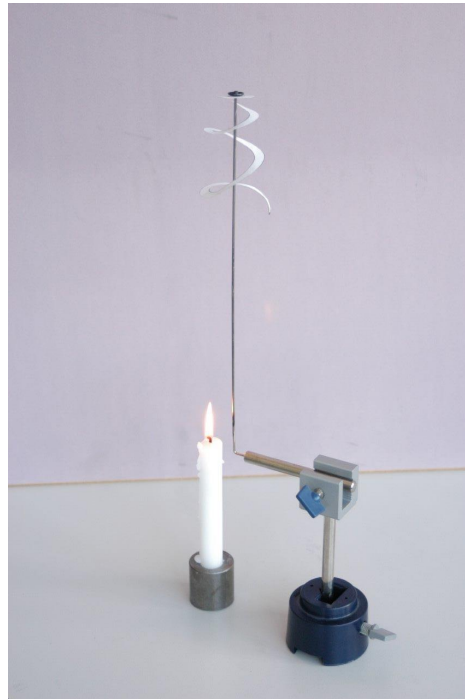
Pour faire circuler l'eau à travers les conduites d'une installation de chauffage on utilise généralement une pompe. Cependant cette circulation fonctionne aussi de façon autonome, comme le montre l'expérience suivante.

Expérience

Un tube en verre de forme rectangulaire est rempli d'eau à laquelle on ajoute quelques gouttes de colorant. Le cadre est fixé verticalement et on place un brûleur à gaz en dessous d'une extrémité inférieure.



(a) Convection dans un liquide



(b) Convection dans un gaz

Figure XIII.2. – Expériences sur la convection

Observations

L'eau commence à se déplacer dans le tube : elle monte au niveau du brûleur à gaz et redescend de l'autre côté. On parle d'un *courant de convection*.

Interprétation

Le volume de l'eau augmente lors du chauffage et donc sa masse volumique diminue. L'eau chaude est plus « légère » que l'eau froide et monte dans le tube. En haut, elle se refroidit en transmettant de la chaleur au milieu environnant, devient de nouveau plus « lourde » et redescend. Cette méthode de transport de la chaleur est appelée *convection*

Définition XIII.2 : Convection de chaleur

On appelle convection de chaleur le mode de transfert de la chaleur dans lequel l'énergie thermique est transmise par circulation d'un fluide (liquide ou gaz) et est donc accompagné par un transport de matière.

Dans la vie courante on retrouve ce mode de transfert par exemple dans les installations de chauffage, les mouvements d'air dans l'atmosphère ou encore le courant d'air dans une tour de refroidissement.

3. Rayonnement thermique

Aussi bien la conduction que la convection nécessitent la présence de matière, que ce soit de la matière immobile dans le cas de la conduction ou de la matière en mouvement pour la convection. L'énergie provenant du Soleil ne peut donc pas être transportée par conduction ou convection. Il doit exister un troisième mode de transfert de la chaleur qui se fait sans présence de matière.

Expérience

Deux miroirs paraboliques sont placés face à face à une distance d'environ un mètre. Une ampoule électrique est placée devant un des miroirs, et devant l'autre on place une allumette. Puis on allume l'ampoule électrique.

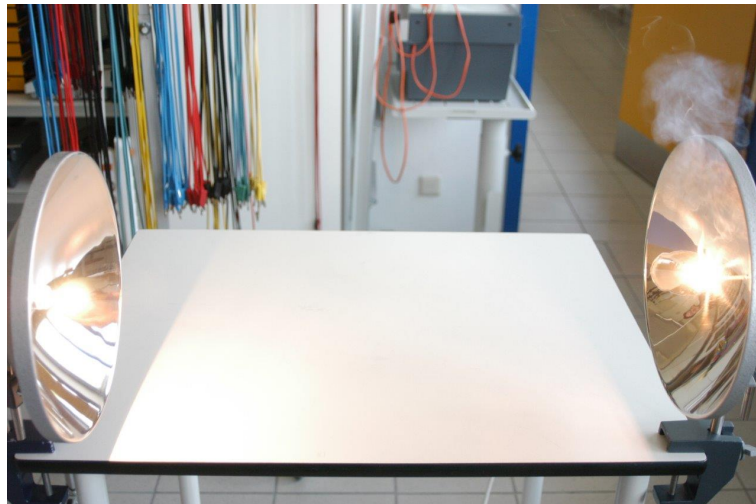


Figure XIII.3. – Expérience sur le rayonnement thermique

Observations

L'allumette commence à chauffer, on observe de la fumée qui se forme à son bout et après quelque temps, elle prend feu.

Interprétation

L'énergie thermique qui est rayonnée par l'ampoule électrique est réfléchiée d'un miroir à l'autre, puis concentrée sur l'allumette. Cette méthode de transport de la chaleur est appelée *rayonnement thermique*.

