

PHYSIQUE

Henri Weyer

COURS DE PHYSIQUE

Classes de 3BCF

Version : 2023/2024



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Éducation nationale,
de l'Enfance et de la Jeunesse

IMPRESSUM

Titre: Cours de physique

Élaboré conformément au programme luxembourgeois par:
Laurent Hild et Robert Droulans.

Contenus et concept didactique pour l'enseignement
au Grand-Duché de Luxembourg.



Éditeur:

Service de Coordination de la Recherche
et de l'Innovation pédagogiques et technologiques (SCRIPT)
33 Rives de Clausen
L-2165 Luxembourg
secretariat@script.lu

Réalisation/Conception: SCRIPT

COURS DE PHYSIQUE

Classes de 3C-BCF

2023 - 2024

CNESC

Auteurs : Laurent Hild & Robert Droulans

Illustrations : Paul G. Hewitt

Partie I

Mécanique



La mécanique (du grec ancien « mèchanikê » : l'art de construire une machine) est une branche de la physique dont l'objet est l'étude du mouvement des systèmes physiques. Les notions de force et d'accélération jouent un rôle central en mécanique.

Sommaire

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Cinématique | 1 |
| 1.1 | Référentiel | 1 |
| 1.2 | Position, déplacement et distance parcourue | 1 |
| 1.3 | Vitesse | 3 |
| 1.3.1 | Vitesse moyenne | 3 |
| 1.3.2 | Vitesse algébrique moyenne | 3 |
| 1.3.3 | Vitesse instantanée | 4 |
| 1.3.4 | Vecteur vitesse et norme de la vitesse | 4 |
| 1.4 | Le mouvement rectiligne uniforme | 6 |
| 1.4.1 | Étude graphique | 6 |
| 1.4.2 | Équations horaires | 6 |
| 1.5 | Accélération | 9 |
| 1.5.1 | Accélération moyenne | 9 |
| 1.5.2 | Accélération instantanée | 9 |
| 1.6 | Le mouvement rectiligne uniformément varié | 11 |
| 1.6.1 | MRUV sans vitesse initiale | 11 |
| 1.6.2 | Pour en savoir plus : MRUV avec vitesse initiale | 13 |
| 1.7 | Chute libre | 16 |
| 1.7.1 | Définition | 16 |
| 1.7.2 | Les lois de chute de Galilée | 16 |
| 1.7.3 | Équations horaires de la chute libre verticale sans vitesse initiale | 17 |
| 1.7.4 | Pour en savoir plus : chute libre verticale avec vitesse initiale | 18 |
| 2 | Dynamique | 20 |
| 2.1 | Les forces | 20 |
| 2.1.1 | Notion et représentation | 20 |
| 2.1.2 | Force résultante et décomposition de forces | 21 |
| 2.2 | Première loi de Newton | 23 |
| 2.2.1 | Un peu d'histoire | 23 |
| 2.2.2 | Newton et le principe d'inertie | 24 |
| 2.2.3 | Masse et poids | 25 |
| 2.2.4 | Équilibre de forces | 29 |
| 2.3 | Deuxième loi de Newton | 37 |
| 2.4 | Troisième loi de Newton | 44 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3 | Énergie..... | 47 |
| 3.1 | Le travail d'une force..... | 47 |
| 3.1.1 | Exemple introductif..... | 47 |
| 3.1.2 | Définition générale du travail..... | 48 |
| 3.2 | La puissance mécanique..... | 50 |
| 3.2.1 | Exemple introductif..... | 50 |
| 3.2.2 | Définition..... | 50 |
| 3.2.3 | Relation entre puissance et vitesse..... | 51 |
| 3.2.4 | Le cheval-vapeur | 51 |
| 3.3 | L'énergie mécanique | 52 |
| 3.3.1 | Lien entre les grandeurs travail et énergie..... | 52 |
| 3.3.2 | Différentes formes d'énergie mécanique | 52 |
| 3.3.3 | Synthèse | 54 |
| 3.4 | Formes d'énergie non-mécaniques..... | 56 |
| 3.5 | Conservation de l'énergie | 56 |
| 3.6 | Conservation de l'énergie mécanique..... | 57 |
| 3.6.1 | Exemple introductif | 57 |
| 3.6.2 | Condition de la conservation de l'énergie mécanique..... | 57 |
| 3.6.3 | Puissance d'un transfert ou d'une transformation énergétique | 58 |
| 3.6.4 | Rendement d'un transfert ou d'une transformation énergétique | 58 |
| 4 | Mécanique des fluides | 63 |
| 4.1 | Définition de la pression..... | 63 |
| 4.2 | La pression hydrostatique | 64 |
| 4.3 | La pression atmosphérique | 67 |
| 4.3.1 | L'atmosphère terrestre | 67 |
| 4.3.2 | La pression atmosphérique normale..... | 67 |
| 4.3.3 | Mise en évidence expérimentale | 68 |
| 4.3.4 | Les instruments de mesure | 69 |
| 4.4 | La poussée d'Archimède | 72 |
| 4.4.1 | Le principe d'Archimède..... | 72 |
| 4.4.2 | Flotter, couler, rester entre deux eaux | 73 |
| 4.4.3 | Flottaison | 74 |

1 Cinématique



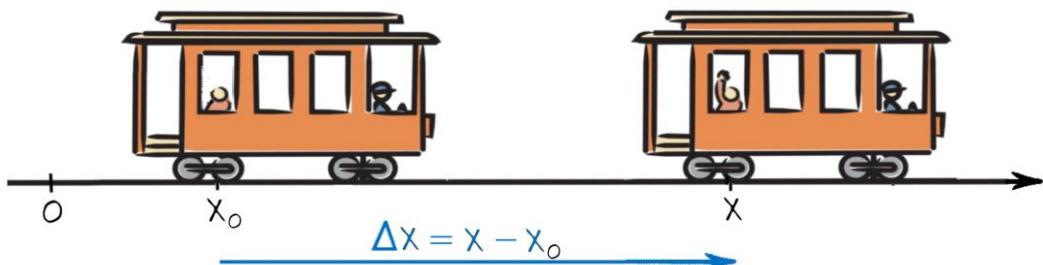
La cinématique est l'étude du mouvement. Un corps est en mouvement lorsque sa position dans l'espace change. Cela dit, tout est en mouvement, même les corps qui paraissent immobiles. En effet, en lisant ce cours, tu te déplaces (avec la Terre entière) à une vitesse d'environ 107 000 km/h par rapport au Soleil et plus vite encore par rapport au centre de notre galaxie, la Voie Lactée.

1.1 Référentiel

On décrit le mouvement d'un corps par rapport à un cadre choisi comme référence, appelé **référentiel**. Le référentiel peut être la salle de classe, le wagon d'un train, le centre du Soleil, Par exemple, si on dit qu'une voiture de Formule-1 roule à une vitesse de 300 km/h, on sous-entend que sa vitesse est mesurée par rapport à la piste. En général, les vitesses des corps de notre environnement sont données par rapport à la surface de la Terre. On appelle ce référentiel le **référentiel terrestre**.

1.2 Position, déplacement et distance parcourue

Dans ce chapitre, nous allons étudier les **mouvements rectilignes**, c'est-à-dire les mouvements dont la trajectoire est une ligne droite. Pour décrire le mouvement d'un corps, il faut d'abord spécifier sa position, c'est-à-dire exprimer où il se trouve à un instant donné. Sur la trajectoire rectiligne du corps, on fixe un repère à une dimension, c'est-à-dire un axe muni d'une origine et d'un sens positif. La **position** du corps est alors exprimée par sa **coordonnée x** . Si un objet est en mouvement, cela signifie que sa position varie. Ce changement de position par rapport au repère est appelé **déplacement**.



Le **déplacement** d'un corps mobile est la variation de sa position : $\Delta x = x - x_0$

x représente la position finale ;

x_0 représente la position initiale.

Unité SI : le mètre (m).

Le déplacement Δx est une grandeur algébrique, c'est-à-dire une grandeur qui peut avoir une valeur positive ou négative. Un déplacement positif signifie que le corps s'est déplacé dans le sens positif de l'axe x ; un déplacement négatif correspond à un corps qui s'est déplacé dans le sens négatif de l'axe.

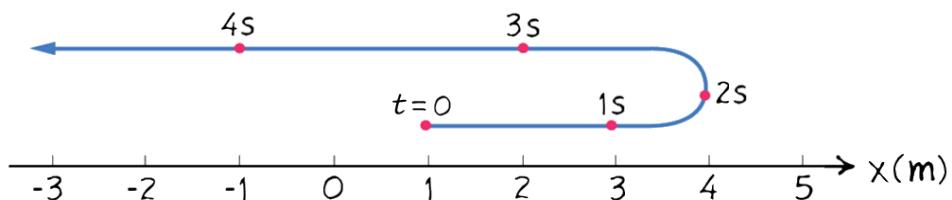
La **distance parcourue**, notée **d** , est la longueur totale du chemin parcouru lors du mouvement.

La distance parcourue est toujours positive. Unité SI : le mètre (m).

Attention : À moins que le mobile se déplace strictement dans le sens positif, les notions de déplacement et de distance parcourue sont différentes.

■ As-tu compris ?

1. La représentation graphique ci-dessous décrit le mouvement rectiligne d'un corps.



- a. Quelle est la position du corps à l'instant $t = 1 \text{ s}$? Et à l'instant $t = 4 \text{ s}$?
- b. Que vaut le déplacement du corps pendant les 4 premières secondes ?
- c. Que vaut la distance parcourue par le corps pendant les 4 premières secondes ?

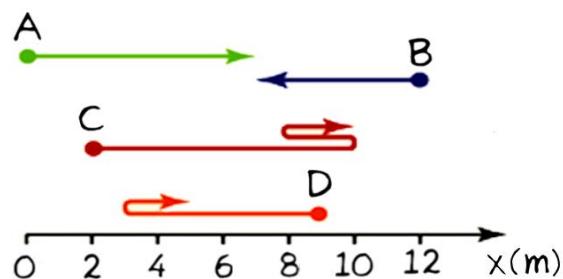
2. Dans un avion en plein vol, un passager se déplace vers son siège à l'arrière de l'avion.



- a. Préciser le référentiel adéquat pour décrire le mouvement du passager.
- b. Quelle est la position initiale du passager ? Quelle est la position finale du passager ?
- c. Que vaut le déplacement du passager ?
- d. Que vaut la distance parcourue par le passager ?

3. Déterminer les déplacements et les distances parcourues par les points A, B, C et D.

Ajouter la représentation du mouvement d'un point E pour lequel la distance parcourue vaut 16 m et le déplacement est nul.



4. Sous quelle condition le déplacement et la distance parcourue ont-ils la même valeur ?

1.3 Vitesse

1.3.1 Vitesse moyenne

Dans l'antiquité, les corps en mouvement furent décrits comme lents ou rapides. Or, ces descriptions étaient bien trop vagues. Galilée fut le premier à déterminer la vitesse en considérant la durée nécessaire (mesurée par exemple à l'aide d'un pendule) pour parcourir une distance donnée.

La vitesse moyenne sur un parcours quelconque est égale au quotient de la distance parcourue d et de la durée Δt du trajet :

$$v_m = \frac{d}{\Delta t}$$

Unité SI : le mètre par seconde $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$.

Remarque

Une autre unité de vitesse couramment utilisée est le kilomètre par heure $\left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$ ¹. Toutefois, ce n'est pas l'unité SI !

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = \frac{1}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Application

Sur la route des vacances, la voiture familiale s'arrête pour une pause environ toutes les deux heures. Arrivé à destination, le tableau de bord indique une distance parcourue de 680 km pour une durée du trajet de 10 h (pauses comprises). La vitesse moyenne sur ce trajet vaut donc

$$v_m = \frac{d}{\Delta t} = \frac{680 \text{ km}}{10 \text{ h}} = 68 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

1.3.2 Vitesse algébrique moyenne

Lors d'un mouvement rectiligne sur une axe, on peut définir une vitesse algébrique, c'est-à-dire une vitesse qui traduit le sens du mouvement.

La vitesse algébrique moyenne décrit la rapidité de la variation de la position d'un corps. Elle s'obtient en divisant le déplacement Δx par la durée Δt de ce déplacement :

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Unité SI : le mètre par seconde $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$.

La vitesse algébrique ainsi définie est une grandeur de même signe que le déplacement. Une vitesse positive traduit un mouvement dans le sens positif de l'axe, une vitesse négative signifie un mouvement dans le sens opposé.

Application

Repronons la situation de l'exercice 2 de la page précédente et supposons que le passager a mis $\Delta t = 5 \text{ s}$ pour se rendre à l'arrière de l'avion. Le passager s'est alors déplacé avec une vitesse algébrique :

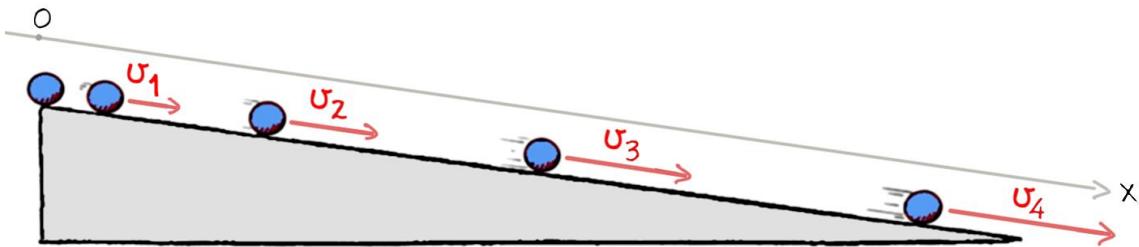
$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-4 \text{ m}}{5 \text{ s}} = -0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = -80 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Le signe « - » indique que le passager s'est déplacé dans le sens négatif de l'axe x .

¹ Tout rapport d'unités de distance et de temps est une unité de vitesse : miles par heure (mi/h) ; centimètres par jour ; millimètres par minute, années-lumière par siècle ; ...

1.3.3 Vitesse instantanée

Une boule est lâchée à partir du repos en haut d'un rail incliné. À l'aide de deux cellules photoélectriques, on peut mesurer la durée de la descente. Connaissant la longueur du rail, on peut calculer la vitesse algébrique moyenne en appliquant la définition : $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$



Or, la boule roule de plus en plus vite. Pour avoir une meilleure résolution de la vitesse à un endroit, on peut rapprocher les cellules photoélectriques. En effet, en réduisant l'intervalle de mesure, la valeur de la vitesse s'approche d'une valeur dite « instantanée ». En effet, à la limite, l'intervalle de mesure devient tellement court qu'on peut l'assimiler à un seul instant « t ».

La **vitesse instantanée** $v(t)$ d'un mobile décrit la rapidité de son déplacement à un instant t donné :

$$v(t) = \frac{dx}{dt}$$

dt représente un intervalle de temps extrêmement court autour de l'instant t ;

dx représente le déplacement effectué par le mobile pendant dt .

Remarque

Le tachymètre d'une voiture indique la vitesse instantanée.

Application

Dans la descente d'un col de haute montagne, le capteur du vélo d'un coureur cycliste a enregistré que la roue avant (diamètre 645 mm) a mis $dt = 80$ ms pour effectuer une rotation complète.



À cet instant t , la vitesse du cycliste vaut :

$$v(t) = \frac{dx}{dt} \cong \frac{\pi \cdot 0,645 \text{ m}}{0,080 \text{ s}} = 25,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong 91,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

1.3.4 Vecteur vitesse et norme de la vitesse

En toute généralité, la vitesse a une direction, un sens et une norme. C'est une *grandeur vectorielle* représentée par une flèche qui pointe dans le sens du mouvement² (voir figure en haut).

Si l'on s'intéresse simplement à la valeur de la vitesse sans vouloir préciser le sens, on utilise la norme de la vitesse. Par exemple, le passager de l'exercice 2 de la page 2 a une vitesse algébrique de $-0,5 \text{ m/s}$ mais la norme de sa vitesse vaut $0,5 \text{ m/s}$ par rapport à l'avion.

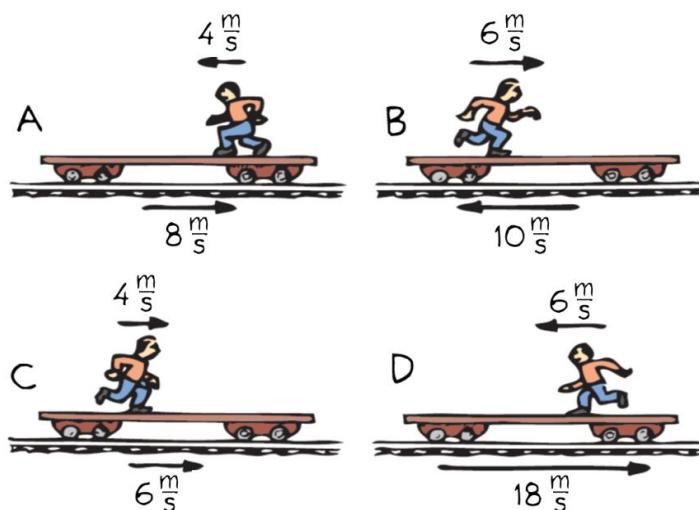
La **norme de la vitesse** décrit la rapidité du déplacement sans tenir compte du sens du mouvement. Dans le cas d'un mouvement rectiligne, il s'agit de la valeur absolue de la vitesse algébrique.

² Pour des mouvements rectilignes, la notion de vitesse algébrique suffit pour traduire le sens du mouvement. L'étude de la nature vectorielle de la vitesse sera abordée en classe de 2^e.

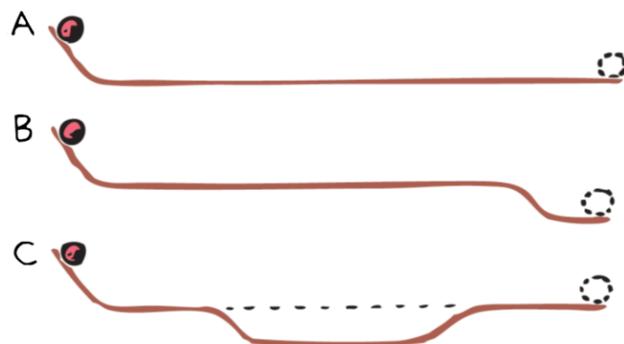
■ As-tu compris ?

- Lors d'une randonnée, tu as parcouru 7,5 km en 1 h 30. Que vaut ta vitesse de marche ? S'agit-il d'une vitesse moyenne ou d'une vitesse instantanée ?
- Quelle distance as-tu parcouru à vélo si ta vitesse moyenne vaut 30 km/h et que tu as roulé pendant une demi-heure ?
- Calculer le temps de course d'un athlète qui court 400 m avec une vitesse moyenne de 8 m/s.
- Considérons un coureur cycliste qui grimpe un col de montagne de 18 km de longueur. Arrivé en haut, il fait demi-tour sans s'arrêter et redescend par la même route. Le compteur affiche une vitesse moyenne de 18 km/h pour la montée et une vitesse moyenne de 54 km/h pour la descente. Que vaut la vitesse moyenne du cycliste sur l'ensemble du parcours ?
- Les figures ci-dessous donnent les normes des vitesses du coureur dans le référentiel du wagon et la norme de la vitesse du wagon dans le référentiel terrestre.

Déterminer la vitesse algébrique du coureur dans le référentiel terrestre pour un axe dont le sens positif est orienté vers la droite.



- Trois billes identiques A, B et C sont lâchées sans vitesse initiale à l'extrémité gauche de trois rails.



Comparer les ...

- vitesses instantanées des billes aux extrémités droites des rails.
- durées nécessaires aux billes pour parcourir les rails.
- vitesses moyennes des billes sur leurs parcours respectifs.

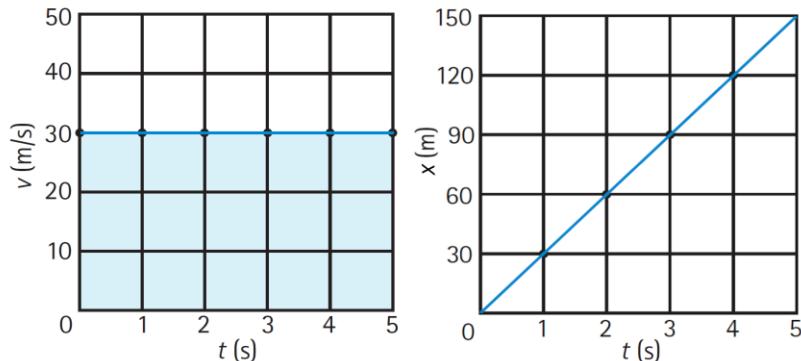
1.4 Le mouvement rectiligne uniforme

Un corps effectue un **mouvement rectiligne uniforme (MRU)** si et seulement si le corps se déplace en ligne droite et à vitesse constante : $v(t) = \text{const.} = v \neq 0$

1.4.1 Étude graphique

Considérons une voiture effectuant un MRU avec une vitesse de 30 m/s. On suppose que sa position initiale sur l'axe est $x_0 = 0$.

Voici les graphiques qui donnent la vitesse et la position de la voiture en fonction du temps.



- a La vitesse de la voiture est constante à tout instant. Elle est représentée par une droite horizontale (càd. parallèle à l'axe du temps).
- b La position de la voiture varie linéairement en fonction du temps. Elle est représentée par une droite inclinée.

En étudiant les graphiques plus en détail, on constate :

- La pente de la courbe de position correspond à la valeur de la vitesse : $\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{150 \text{ m}}{5 \text{ s}} = 30 \text{ m/s} = v$
- L'aire de la surface sous la courbe de vitesse correspond à la valeur du déplacement³. (*)

1.4.2 Équations horaires

Traduisons la conclusion (*) dans le langage mathématique :

$$\begin{aligned}\Delta x &= v \cdot t && \text{(rectangle)} \\ x - x_0 &= v \cdot t \\ x &= v \cdot t + x_0\end{aligned}$$

Application numérique :

$$\Delta x = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5 \text{ s} = 150 \text{ m}$$

Le MRU peut donc être décrit à l'aide des équations horaires suivantes :

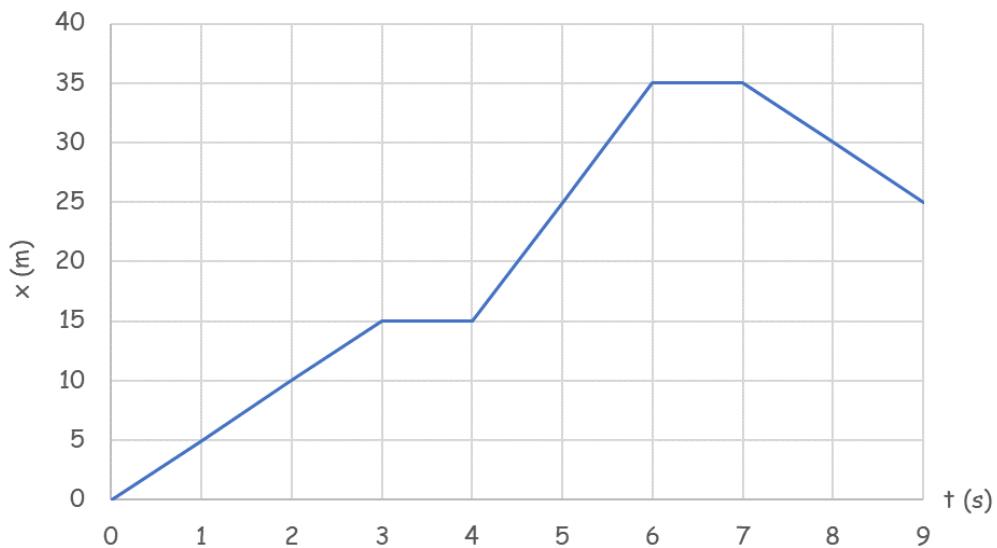
$$\begin{aligned}v(t) &= v = \text{const.} \\ x(t) &= v t + x_0\end{aligned}$$

■ As-tu compris ?

11. Un piéton effectue un MRU. À l'instant initial, il se trouve à la position 50 m et se déplace avec une vitesse de 4,5 km/h. Où le piéton se trouve-t-il deux minutes plus tard ?
12. Un autre piéton part de la position 210 m et rejoint l'origine du repère ($x = 0$) en 150 s. Que vaut sa vitesse en km/h ?

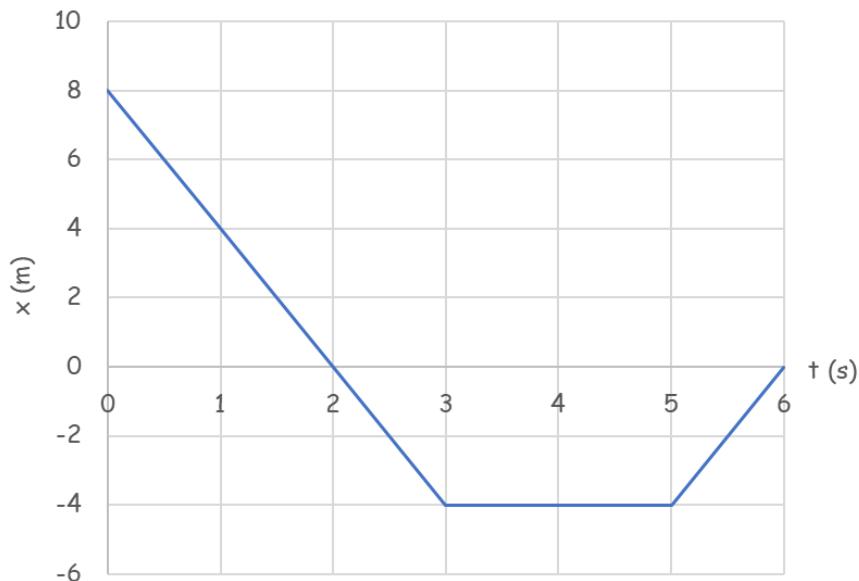
³ L'aire du rectangle coloré délimité par la courbe de vitesse et l'axe du temps a la dimension d'une longueur. En effet, en multipliant une vitesse (en m/s) par une durée (en s), on obtient bien une longueur (en m).

13. Le mouvement d'un robot télécommandé est représenté dans le graphique $x(t)$ ci-dessous.



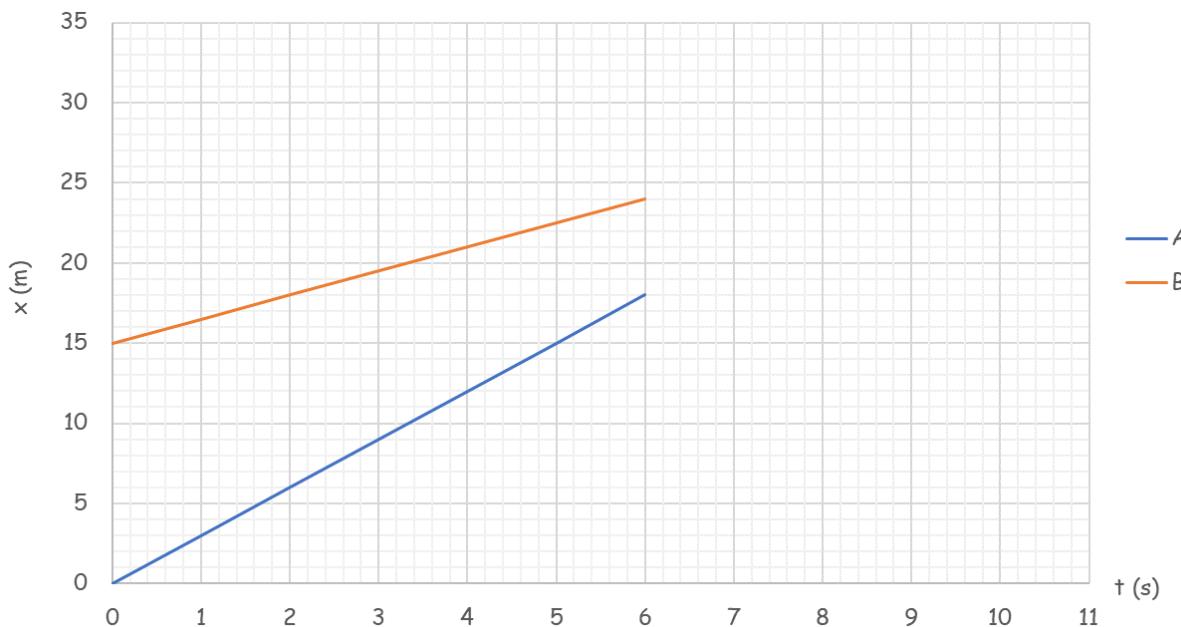
- Interpréter les différentes phases du mouvement du robot.
- Réaliser un diagramme représentant la vitesse du robot en fonction du temps.

14. Un chariot se déplace sur des rails. Son mouvement est décrit par la représentation graphique $x(t)$ ci-dessous.



- Réaliser un diagramme $v(t)$ représentant la vitesse du chariot en fonction du temps.
- Déterminer le déplacement total du chariot à l'aide du diagramme $v(t)$ réalisé sous a. Vérifier la valeur trouvée à l'aide du diagramme $x(t)$.

15. Le graphique représente les mouvements de deux piétons A et B qui se baladent sur un trottoir rectiligne.



- a. Quel type de mouvement les deux piétons font-ils ? Justifier à l'aide du graphique.
- b. Quelle distance initiale sépare les deux piétons ?
- c. Déterminer les vitesses algébriques des deux piétons.
- d. Calculer l'instant lorsque le piéton A dépasse le piéton B. Vérifier graphiquement.
16. Deux piétons se déplacent sur un trottoir rectiligne. Leurs positions sont données par les équations horaires suivantes :
- $$x_1 = 3t - 7 \quad ; \quad x_2 = -2t + 8$$

- a. Quel type de mouvement les deux piétons effectuent-ils ? Justifier.
- b. À quelle vitesse les deux piétons se déplacent-ils ?
- c. À quel instant les deux piétons se rencontrent-ils ?
- d. À quels instants les deux piétons sont-ils distants de 5 m ?

1.5 Accélération

1.5.1 Accélération moyenne

Dans le langage courant, accélérer signifie augmenter de vitesse. Effectivement, l'accélérateur dans une voiture permet d'augmenter sa vitesse. La définition physique de l'accélération est toutefois plus générale : un corps accélère lorsque sa **vitesse change**.

L'**accélération moyenne a** décrit la rapidité de la variation de la vitesse instantanée d'un corps. Elle s'obtient en divisant la variation de la vitesse Δv par la durée Δt pendant laquelle cette variation a lieu :

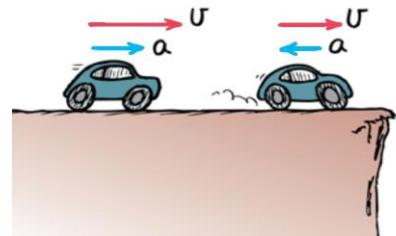
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{\Delta t}$$

v_0 représente la vitesse initiale ; v représente la vitesse finale.

Unité SI : le mètre par seconde au carré ; $\frac{\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{s}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Comme la vitesse, l'accélération est une *grandeur vectorielle* qui peut être représentée par une flèche.

- Une accélération dans le sens du mouvement signifie une augmentation de la norme de la vitesse.
- Une accélération dans le sens opposé du mouvement signifie une diminution de la norme de la vitesse.



Applications

La vitesse d'un dragster « Top Fuel » passe de 0 à 140 m/s en 5 s. Son accélération vaut :

$$a = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \frac{140 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = 28 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



Chaque seconde, la norme de la vitesse du « Top Fuel » augmente (en moyenne) de 28 m/s.