Définition XIII.3 : Rayonnement thermique

On appelle rayonnement thermique le transport de l'énergie rayonnée par un corps et qui est due à sa température. Le transfert de chaleur par rayonnement se fait sans faire intervenir de matière.

L'exemple le plus important de ce phénomène est certainement l'énergie du Soleil qui nous provient à travers un vide d'environ 150 millions de kilomètres.

L'émission et l'absorption du rayonnement par un corps dépendent de la surface du corps : un corps noir par exemple absorbe plus d'énergie par rayonnement qu'un corps de couleur claire.

4. Isolation thermique

Pour isoler efficacement un corps, il faut veiller à éviter tout transport de chaleur entre le milieu extérieur et le corps (dans un sens et dans l'autre). Il faut donc empêcher au mieux le fonctionnement des trois modes de transfert de chaleur qu'on vient de voir.

- Pour éviter les transports par conduction, on utilise des matériaux qui sont de mauvais conducteurs, comme le bois, le plastique ou le styropor. Pensez par exemple aux manches des instruments de cuisson (poêles, casseroles etc.). Les parois d'une bouteille thermos sont par exemple formées de deux parois entre lesquelles il y a un vide, qui est le meilleur isolant thermique.
- Pour éviter les courants de convection, on complique la circulation du fluide (p.ex. la laine de roche empêche l'air de pouvoir circuler facilement). De même le couvercle posé sur un calorimètre empêche l'air au-dessus du liquide de pouvoir circuler librement.

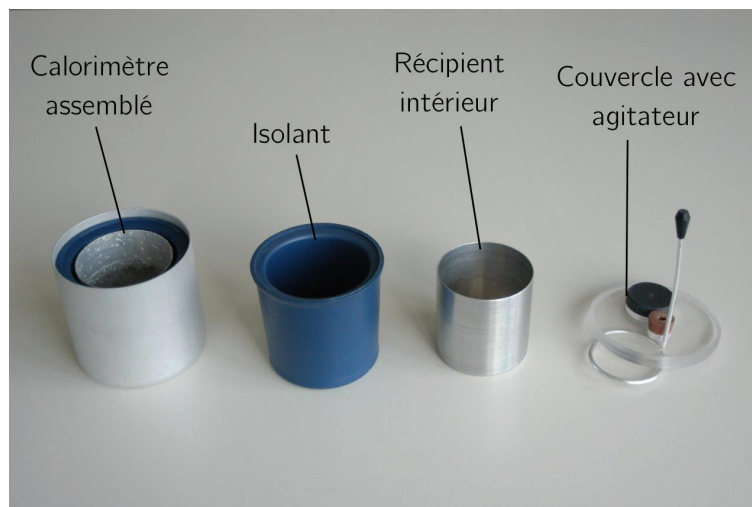


Figure XIII.4. – Calorimètre

- Finalement pour empêcher les échanges thermiques par rayonnement, on utilise des matières réfléchissantes. La paroi intérieure d'une bouteille thermos est recouverte d'une couche réfléchissante pour garder des boissons au chaud. Elle est aussi réfléchissante à l'extérieur afin de garder des boissons au frais. Pensez aussi à la couverture de survie, mince couverture en polyester métallisé, utilisée pour lutter contre l'hypothermie.

5. Questions de compréhension

1. Il est recommandé de fermer les volets et les rideaux durant les nuits froides d'hiver. Il en résulte une économie d'énergie considérable. Expliquer.
2. Pourquoi les murs sont-ils souvent très sales au-dessus des radiateurs ?
3. On isole souvent les greniers à l'aide de bandes de laine minérale recouvertes intérieurement par une feuille d'aluminium. Décrire l'effet de ce matériau d'isolation.
4. Quel est le rôle de la surface externe brillante des satellites ?
5. Une échelle en métal paraît plus froide au toucher qu'une échelle en bois bien qu'elles aient la même température. Expliquer pourquoi.

Chapitre **XIV**

Machines thermiques

Voir feuilles distribuées en classe

1. Propriétés thermiques de quelques substances

Substance	Capacité thermique massique c en $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ (à 20 °C)	Température de fusion θ_f en °C	Chaleur latente de fusion L_f en $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Température d'ébullition $\theta_{eb.}$ en °C (à 1013 hPa)	Chaleur latente de vaporisation L_v en $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Al	904	660	396	2447	10900
Cu	384	1083	205	2590	4790
Ag	235	962	100	2162	2336
Fe	449	1535	277	2730	6310
Pb	127	327	23	1750	8600
Au	129	1063	66	2707	1650
Ni	445	1453	303	2800	6480
Pt	133	1768	101	3825	
Sn	227	232	60	2430	450
Zn	388	420	107	907	1755
Hg	140	-39	11,8	357	285
W	132	3380	192	5500	4350
laiton	390				170
glace	2060	0	334	/	/
eau	4180	0	334	100	2300
ethanol	2460	-114	109	78	850
méthanol	2720	-97,6	99	64,6	1128
huile	2000				
verre	840				
air	1010	-213		-194	205