Une voiture freine brusquement. Sa vitesse est réduite de 25 m/s à 1 m/s en 3 s. L'accélération de la voiture lors du freinage vaut :

$$a = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \frac{1 - 25}{3} = -8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



Chaque seconde, la norme de la vitesse de la voiture diminue (en moyenne) de 8 m/s.

1.5.2 Accélération instantanée

Lorsque l'accélération n'est pas constante, on peut s'intéresser à sa valeur à un instant donné. Cette accélération instantanée est obtenue par le même procédé que celui utilisé pour la vitesse instantanée : on considère un intervalle de temps extrêmement court.

L'**accélération instantanée $a(t)$** décrit la rapidité de la variation de la vitesse à un instant t donné :

$$a(t) = \frac{dv}{dt}$$

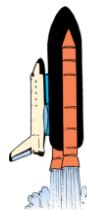
dt représente un intervalle de temps extrêmement court autour de l'instant t ,

dv représente la variation de la vitesse instantanée du mobile pendant dt .

■ As-tu compris ?

17. Déterminer les accélérations des mobiles dans les situations suivantes :

- Un athlète passe de 2 m/s à 6 m/s en 4 s.
- Un camion freine de 20 m/s à 5 m/s en 2 s.
- Une fusée passe de 100 km/h à 1200 km/h en 1 min.



18. Que vaut l'accélération d'une voiture qui roule à une vitesse de 100 km/h pendant 100 s ?

19. Laquelle des accélérations est plus grande, sachant que les deux ont lieu pendant la même durée ?

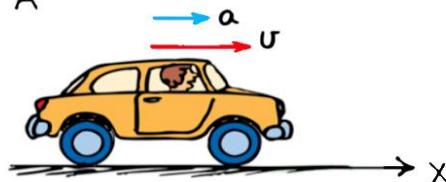
- Une accélération de 25 km/h à 30 km/h.
- Une accélération de 96 km/h à 100 km/h.

20. En partant du repos, une première voiture accélère jusqu'à 50 km/h et une deuxième jusqu'à 60 km/h. Laquelle des deux voitures a subi la plus grande accélération ?

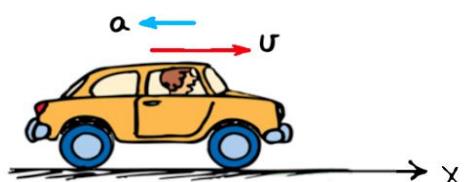
- La première voiture.
- La deuxième voiture.
- Identique pour les deux.
- Impossible à dire, car il manque une donnée.

21. Donner pour chaque cas le signe de l'accélération et de la vitesse algébrique. Préciser si la norme de la vitesse de la voiture augmente ou diminue.

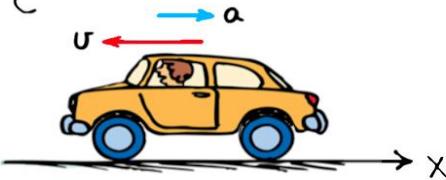
A



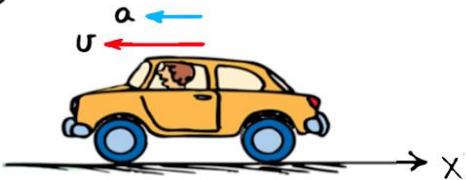
B



C



D



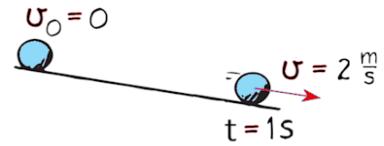
1.6 Le mouvement rectiligne uniformément varié

Un corps effectue un **mouvement rectiligne uniformément varié (MRUV)** si et seulement si le corps se déplace en ligne droite avec une accélération constante non nulle :

$$a(t) = \text{const.} = a \neq 0$$

1.6.1 MRUV sans vitesse initiale

Reprendons l'expérience de la boule lâchée à partir du repos en haut d'un rail incliné. L'inclinaison du rail est telle que la boule descend avec une accélération constante de 2 m/s^2 .



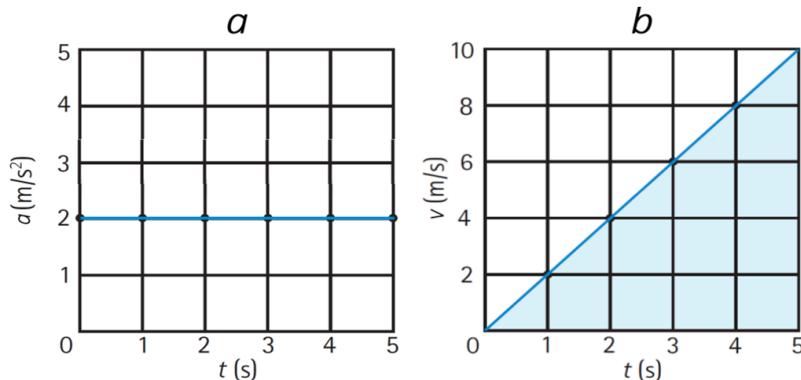
D'après la définition de l'accélération, on a :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v(t) - 0}{t - 0} = \frac{v(t)}{t} = \text{const.} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

La vitesse augmente donc proportionnellement au temps et **l'équation horaire de la vitesse** s'écrit :

$$v(t) = a t$$

Graphiquement, la situation se présente comme suit :



- a L'accélération constante de la boule est représentée par une droite parallèle à l'axe du temps.
- b La vitesse de la boule varie linéairement en fonction du temps. Elle est représentée par une droite inclinée qui passe par l'origine. Application : $v(t = 5 \text{ s}) = a t = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ s} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

En étudiant les graphiques plus en détail, on constate :

- La pente de la courbe de vitesse correspond à la valeur de l'accélération :

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{10 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5 \text{ s}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = a = \text{const.}$$

- Pour un MRUV, la vitesse moyenne durant n'importe quel intervalle de temps est égale à la moyenne des vitesses initiale et finale. Par exemple, la vitesse moyenne sur les 5 premières secondes vaut $v_m = \frac{1}{2} \cdot (0 + 10) = 5 \text{ m/s}$.
- L'aire de la surface sous la courbe de vitesse correspond au déplacement. Ainsi, on obtient :

$$\Delta x = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t \quad (\text{triangle})$$

$$x - x_0 = \frac{1}{2} \cdot (a \cdot t) \cdot t = \frac{1}{2} a t^2$$

Application numérique :

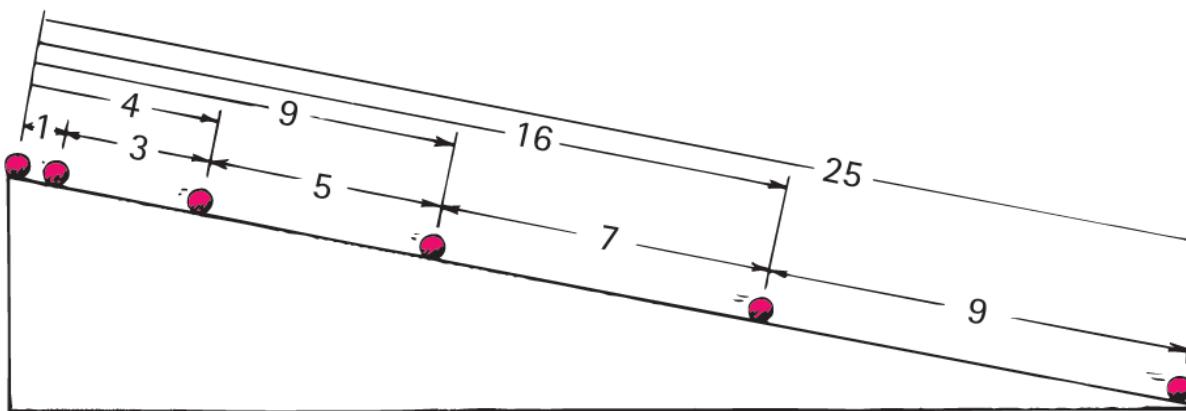
$$\Delta x = 0,5 \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5 \text{ s} = 25 \text{ m}$$

Et **l'équation horaire de la position** s'écrit donc :

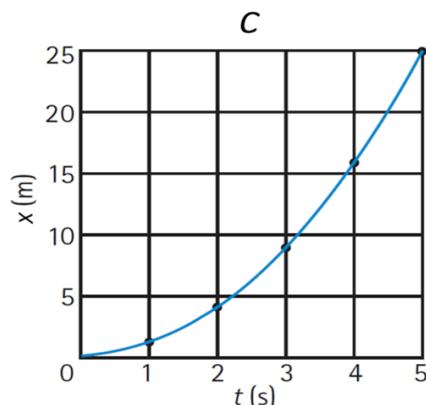
$$x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + x_0$$

Application : Après 5 secondes, la position de la boule vaut $x(t = 5 \text{ s}) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 5^2 + 0 = 25 \text{ m}$.

Cette relation a été comprise par Galilée. Il a raisonné que si la boule accélère deux fois plus longtemps, elle roule avec une vitesse moyenne double. Puisqu'elle roule pendant une durée deux fois plus longue à une vitesse moyenne deux fois plus grande, elle roule quatre fois plus loin. Le déplacement est proportionnel au carré du temps.



c Graphiquement, la position en fonction du temps est représentée par un arc de **parabole**.



En étudiant ce graphique plus en détail, on constate :

- La vitesse moyenne v_m durant un intervalle de temps correspond à la pente du segment de droite qui relie le point initial au point final dans le diagramme de position. Par exemple, la vitesse moyenne sur les 5 premières secondes vaut :

$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{25 \text{ m}}{5 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}$$

- La vitesse instantanée $v(t)$ peut elle-aussi être « lue » sur le graphique de position. À tout instant t , elle correspond à la **pente de la tangente à la courbe** en ce point. Le fait que la courbe devient de plus en plus pentue indique en effet que la vitesse instantanée de la boule augmente au cours du temps.



1.6.2 Pour en savoir plus : MRUV avec vitesse initiale

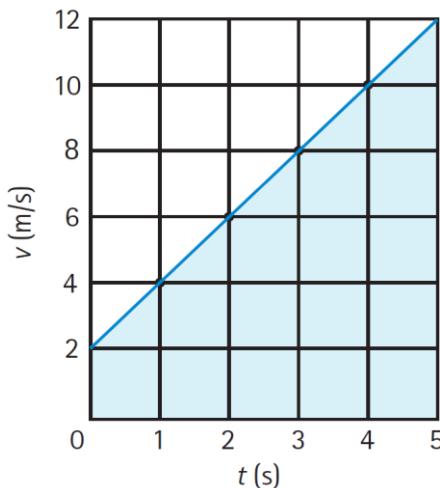
Si un corps a une vitesse initiale v_0 non nulle, la définition de l'accélération donne :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v(t) - v_0}{t - 0} = \text{const.}$$

et l'équation horaire de la vitesse devient affine :

$$v(t) = a t + v_0$$

Par exemple, pour une vitesse initiale de valeur $v_0 = 2 \text{ m/s}$, on a l'évolution suivante de la vitesse instantanée au cours du temps (fonction affine).



Application : Après 5 s, la vitesse de la boule vaut $v(t = 5 \text{ s}) = 2 \cdot 5 + 2 = 12 \text{ m/s}$.

Pour obtenir le déplacement, on considère à nouveau l'aire de la surface sous la courbe de vitesse. En raison de la vitesse initiale, il faut rajouter l'aire rectangulaire $v_0 t$ et il vient :

$$\Delta x = x - x_0 = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t \quad (\text{triangle} + \text{rectangle})$$

et l'équation horaire de la position s'écrit :

$$x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$$

Application : Après 5 secondes, la position de la boule vaut $x(t = 5 \text{ s}) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 5^2 + 2 \cdot 5 = 35 \text{ m}$.

On vérifie que le déplacement correspond bien à l'aire de la surface sous la courbe de vitesse.

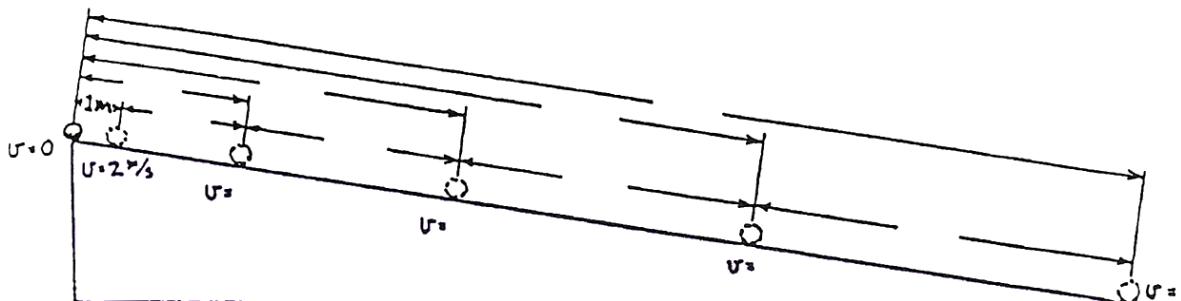
Récapitulatif des équations horaires :

| MRU | MRUV |
|----------------------------|--|
| $a(t) = 0$ | $a(t) = \text{const.} = a$ |
| $v(t) = \text{const.} = v$ | $v(t) = a t + v_0$ |
| $x(t) = v t + x_0$ | $x(t) = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0$ |

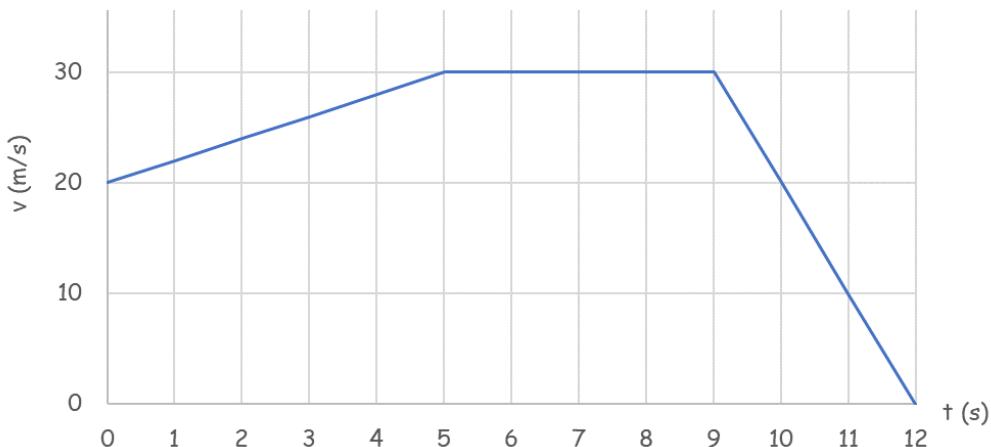
Notons que les équations horaires du MRU peuvent être déduites de celles du MRUV en posant $a = 0$.

■ As-tu compris ?

22. Le rail ci-dessous est incliné de manière qu'une balle descend avec une accélération constante de 2 m/s^2 . La balle est lâchée à partir du repos. Les positions de la balle sont indiquées à des intervalles réguliers (une seconde entre deux positions successives). Déterminer les valeurs de la vitesse (en m/s) et les distances parcourues (en m) aux différentes positions.

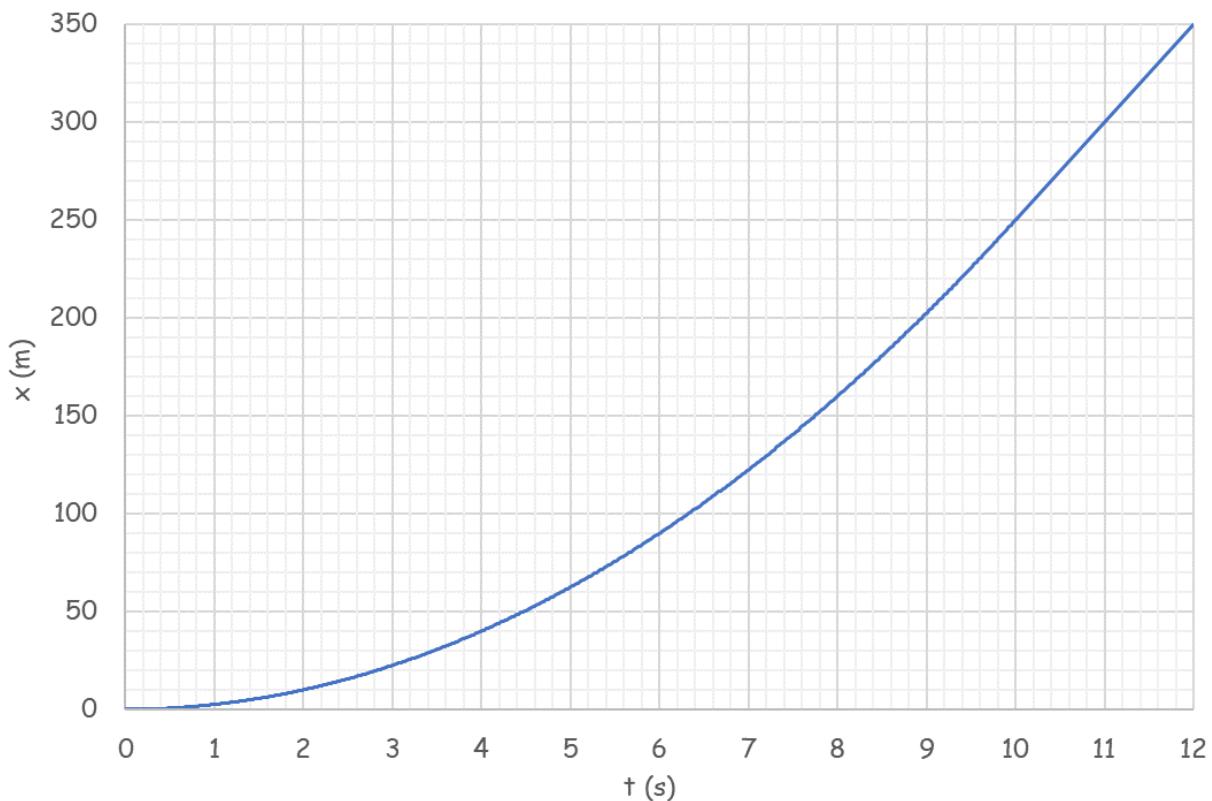


23. Considérons le diagramme suivant qui décrit le mouvement d'une voiture.



- a. Calculer les accélérations de la voiture durant les trois phases du mouvement.
- b. À quoi correspondent ces valeurs sur le graphique ?
24. Une voiture part du repos avec une accélération constante de 2 m/s^2 . Calculer la vitesse instantanée de la voiture après 10 secondes.
25. Calculer l'accélération d'un chariot qui est lâché sans vitesse initiale du haut d'un plan incliné et qui acquiert ensuite une vitesse instantanée de 25 m/s en 5 secondes.
26. Une voiture de sport part du repos et accélère uniformément en 8 s jusqu'à une vitesse de 180 km/h. Déterminer la distance parcourue lors de ces 8 s.
-
27. Sur la piste de décollage, un avion accélère uniformément de 40 m/s à 100 m/s. Durant cette phase d'accélération, l'avion parcourt une distance de 1,4 km. Déterminer la valeur de l'accélération.
- Indication : Utiliser la vitesse moyenne pour déterminer la durée de l'accélération.

28. Le graphique ci-dessous décrit le départ d'une voiture de course.



- Déterminer graphiquement la vitesse moyenne de la voiture sur les 10 premières secondes de course.
 - Déterminer graphiquement la vitesse instantanée de la voiture à $t = 4$ s.
 - Que peut-on dire de la vitesse instantanée de la voiture entre $t = 10$ s et $t = 12$ s ? Justifier.
29. Un automobiliste roule à la vitesse constante de 72 km/h sur une route rectiligne où la vitesse est limitée à 50 km/h. Un motard de la police part à sa poursuite. Il démarre au moment précis où la voiture passe à côté de lui. Le policier est animé d'un MRUV qui le fait passer du repos à 20 m/s en 10 s.
- Faire un schéma de la situation et donner les équations horaires $x(t)$ des voitures.
 - Calculer la durée de la poursuite.
 - Déterminer la distance parcourue par le policier lors de la poursuite.
30. Calculer la vitesse instantanée du policier lorsqu'il rattrape la voiture. Une voiture se trouvant à 5 m devant un feu rouge démarre avec une accélération égale à $2,5 \text{ m/s}^2$ lorsque le feu passe au vert. À cet instant, une camionnette roulant à une vitesse de 45 km/h se trouve à une distance de 25 m du feu devant celui-ci. Il maintient sa vitesse constante. Dans un premier temps, la camionnette va dépasser la voiture, puis la voiture va de nouveau dépasser la camionnette. Déterminer :
- les instants des dépassements ;
 - les positions des dépassements par rapport au feu tricolore ;
 - la vitesse de la voiture lorsque celle-ci dépasse la camionnette.

1.7 Chute libre

1.7.1 Définition

Un corps est en **chute libre** lorsqu'il tombe sous la seule action de son poids.

1.7.2 Les lois de chute de Galilée

Tous les corps ont le même mouvement de chute libre, indépendamment de leur masse ou de leur forme.

Selon la légende, Galilée laissa tomber deux boules de même taille, mais l'une en bois et l'autre en fer, du haut de la tour de Pise. Contrairement à la conviction générale des scientifiques de l'époque, Galilée et son public ont observé que deux boules de masses différentes tombent de manière identique.



Expérience

Dans un tube en verre se trouvent une plume et une pièce de monnaie. Lorsque le tube est retourné rapidement, les deux corps tombent vers le fond du tube.

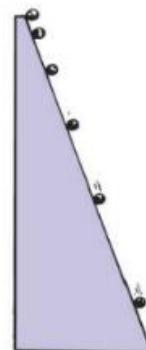
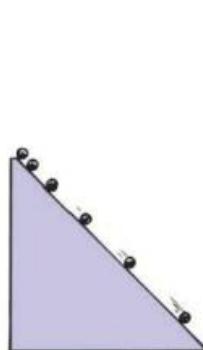
- Lorsque le tube est rempli d'air, la plume tombe nettement moins vite que la pièce de monnaie. En effet, l'air s'oppose au mouvement de chute des deux corps. L'effet de cette résistance est plus prononcé pour la plume (explication page 40).
- Si l'air est évacué du tube à l'aide d'une pompe à vide, les deux corps ont le même mouvement de chute libre.



La chute libre sans vitesse initiale est un **MRUV** de direction verticale, de sens descendant et d'accélération constante de norme

$$|g| = 9,81 \text{ m/s}^2 \cong 10 \text{ m/s}^2$$

Galilée a déduit l'accélération de la chute libre en mesurant les durées de descente de boules le long de rails inclinés. Cette astuce a permis à Galilée de réduire l'accélération de la boule par rapport à celle de la chute libre, et d'ainsi pouvoir prendre des mesures précises à une époque où le chronomètre ne fut pas encore inventé⁴.



⁴ Les lois de Galilée sont vraies au sens strict si le corps tombe en chute libre, c'est-à-dire dans le vide. Toutefois, elles restent valables si la résistance de l'air est négligeable, c'est-à-dire très faible comparée au poids du corps. Ceci est notamment le cas pour des corps de forme aérodynamique qui tombent à des vitesses relativement petites.

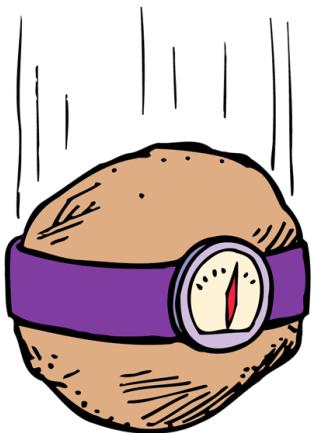
1.7.3 Équations horaires de la chute libre verticale sans vitesse initiale

Soit un corps qui tombe avec une vitesse initiale $v_0 = 0$.

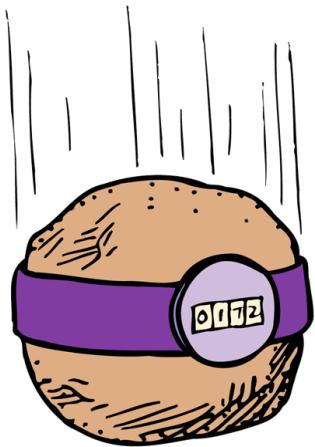
Fixons l'origine O de l'axe (Oy) au point de départ du mouvement : $y_0 = 0$

Orientons l'axe (Oy) vers le **bas** :

- $a = g \cong +10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- $v(t) = g t \cong 10 t$ (en m/s)



- $y(t) = \frac{1}{2} g t^2 \cong 5 t^2$ (en m)



■ As-tu compris ?

31. Sur la figure de droite, choisir une échelle convenable et indiquer la position et la vitesse de la pierre 1 s, 2 s, 3 s et 4 s après le début de la chute (supposée libre).

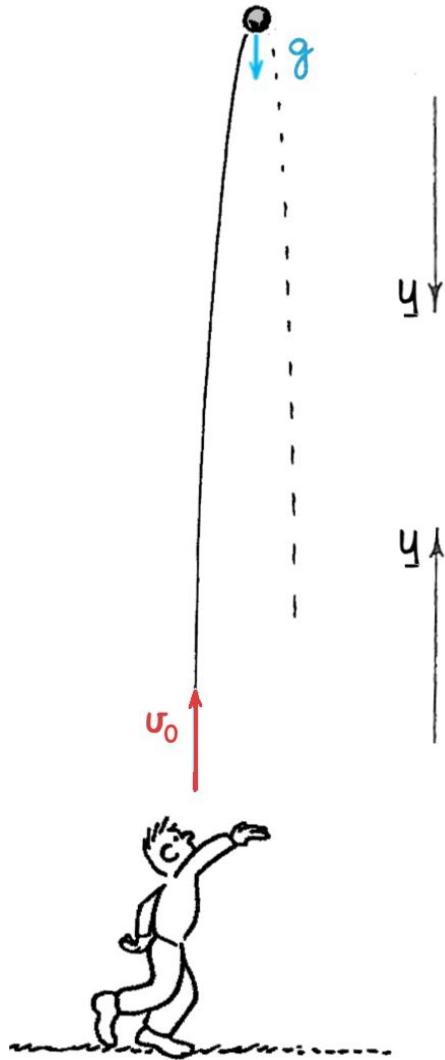
32. À la piscine, tu te laisses tomber du tremplin de 5 m.

- Calculer la durée de la chute.
- Quel serait le temps de chute du tremplin de 10 m ?



1.7.4 Pour en savoir plus : chute libre verticale avec vitesse initiale

Soit un corps qui est lancé verticalement avec une vitesse initiale v_0 .



Si l'axe des y est orienté vers le **bas** :

$$a = g \cong +10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v(t) = g t + v_0 \cong 10 t + v_0$$

$$y(t) = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t \cong 5 t^2 + v_0 t$$

Si l'axe des y est orienté vers le **haut** :

$$a = g \cong -10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v(t) = g t + v_0 \cong -10 t + v_0$$

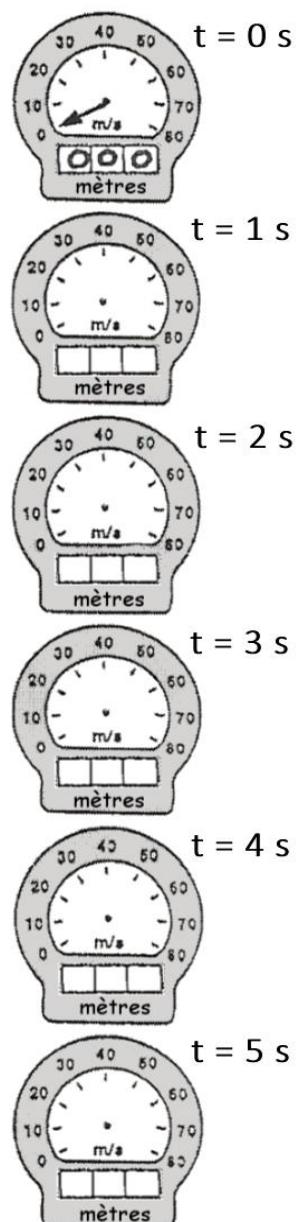
$$y(t) = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t \cong -5 t^2 + v_0 t$$

Attention au signe de v_0 :

- Si la vitesse initiale est orientée dans le sens positif de l'axe, alors $v_0 > 0$.
- Si la vitesse initiale est orientée dans le sens négatif de l'axe, alors $v_0 < 0$.

■ As-tu compris ?

34. À l'aide de son expérience sur la tour de Pise, Galilée a montré que lorsque la résistance de l'air est négligeable, la chute libre des corps ...
- dépend de la masse des corps.
 - ne dépend pas de la masse des corps.
35. Entre quelles valeurs limites se trouvent les accélérations d'une boule sur un rail incliné lorsqu'on fait varier l'angle d'inclinaison du rail de 0° à 90° ?
36. Un objet est lâché sans vitesse initiale. Quelle est son l'accélération après 5 secondes de chute libre ?
37. Une pierre est lâchée sans vitesse initiale du haut d'une falaise. Un indicateur de vitesse et un compteur de distance sont attachés à la pierre et indiquent une mesure à des intervalles de temps réguliers de 1 s. On néglige la résistance de l'air.
- Compléter les indications (cf. figure ci-contre).
 - Au bout de 5 secondes, la pierre touche le sol. Que vaut son accélération juste avant l'impact ?
 - Réaliser les diagrammes $y(t)$, $v(t)$ et $a(t)$ pour cette chute libre de 5 secondes.
38. Réaliser les diagrammes $a(t)$, $v(t)$ et $y(t)$ pour la chute libre sans vitesse initiale.
39. Une pomme tombe d'un arbre et touche le sol après 1,5 s. La résistance de l'air est négligeable.
- Calculer la vitesse d'impact de la pomme sur le sol.
 - De quelle hauteur la pomme est-elle tombée ?
40. Si une pierre tombe sans frottement pendant 7 secondes avant de toucher le sol, alors sa vitesse d'impact vaut _____ m/s, la distance totale parcourue vaut _____ m et son accélération juste avant l'impact vaut _____ m/s^2 .
41. Pour déterminer la hauteur d'un pont qui traverse un fleuve, un physicien laisse tomber une pierre du haut du pont et mesure le temps de chute jusqu'à l'impact dans l'eau, qui est de 2,16 secondes. En supposant que la résistance de l'air est négligeable, calculer la hauteur du pont
42. Sur la Lune, l'accélération de chute libre vaut $1,6 m/s^2$. Calculer la vitesse atteinte par un caillou lâché du repos après une chute de 1,5 s ainsi que la distance verticale parcourue.



2 Dynamique

2.1 Les forces

2.1.1 Notion et représentation

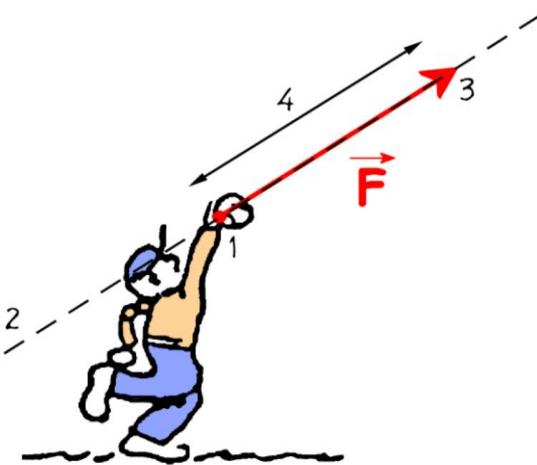
Une force est une poussée ou une traction.

Une force a quatre **caractéristiques** :

1. Un point d'application
2. Une direction (droite d'action)
3. Un sens
4. Une norme (intensité)

Une force est représentée par un **vecteur force** \vec{F} .

Ce vecteur indique les quatre caractéristiques de la force de manière visuelle.



La norme d'une force est représentée par le symbole F . Dans le Système International (SI), la norme d'une force est exprimée en **newton (N)**. La norme d'une force est positive : $F \geq 0$.

On mesure la norme d'une force avec un **dynamomètre**.

■ As-tu compris ?

1. Représenter le vecteur force en précisant l'échelle utilisée.
 - a. L'homme exerce une poussée de 1250 N sur le rocher.



- b. La main exerce une traction de 100 N sur la clé anglaise.



- c. Une crosse de golf exerce une force de 5000 N sur une balle. La force est dirigée selon un angle de 10° par rapport à l'horizontale.



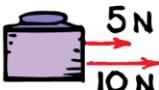
2. Représenter deux forces de même direction, mais de sens opposés.

2.1.2 Force résultante et décomposition de forces

Si plusieurs forces agissent simultanément sur un corps, leurs effets combinés sont équivalents à l'effet d'une seule **force résultante**, obtenue par **addition vectorielle** des forces individuelles :

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

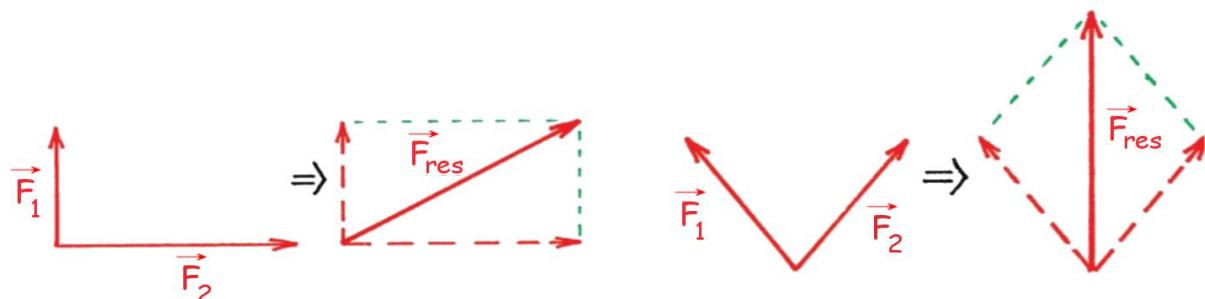
La force résultante dépend de la norme, de la direction et du sens des différentes forces en présence.

| FORCES | FORCE RÉSULTANTE |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Lorsque deux forces agissent suivant la même direction, il faut considérer leur sens :

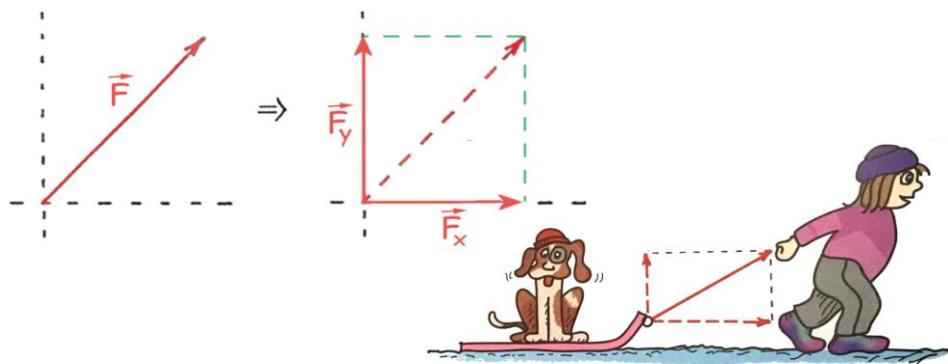
- Si les forces sont de même sens, leurs normes s'ajoutent.
- Si les forces sont de sens opposés, leurs normes se soustraient.

Lorsque les deux forces n'ont pas la même direction, on utilise la **méthode du parallélogramme** : on construit le parallélogramme dont les côtés sont les deux vecteurs forces considérées. La force résultante est alors le « vecteur diagonal » de ce parallélogramme.



Dans le cas particulier de deux forces perpendiculaires (comme dans le premier exemple illustré ci-dessus), le parallélogramme des forces est un rectangle.

Au même titre que l'on peut combiner une paire de forces en une force résultante, toute force peut être **décomposée** en deux forces appelées **composantes**. Par exemple, il est souvent pratique de décomposer une force \vec{F} en une composante tangentielle (parallèle) au mouvement et une composante normale (perpendiculaire) au mouvement. Pour décomposer une force, on peut utiliser la méthode du parallélogramme à l'envers :



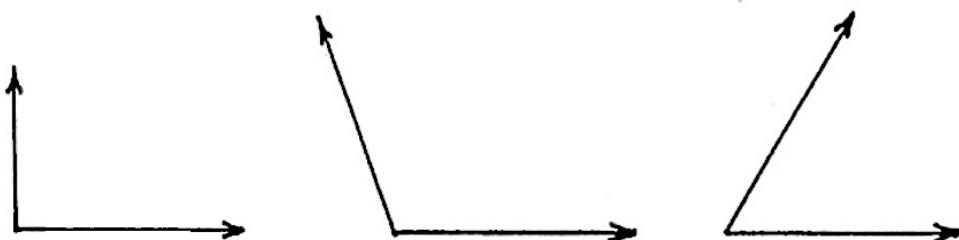
■ As-tu compris ?

3. Déterminer la norme et le sens de la force résultante sur le bloc.

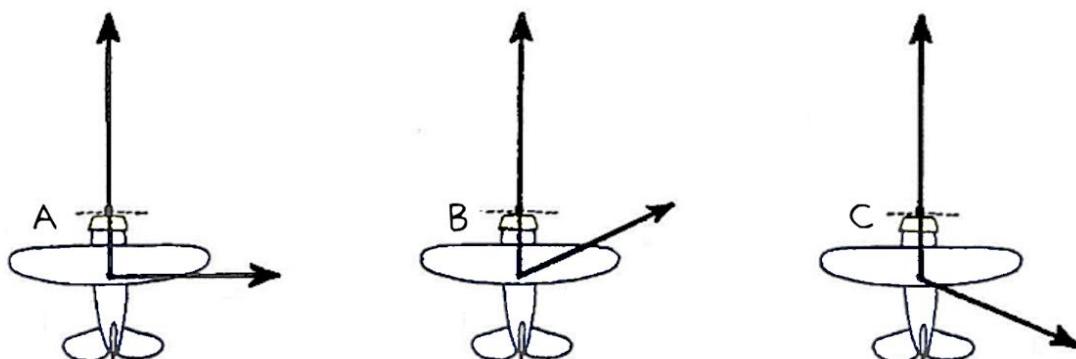


4. On considère une paire de forces, l'une ayant une norme de 20 N et l'autre une norme de 12 N. Quelle force résultante maximale (norme) peut-on obtenir avec ces deux forces ? Quelle force minimale ? Expliquer.

5. Construire le vecteur force résultante.



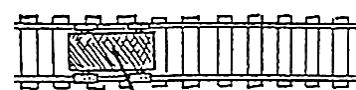
6. Sur la figure sont illustrées la poussée motrice et la poussée latérale de la part du vent qui agissent sur un avion en plein vol.



- a. Représenter la résultante de ces deux forces dans les trois cas.
 b. Dans quel cas la norme de la résultante est-elle la plus grande ?
 c. Dans le cas a, l'avion subit une poussée motrice de 5000 N et une poussée latérale de 2000 N. Calculer la norme et la direction (angle par rapport à l'axe de l'avion) de la force résultante.

7. Un wagon est tiré le long des rails par une force de norme 10 kN et inclinée d'un angle de 60° par rapport aux rails.

- a. Décomposer la force de traction en une composante tangentielle (parallèle) aux rails et une composante normale (perpendiculaire) aux rails.
 b. Calculer la norme de ces deux composantes.



F

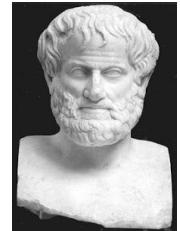
2.2 Première loi de Newton

2.2.1 Un peu d'histoire

Les théories d'Aristote

Selon le philosophe grec Aristote (384-322 BC), chaque corps est constitué des quatre éléments : air, feu, eau et terre. Aristote subdivise le mouvement en deux catégories :

- Le **mouvement naturel** résulte de la tendance des quatre éléments à retrouver leur lieu naturel : la terre et l'eau tombent naturellement vers le bas, l'air et le feu montent naturellement vers le haut. Une pierre est constituée de l'élément terre et tombe donc vers le bas. Les nuages sont constitués de l'élément air et montent donc vers le haut. Selon Aristote, des objets lourds ont une plus forte tendance à retrouver leur lieu naturel. Il en déduit que des corps lourds comme des pierres tombent plus vite que des corps légers comme des plumes. Les corps célestes sont des sphères parfaites constituées d'un cinquième élément éternel, dont le mouvement naturel est une trajectoire circulaire.
- Le **mouvement violent** est provoqué par des forces. Par exemple, une flèche est accélérée parce qu'elle subit une force de la part de la corde de l'arc. Cependant, Aristote n'arrivait pas à expliquer de manière satisfaisante pourquoi la flèche continue son mouvement après avoir quitté l'arc. Une fois qu'un corps se trouve dans son lieu naturel, il ne va plus bouger sans l'action d'une force. Hormis les corps célestes, tous les corps qui se trouvent dans leur lieu naturel sont au repos.



Les idées d'Aristote sur le mouvement des corps sont restées incontestées pendant près de 2000 ans. Jusqu'au XVI^e siècle, la plupart des philosophes sont convaincus que la Terre se trouve au repos. L'existence d'une force assez grande pour faire bouger la Terre était inconcevable.

Copernic et la Terre en mouvement

L'astronome Nicolas Copernic (1473-1543) propose le **système héliocentrique**, selon lequel la Terre et les autres planètes décrivent des cercles autour du Soleil. Ce modèle permet en effet d'expliquer le mouvement observé du Soleil, de la Lune et des planètes à travers le ciel. Craignant une persécution de la part de l'Église, Copernic hésite longtemps à rendre ses idées publiques. Sa théorie risque d'être interprétée comme une attaque contre l'ordre établi. D'ailleurs, Copernic lui-même n'est pas entièrement convaincu de sa théorie, car il n'arrive pas à réconcilier l'idée d'une Terre en mouvement avec les théories d'Aristote. Encouragée par ses amis, il décide finalement de publier son livre *De Revolutionibus*. Il tient dans ses mains la première copie de cette célèbre œuvre le jour de sa mort, le 24 mai 1543.



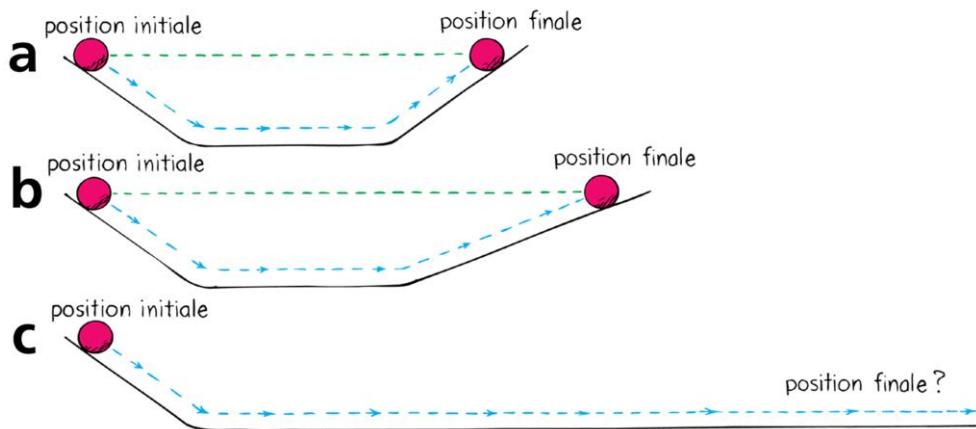
Galilée, la tour de Pise et les plans inclinés

Galilée (1564-1642), scientifique italien de renommée, défend le modèle héliocentrique de Copernic. Il est le premier à fournir une réfutation irréversible des idées d'Aristote sur le mouvement grâce à l'expérience et l'observation (méthode scientifique). Par exemple, Galilée invita une foule de gens à assister à son expérience de la tour de Pise. Contrairement à la prédiction d'Aristote, le public observa que deux boules de masses très différentes tombent de manière identique.



À l'époque d'Aristote, le vide était inconcevable et il n'avait donc pas consacré de réflexions sérieuses sur le concept de mouvement en l'absence de frottement. Selon Aristote, il était nécessaire qu'un corps subisse une force pour qu'il puisse continuer son mouvement. C'est justement cette idée que Galilée remet en question en réalisant des expériences avec des plans inclinés :

- Une boule lâchée sans vitesse initiale descend le premier plan incliné et remonte de l'autre côté. Si la surface est très lisse, la boule peut quasiment atteindre sa hauteur initiale. Galilée en déduit qu'en absence de frottement, la boule pourrait en effet l'atteindre.
- Plus l'inclinaison de la remontée est petite, plus la distance parcourue est grande.
- Si le deuxième plan est horizontal, la boule devrait rouler une distance infinie pour s'approcher de sa hauteur initiale. Seule la force de frottement va l'empêcher de rouler éternellement.



2.2.2 Newton et le principe d'inertie

En se basant sur les découvertes de son prédecesseur, Newton reformula l'idée de Galilée :

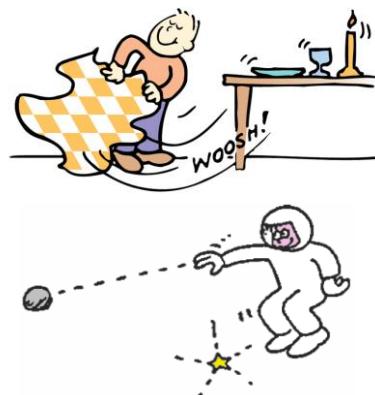
Principe d'inertie (1^{ère} loi de Newton)

Tout corps persévere dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, à moins qu'une force ne le contraine à changer son état de mouvement.



- Un corps au repos tend à rester au repos.
- Un corps en mouvement tend à rester en mouvement rectiligne uniforme. Seule une force résultante sur le corps peut changer son état de mouvement⁵.

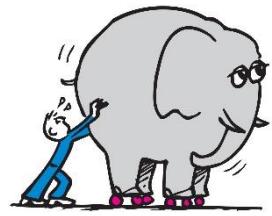
Si un astronaute lance une pierre dans le vide interstellaire, cette pierre va continuer son mouvement rectiligne uniforme à jamais. Cette tendance des corps à rester dans leur état de mouvement est appelée **inertie**.



⁵ Si un corps ne reste pas au repos ou si un corps en mouvement n'effectue pas un mouvement rectiligne uniforme, alors ce corps doit nécessairement subir l'action d'une force résultante.

2.2.3 Masse et poids

La masse d'un corps est une mesure pour la quantité de matière contenue dans le corps. Plus un corps contient de la matière, plus son inertie est grande. La masse est donc une mesure pour l'inertie d'un corps, c'est-à-dire sa tendance à s'opposer à un changement de son état de mouvement. Son unité SI est le **kilogramme (kg)**.



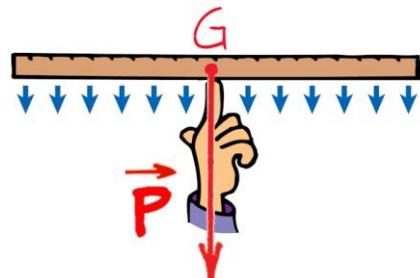
Le **poids \vec{P}** d'un corps est la **force de pesanteur** qu'il subit lorsqu'il se trouve à proximité de la surface d'un corps céleste (la Terre, la Lune, Mars, un astéroïde, ...).

Comme toute force, le poids a quatre caractéristiques :

1. *Point d'application* : le centre de gravité G du corps
2. *Direction* : la verticale passant par le CG du corps
3. *Sens* : Vers le centre du corps céleste
4. *Intensité (norme)* :

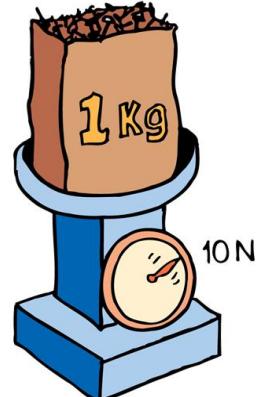
$$\mathbf{P} = \mathbf{m}\mathbf{g}, \text{ où } g \text{ est l'intensité de la pesanteur du lieu.}$$

L'unité SI de la norme du poids est le **newton**



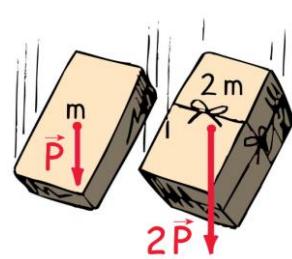
Sur Terre, l'intensité de la pesanteur g est très proche de $10 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$.

| Corps céleste | $g \left(\frac{\text{N}}{\text{kg}} \right)$ | Corps céleste | $g \left(\frac{\text{N}}{\text{kg}} \right)$ |
|-----------------|---|---------------|---|
| Terre | 10 | Vénus | 8,9 |
| Europe centrale | 9,81 | Mars | 3,7 |
| Pôles | 9,83 | Jupiter | 24,5 |
| Équateur | 9,78 | Saturne | 10,4 |
| Lune | 1,62 | Uranus | 8,9 |
| Mercure | 3,7 | Neptune | 11,2 |



En un lieu donné, le poids et la masse d'un corps sont **proportionnels** :

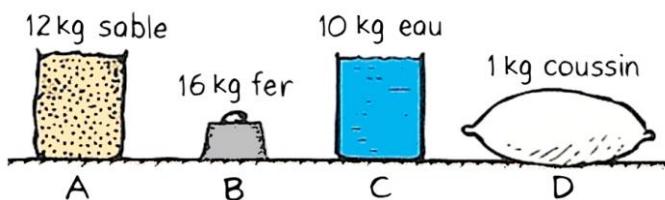
Lorsque la masse double, le poids double également. Intuitivement, on a donc tendance à dire qu'un corps a une grande masse s'il est lourd⁶. Or, la masse est une grandeur plus fondamentale que le poids, car la masse ne dépend pas du lieu. Par exemple, une brique d'une masse de 1 kg a un poids d'environ 10 N sur Terre. Or, elle serait moins lourde sur la Lune où son poids vaudrait 1,62 N. Sur Jupiter, la brique pèserait environ 25 N. En revanche, la masse de la brique serait partout la même, à savoir 1 kg ! La brique présenterait donc la même résistance à un changement de son état de mouvement, quelle se trouve sur Terre, sur la Lune, sur Jupiter ou sur tout autre corps céleste. Dans le vide interstellaire, où le poids de la brique serait nul, la brique aurait toujours la même masse (donc la même inertie). Un astronaute devrait donc y exercer tout autant de force pour secouer la brique que sur Terre.



⁶ Voilà pourquoi la masse et le poids sont souvent confondus dans le langage courant. En effet, nous avons l'habitude de déterminer la masse d'un corps en mesurant en réalité son poids (à l'aide d'une balance électronique ou d'un dynamomètre, calibrés pour la pesanteur sur Terre).

■ As-tu compris ?

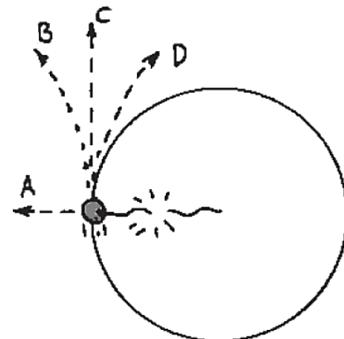
8. Un astronaute dans l'espace intersidéral lance une pierre. La pierre va...
- ralentir peu à peu
 - continuer à vitesse constante
 - accélérer de plus en plus
9. Un palet de hockey finit par s'immobiliser après une longue glissade sur la glace. Cet arrêt est dû au fait...
- que le palet recherche un état de repos
 - qu'une force de frottement agit sur le palet
10. Classer par ordre décroissant les objets selon leur tendance à rester au repos.



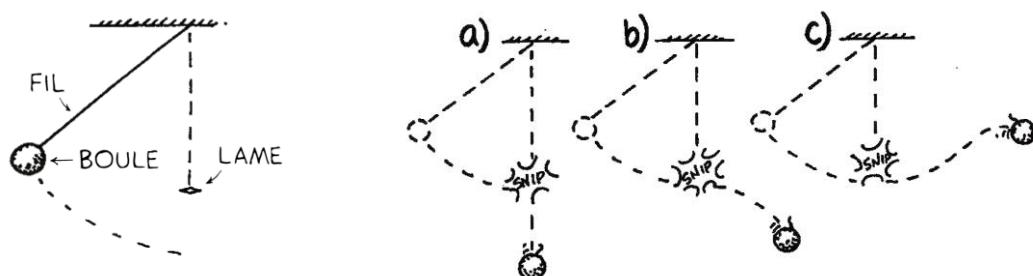
11. Tu trébuches vers l'avant lorsque le bus freine. Tu bascules vers l'arrière lorsque le bus démarre. Expliquer ces observations à l'aide du principe de l'inertie.

12. Lorsque tu pousses un chariot, il roule. Si tu relâches le chariot, il finit par s'arrêter. Est-ce que cette observation contredit la première loi de Newton ? Justifier.

13. La figure ci-contre montre la trajectoire circulaire d'une pierre attachée à une corde qui est tourbillonnée dans le sens des aiguilles d'une montre. Quel chemin la pierre poursuit-elle lorsque la corde casse ?



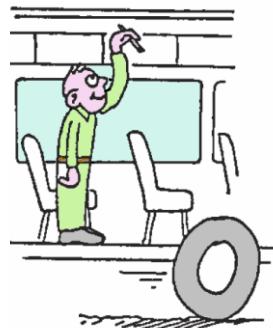
14. La figure ci-dessous montre un pendule. Lorsque la boule atteint le point le plus bas de sa trajectoire, le fil est coupé par une lame de rasoir tranchante. Quelle trajectoire la boule suivra-t-elle ?



15. Ton amie affirme qu'un haltère (« Hantel ») est plus facile à secouer dans l'espace intersidéral que sur Terre. Es-tu d'accord ? Justifier.

16. Une personne se trouve dans un bus qui roule à 100 km/h sur une autoroute horizontale et rectiligne. Elle tient un stylo dans ses mains comme illustré.

- Par rapport au bus, le stylo a une vitesse de 0 km/h, mais par rapport à la route, sa vitesse horizontale vaut...
 - moins que 100 km/h
 - 100 km/h
 - plus que 100 km/h
- Supposons que la personne lâche le stylo. Pendant sa chute, et par rapport à la route, le stylo a une vitesse horizontale de...
 - moins que 100 km/h
 - 100 km/h
 - plus que 100 km/h
- Cela signifie que le stylo va toucher le sol...
 - derrière les pieds de la personne
 - à ses pieds, en dessous de sa main
 - devant les pieds de la personne
- Par rapport à la personne, la façon dont le stylo tombe...
 - est la même que si le bus était à l'arrêt
 - dépend de la vitesse du bus



17. Tu joues à pile ou face dans un avion qui roule sur la piste d'un aéroport en ligne droite. Où la pièce de monnaie atterrit-elle par rapport à ta main si l'avion...

- se déplace à vitesse constante ?
- ralentit pendant que la pièce est en l'air ?
- accélère pendant que la pièce est en l'air ?



18. S'agit-il de la masse ou du poids ?

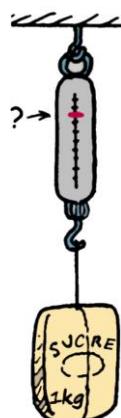
- Cette grandeur dépend uniquement du nombre et du type d'atomes dont le corps est constitué.
- Cette grandeur dépend de l'endroit où le corps se trouve.
- Cette grandeur est une mesure pour l'inertie d'un corps.
- Cette grandeur décrit la force avec laquelle un caillou lunaire est attiré par la Lune.

19. Une fille a une masse de 45 kg.

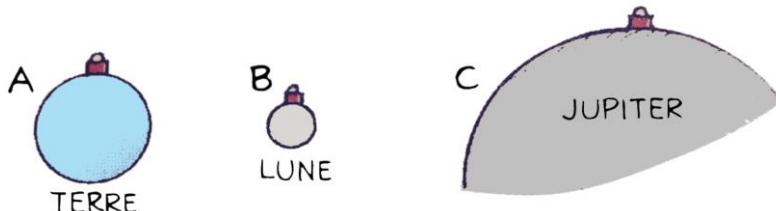
- Calculer le poids de la fille sur Terre.
- Quelle serait la masse de la même fille sur Jupiter, où l'intensité de la pesanteur vaut 25 N/kg ?
- Calculer le poids de la fille sur Jupiter.

20. Un paquet de sucre de masse 1 kg est suspendu au crochet d'un dynamomètre.

- Quel corps tire le paquet de sucre vers le bas ?
- Comment appelle-t-on cette force ?
- Représenter cette force sur la figure (1 cm : 5 N)
- Calculer la valeur indiquée par le dynamomètre.
- Quelle serait la masse du paquet de sucre sur la Lune. Justifier.
- Quelle valeur le dynamomètre indiquerait-il sur la Lune, où l'intensité de la pesanteur ne vaut que 1,62 N/kg ?



21. Trois boîtes à outils identiques de 100 kg se trouvent à la surface de la Terre (A), de la Lune (B) et de Jupiter (C). Ranger par ordre décroissant...



- les inerties des boîtes à outils.
- les poids des boîtes à outils.

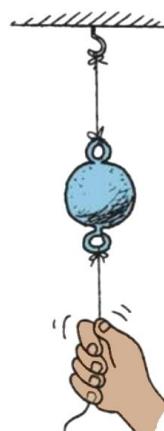
22. Quel matériel devrais-tu nécessairement emporter dans ton vaisseau spatial pour pouvoir déterminer l'intensité de la pesanteur sur une planète inconnue ?

- Une balance à deux plateaux
- Une règle graduée
- Une horloge
- Un dynamomètre
- Un thermomètre
- Une masse marquée



23. Considérons l'expérience illustrée sur la figure ci-contre.

- Quel fil finit par casser en premier lorsque la main tire le fil inférieur de plus en plus fort vers le bas ? Justifier.
 - le fil supérieur
 - le fil inférieur
- Quel fil casse en premier lorsque la main tire le fil inférieur d'un coup sec ? Justifier.
 - le fil supérieur
 - le fil inférieur



2.2.4 Équilibre de forces

On dit qu'un corps est en **équilibre**, lorsque son état de mouvement ne change pas (c'est-à-dire lorsqu'il reste au repos ou en mouvement rectiligne uniforme). Selon le principe d'inertie, ceci est le cas si et seulement si la force résultante sur ce corps est nulle :

$$\text{Équilibre} \Leftrightarrow \overrightarrow{F_{\text{res}}} = \vec{0}$$



Exemples

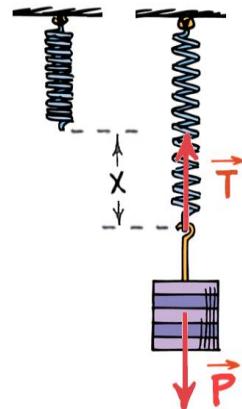
1. Une masse suspendue à un ressort

- La masse subit son poids \vec{P} qui la tire vers le bas.
- Puisque la masse se trouve en équilibre, une autre force, orientée vers le haut et de même norme que le poids, doit agir sur la masse pour compenser le poids. C'est le ressort allongé qui tire la masse vers le haut avec une force appelée tension élastique \vec{T} . On a :

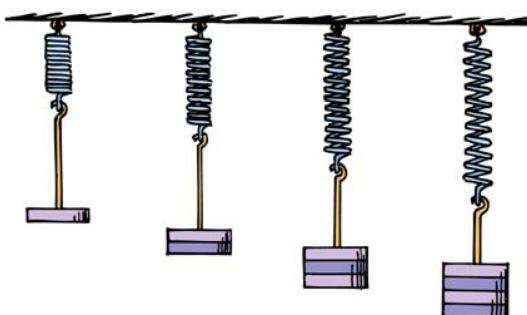
$$\vec{T} + \vec{P} = \vec{0} \quad \text{et donc} \quad T = P$$

Tout ressort déformé d'une distance x exerce une **tension élastique** \vec{T} qui agit vers la position initiale non-déformée. La norme de cette force est donnée par :

$$T = k x, \text{ où } k \text{ est la constante de raideur du ressort exprimée en } \frac{\text{N}}{\text{m}}.$$

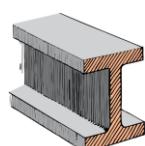


La norme de la tension T d'un ressort est proportionnelle à l'allongement (ou la compression) x du ressort. Cette relation est appelée **loi de Hooke**⁷ et sera étudiée en travaux pratiques.



Remarques

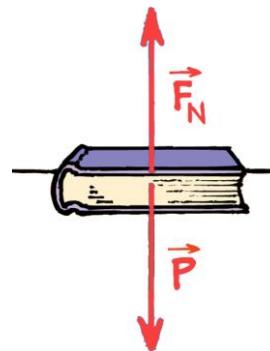
- La loi de Hooke est appliquée dans les dynamomètres pour mesurer la norme des forces.
- Si un corps élastique est allongé au-delà d'une certaine limite, il ne va plus reprendre sa forme initiale après l'action de la force. Le corps subit alors une **déformation durable**. Pour des forces qui dépassent cette **limite d'élasticité** du ressort, la loi de Hooke n'est plus valable.
- L'acier est un excellent matériau de construction. Grâce à sa grande raideur et ses propriétés élastiques, l'acier est utilisé pour la fabrication de poutres et de supports.



⁷ En l'honneur de Robert Hooke, éminent scientifique britannique, qui a formulé cette loi au 17^e siècle. Robert Hooke fut le premier à proposer une théorie ondulatoire de la lumière et le premier à décrire la cellule. Il est connu en tant que père de la microscopie.

2. Un livre sur une table

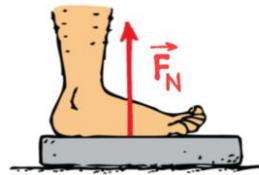
- Le poids \vec{P} du livre agit verticalement vers le bas.
- Une autre force, orientée vers le haut et de même norme que le poids, doit agir sur le livre pour compenser le poids. En comprimant un ressort avec la main, on sent que le ressort pousse la main vers le haut. Similairement, le livre « comprime » les atomes de la table. Ces atomes agissent comme des ressorts microscopiques en poussant le livre vers le haut. C'est donc la table qui pousse le livre vers le haut avec une force qu'on appelle force de support (ou force normale) \vec{F}_N .



$$\vec{F}_N + \vec{P} = \vec{0} \text{ et donc } F_N = P$$

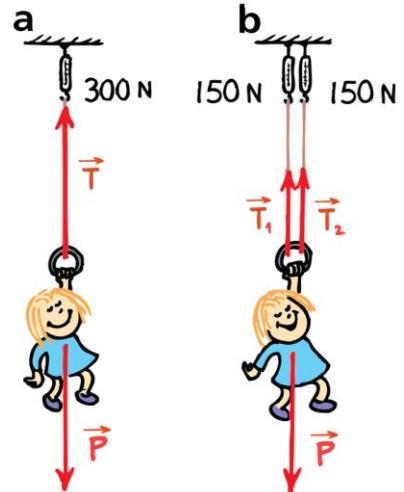
Tout corps qui repose sur une surface subit une **force de support (ou force normale) \vec{F}_N** qui agit toujours perpendiculairement à la surface de contact et vers le corps.

Une balance électronique indique une masse, mais mesure en réalité la norme de la force de support. Lorsqu'une personne se trouve en équilibre sur une balance sur un sol horizontal, la force de support a même norme que le poids de la personne.

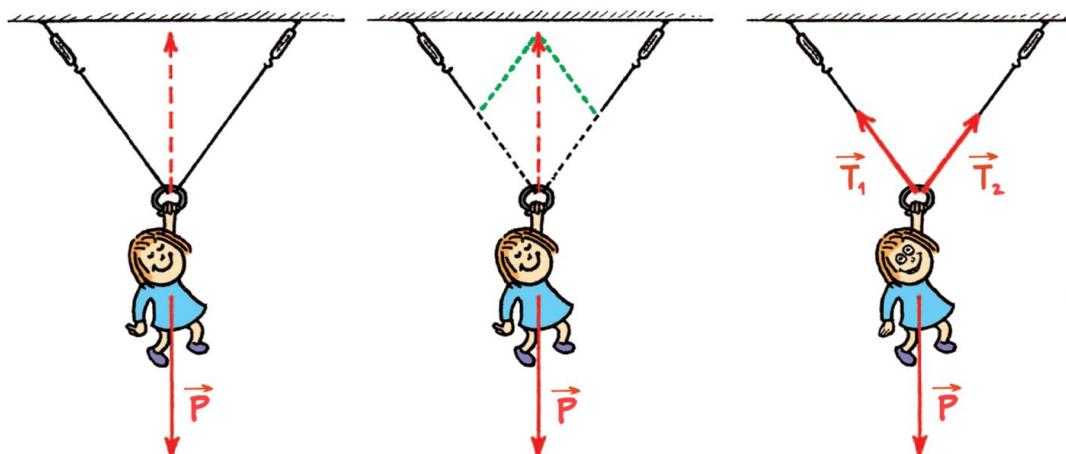


3. Une fille suspendue à une ou plusieurs cordes

- Lorsqu'une fille de poids 300 N est suspendue en équilibre à une seule corde verticale, celle-ci est tendue et la norme de la **tension dans la corde** vaut 300 N.
- Lorsque la fille est suspendue à deux cordes verticales, la somme des tensions dans les cordes doit également avoir une norme de 300 N. La norme de la tension dans chaque corde vaut 150 N.

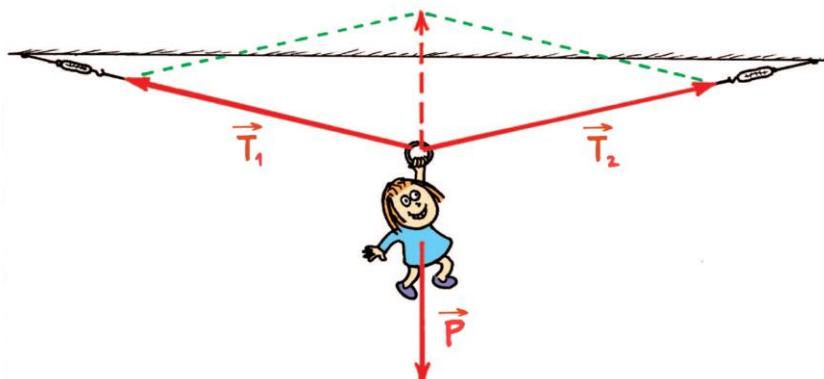


Pour déterminer les tensions dans les cordes lorsque celles-ci ne sont pas verticales, on peut utiliser la méthode du parallélogramme :

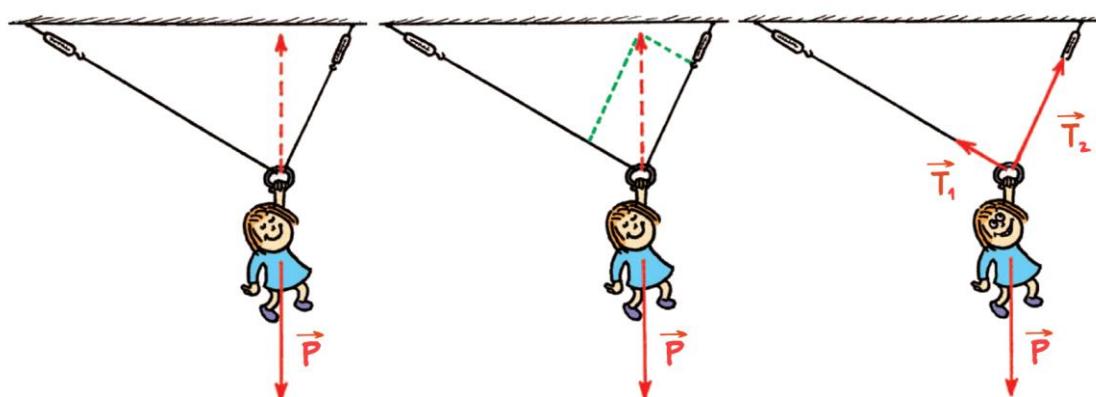


On représente un vecteur de même norme que \vec{P} , mais de sens opposé (pointillés) et le décompose en deux composantes parallèles aux cordes. Ces deux composantes représentent les tensions dans les cordes. On constate que la tension dans chaque corde est plus grande que la moitié du poids de la fille.

Lorsque l'angle entre les cordes augmente, les tensions dans les cordes augmentent également. Dans tous les cas, leur somme vectorielle compense le poids de la fille.



Si les deux cordes sont inclinées à des angles différents, les tensions dans les cordes sont différentes. La tension dans la corde la moins inclinée par rapport à la verticale est plus grande.

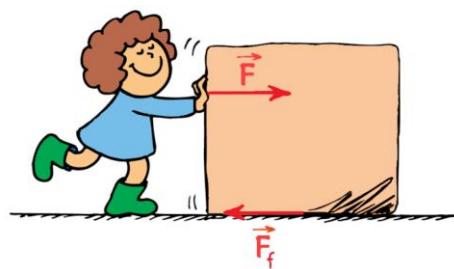


Dans tous les cas, la fille est en équilibre $\Leftrightarrow \vec{F}_{\text{res}} = \vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{P} = \vec{0}$

4. Une caisse poussée à vitesse constante sur un sol horizontal

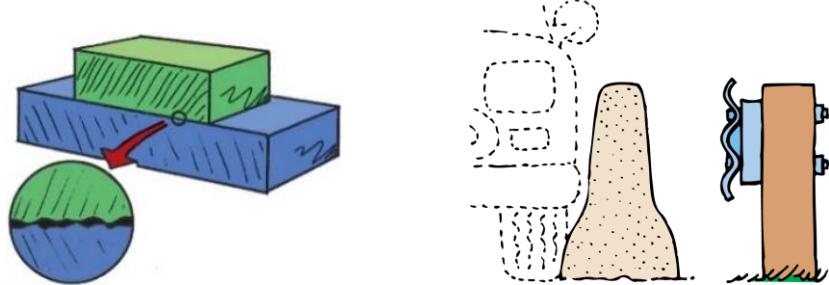
Quelles forces agissent sur la caisse ?

- Le poids \vec{P} agit verticalement vers le bas.
- La force normale \vec{F}_N agit verticalement vers le haut et compense le poids : $P = F_N$
- La poussée \vec{F} agit horizontalement dans le sens du mouvement.
- Puisque la caisse se trouve en équilibre, il doit y avoir une quatrième force qui agit horizontalement dans le sens opposé du mouvement et qui compense la poussée, de manière que la force résultante sur la caisse soit nulle. Il s'agit bien-sûr de la force de frottement \vec{F}_f .



$$\vec{F}_{\text{res}} = \vec{P} + \vec{F}_N + \vec{F} + \vec{F}_f = \vec{0} \quad \text{et donc} \quad F = F_f$$

La force de frottement est principalement due aux irrégularités des surfaces de contact. Bien qu'une surface puisse paraître lisse à l'œil nu, elle présente des irrégularités microscopiques qui entravent le mouvement. Des surfaces lisses offrent en général moins de frottement que des surfaces rugueuses. Par exemple, le frottement produit par un pneu en caoutchouc contre le béton d'un diviseur de route est plus important que le frottement produit par la carrosserie contre une glissière de sécurité.

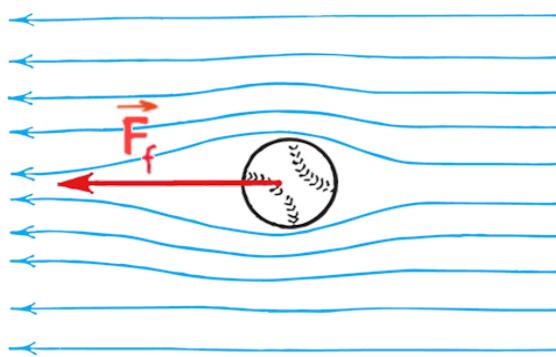


La **force de frottement** \vec{F}_f est une force d'interaction entre deux corps en contact qui glissent l'un sur l'autre ou adhèrent l'un à l'autre. La force de frottement agit toujours dans le sens opposé du mouvement.

Remarques

- La norme de la force de frottement sur un corps qui glisse est proportionnelle à la force pressante entre les surfaces, c'est-à-dire à la force normale F_N . Elle ne dépend ni de la vitesse du mouvement, ni de l'aire de la surface de contact⁸.
- Aucune force de frottement n'agit sur une caisse qui repose sur un sol horizontal. En poussant la caisse, on perturbe les surfaces de contact, créant ainsi du frottement. Si la poussée est insuffisante pour mettre la caisse en mouvement, c'est que la poussée est compensée par la force de frottement entre les surfaces. Lorsque l'adhésion de la caisse cède, elle commence à glisser et la force frottement devient légèrement plus petite. On doit donc exercer plus de force pour mettre la caisse en mouvement que pour la maintenir en mouvement rectiligne uniforme.

Du frottement agit également lorsqu'un corps traverse un **fluide** (liquide ou gaz). Contrairement au frottement entre des surfaces solides, le frottement dans les fluides dépend fortement de la vitesse. Le frottement dans les liquides est appréciable, même à faible vitesse. Le frottement qui agit sur un corps qui se déplace dans l'air est appelé **résistance de l'air**. Lors d'une promenade ou d'un jogging, on ne s'en rend pas compte, mais on la remarque à des vitesses plus élevées, par exemple lors d'une descente à vélo ou à skis.

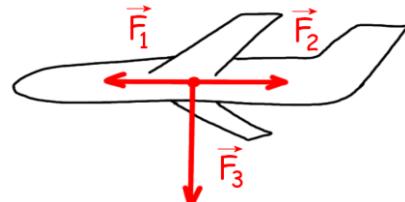


La balle se déplace vers la droite ; la résistance de l'air agit vers la gauche.

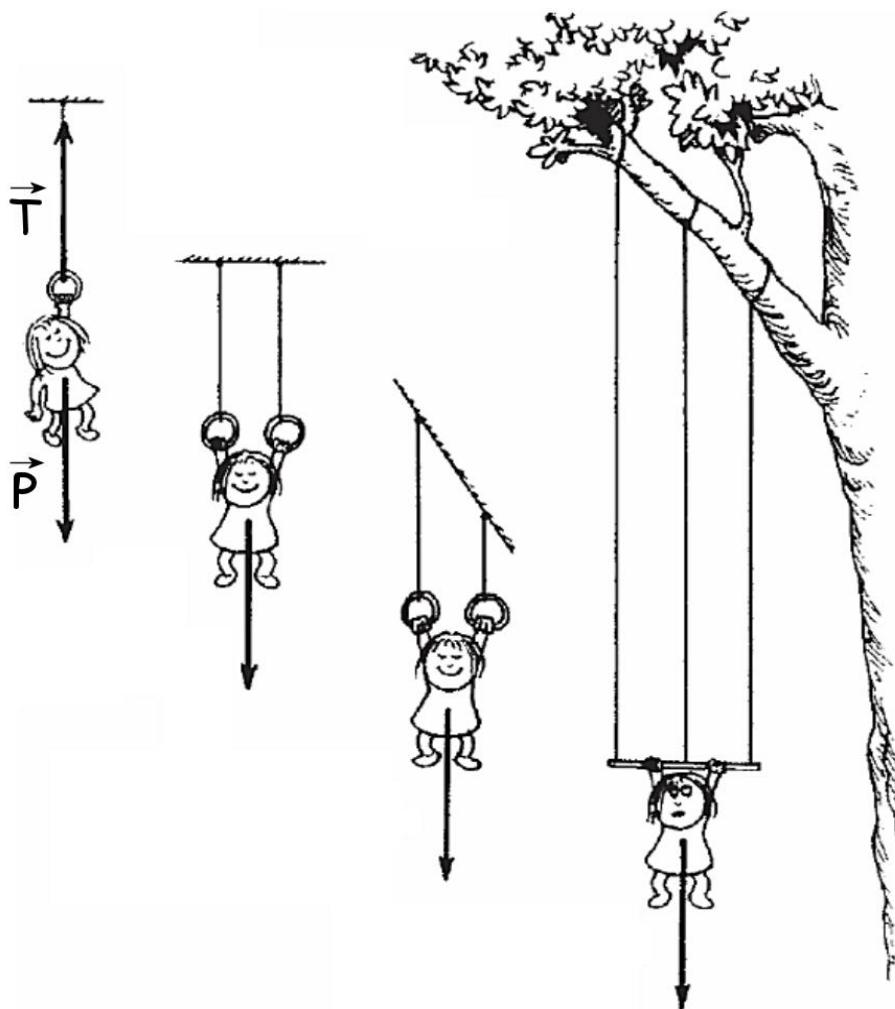
⁸ Une surface de contact plus grande répartit mieux le même poids de la brique, réduisant ainsi la *pression* exercée au niveau de la surface. Le réchauffement et l'usure des surfaces sont réduits, mais la force de frottement reste inchangée.

■ As-tu compris ?

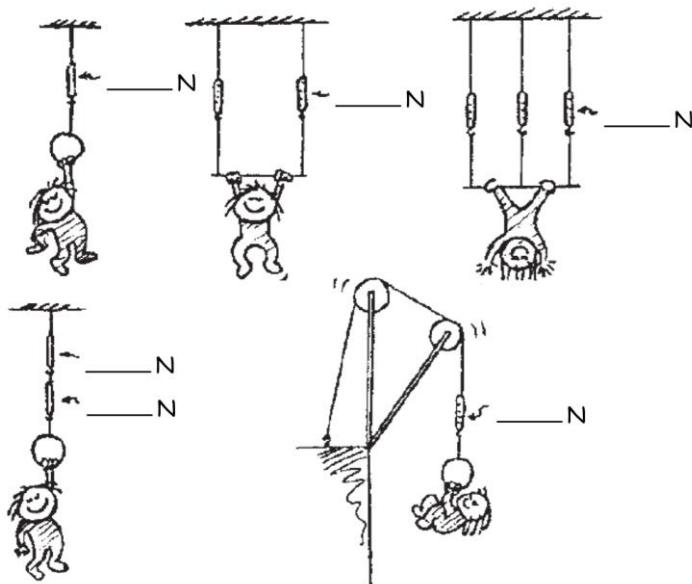
24. Un objet peut-il être en équilibre lorsqu'il n'est soumis qu'à une seule force ? Justifier.
25. Un livre de poids 15 N repose sur une table horizontale. Que vaut la force de support exercée par la table sur le livre ? Que vaut la force résultante sur le livre ?
26. Lorsque tu pousses un chariot avec une force constante de 100 N et que le chariot roule alors à vitesse constante, que vaut la force de frottement qui agit sur le chariot ?
27. Un avion vole en MRU à une altitude constante de 10 km.
- Deux forces horizontales agissent sur l'avion. La première est la poussée motrice \vec{F}_1 . Identifier \vec{F}_2 .
 - Comparer la norme de ces deux forces. Justifier.
 - Le poids $\vec{P} = \vec{F}_3$ de l'avion agit verticalement vers le bas. L'avion doit subir une quatrième force \vec{F}_4 . Pourquoi ?
 - Représenter \vec{F}_4 sur la figure.



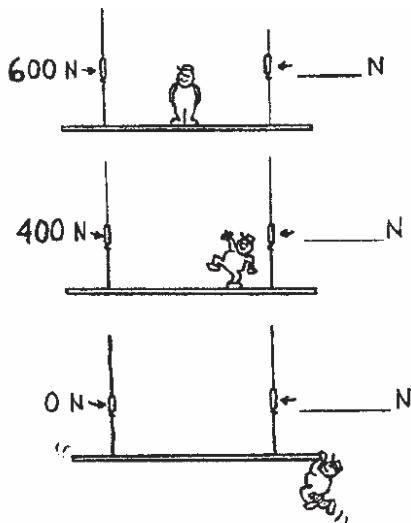
28. Représenter les tensions dans les cordes.



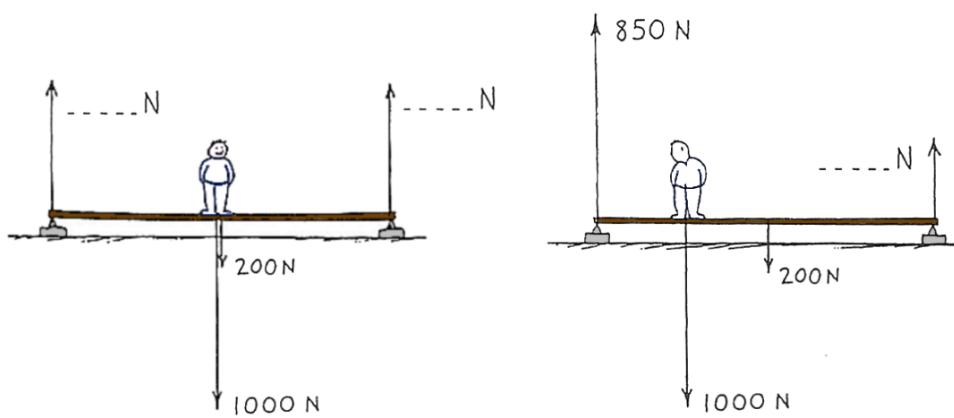
29. La fille a un poids de 300 N et se trouve en équilibre. Donner la valeur indiquée par le dynamomètre dans chaque cas.



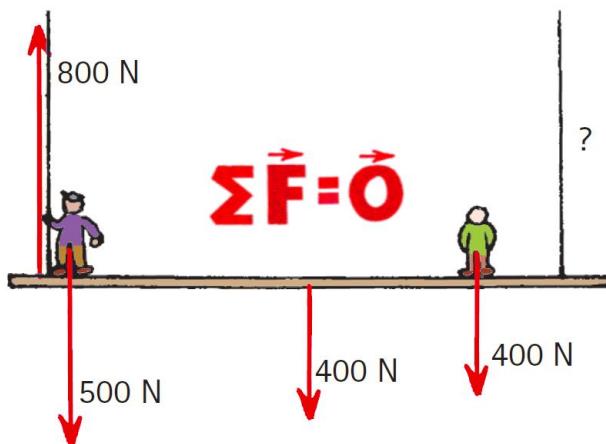
30. Indiquer la mesure du dynamomètre.



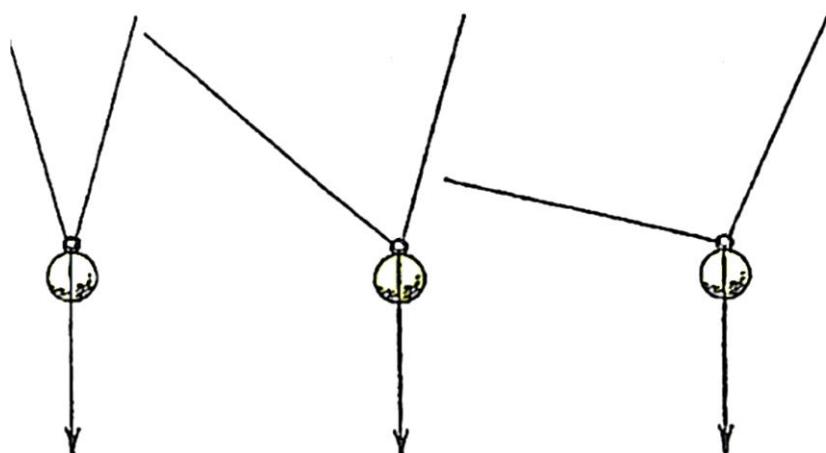
31. Un homme de poids 1000 N se trouve sur une planche. La planche a un poids de 200 N et repose des deux côtés sur des balances électroniques. Quelles valeurs (en kg) les balances indiquent-elles dans les deux cas illustrés ?



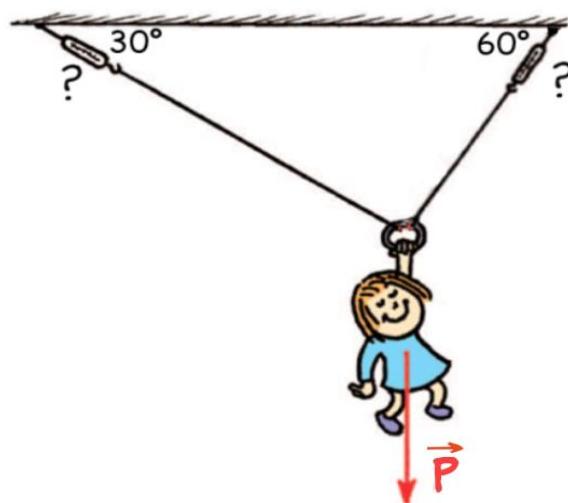
32. Deux peintres se trouvent sur une planche d'un échafaudage. Calculer la norme de la tension dans la corde de droite et représenter le vecteur tension sur la figure.



33. Construire les vecteurs des tensions dans les fils.



34. Facultatif : La masse de la fille suspendue aux cordes vaut 30 kg. Les deux bouts de corde font un angle droit. Calculer la norme des tensions dans les deux cordes.



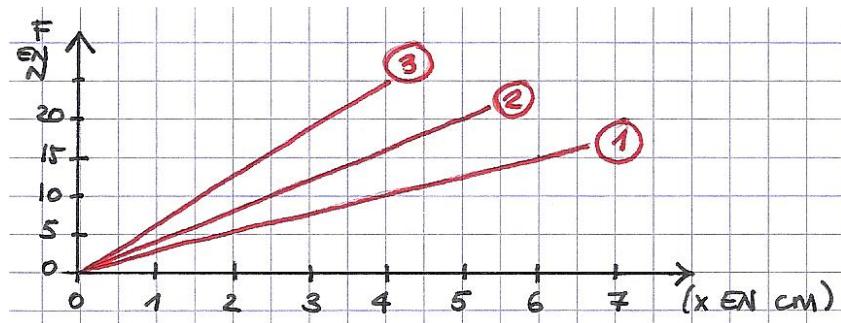
35. Lorsqu'une balle est lancée verticalement vers le haut, elle s'immobilise momentanément au sommet de sa trajectoire. Est-elle en équilibre à cet instant ? Expliquer.

36. Un ressort s'allonge de 6 cm lorsqu'on y accroche une masse de 2 kg (une fois que la masse se trouve en équilibre). Calculer la constante de raideur du ressort. Quelle force faut-il exercer sur le ressort pour qu'il s'allonge de 10 cm ?

37. Un ressort est allongé de 2 cm par une masse accrochée de 100 g.

- Déterminer la raideur du ressort en unité SI.
- De combien le ressort s'allonge-t-il si on y accroche un objet de poids 4,5 N ?
- Quelle masse faut-il accrocher au ressort pour l'allonger de 5 cm ?

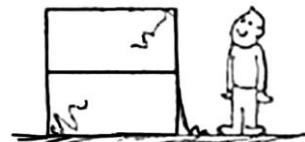
38. Voici les caractéristiques de trois ressorts différents :



- Lequel des ressorts est le plus raide ? Le moins raide ? Justifier sans calcul.
- Déterminer les constantes de raideur des trois ressorts.

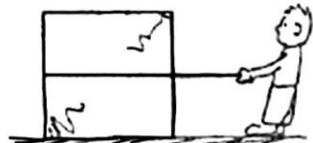
39. L'histoire d'une caisse.

- Une caisse se trouve au repos. Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?



- Un garçon exerce une force de traction sur la caisse. Cette force est néanmoins insuffisante pour mettre la caisse en mouvement.

- Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?
- Représenter toutes les forces qui s'exercent sur la caisse.



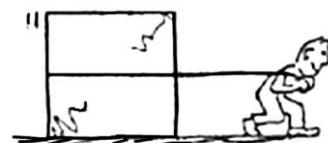
- Le garçon tire plus fort et la caisse est mise en mouvement.

- Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?
- Représenter les forces sur le schéma.
- Que peut-on dire de l'état de mouvement de la caisse dans cette phase ?



- Le garçon tire désormais de façon que la caisse se déplace à vitesse constante.

- Que peut-on dire au sujet de la force résultante sur la caisse ?
- Représenter les forces sur le schéma.



2.3 Deuxième loi de Newton

Galilée a défini l'accélération comme étant la variation de la vitesse par unité de temps. Mais comment une accélération est-elle produite ? Selon Newton, la cause de toute accélération est une force résultante. Si une force résultante agit sur un corps, alors son état de mouvement change. Le corps accélère suivant la direction et dans le même sens que la force résultante, et ce de façon d'autant plus importante que sa masse (son inertie) est petite.

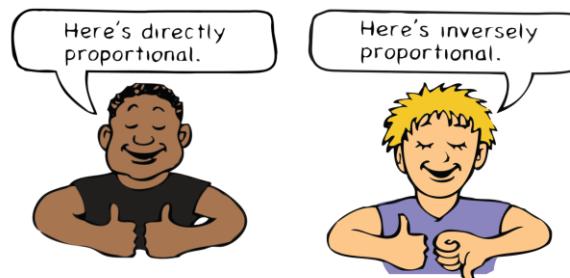
Principe fondamental de la dynamique (2^e loi de Newton)

Un corps accélère dans la direction et le sens de la force résultante qu'il subit. La norme de l'accélération est proportionnelle à la norme de la force résultante et inversement proportionnelle à la masse du corps.

$$a = \frac{F_{res}}{m}$$

Unités SI :

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



Exemples

1. Une voiture a une masse de 1 t. L'accélération produite par une force résultante de 2000 N vaut

$$a = \frac{F_{res}}{m} = \frac{2000 \text{ N}}{1000 \text{ kg}} = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Si la force résultante vaut 4000 N, l'accélération de la voiture vaut le double, à savoir $4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

2. Dans les exemples ci-dessous, des briques sont accélérées sans frottement sur une surface très lisse. La norme de l'accélération dépend de la norme de la force et de la masse des briques.



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



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



$$a = \frac{1 \text{ N}}{3 \text{ kg}} = \frac{1 \text{ m}}{3 \text{ s}^2}$$



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



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

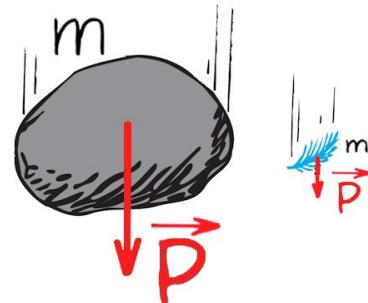
Conséquences du PFD

1. Définition de l'unité de force : $[F] = [m] \cdot [a] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{N}$

1 newton (1 N) est la norme d'une force qui accélère une masse de 1 kg de 1 m/s^2 .

2. Galilée a observé que tous les corps en chute libre subissent la même accélération, indépendamment de leur masse. Le principe fondamental permet d'expliquer cette observation. En effet, la seule force qui agit sur un corps en chute libre est son poids. Selon la 2^e loi de Newton :

$$a = \frac{F_{res}}{m} = \frac{P}{m} = \frac{mg}{m} = g$$



L'accélération de chute libre est indépendante de la masse du corps.

3. Double signification de $g = \frac{P}{m}$:

- L'intensité de la pesanteur (en Europe centrale) indique le poids d'un corps de 1 kg :

$$g = 9,81 \text{ N/kg}$$

$$\frac{P}{m} = \frac{P}{m} = g$$

- L'accélération de chute libre (en Europe centrale) d'un corps indique sa variation de vitesse par unité de temps :

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

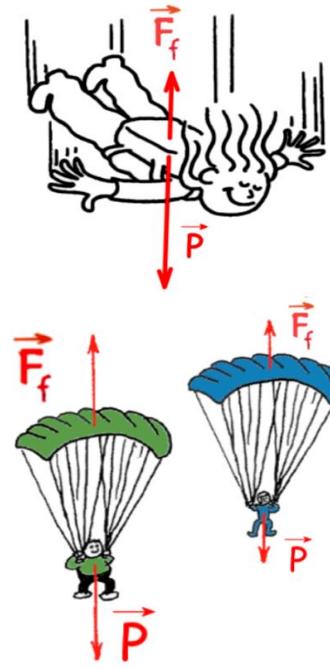
4. Si la force résultante sur un corps est nulle, alors son accélération est nulle. Cela signifie que le corps reste soit au repos soit en mouvement rectiligne uniforme. Le principe d'inertie est donc un cas particulier du principe fondamental.
5. Si la résistance de l'air n'est pas négligeable, l'accélération de chute est inférieure à g :

$$a = \frac{F_{res}}{m} = \frac{P - F_f}{m} = \frac{mg - F_f}{m} = g - \frac{F_f}{m} < g$$

Voilà pourquoi une plume et une pièce de monnaie tombent avec des accélérations identiques dans le vide, mais avec des accélérations différentes dans l'air. Dans l'air, la plume accélère moins parce que la résistance de l'air n'est pas négligeable devant le poids de la plume et diminue considérablement la force résultante qui agit sur la plume.

La résistance de l'air dépend à la fois de la vitesse et du profil du corps qui tombe. Si la vitesse de chute augmente, la résistance de l'air augmente également jusqu'à ce qu'elle compense exactement le poids du corps : $F_f = mg$.

À partir de ce moment, la force résultante sur le corps est nulle et le corps n'accélère plus. Le corps tombe alors avec une vitesse constante, appelée **vitesse terminale**. Plus la masse du corps est grande, plus la vitesse terminale est élevée (à profil constant). Par exemple, le parachutiste vert descend à une vitesse terminale plus grande que le parachutiste bleu.



■ As-tu compris ?

40. Expliquer pourquoi la 1^{ère} loi de Newton peut être considérée comme un cas particulier de la 2^{ème} loi de Newton.
41. Quelle force résultante doit agir sur un avion de 180 tonnes afin de l'accélérer de $1,5 \text{ m/s}^2$?
42. Si une voiture peut accélérer de 2 m/s^2 , quelle accélération peut-elle atteindre lorsqu'elle tire une remorque de même masse qu'elle ?
43. Un chariot est poussé et subit une certaine accélération. Lorsque le chariot est poussé avec une force résultante deux fois plus grande et que sa masse est augmentée d'un facteur quatre, son accélération...
- devient quatre fois plus petite
 - est réduite de moitié
 - devient le double
 - reste identique
44. Quelle est la force résultante sur une pomme de 200 g lorsque tu la tiens au-dessus de ta tête ? Quelle est la force résultante sur la pomme une fois que tu l'as lâchée ?
45. Une voiture de course roule sur une route rectiligne avec une vitesse constante de 200 km/h. Quelle force résultante agit sur la voiture ?
46. Un homme de 100 kg roule sur son skateboard à une vitesse de 9,0 m/s quand il entre en collision avec une botte de foin et s'arrête en 0,2 s.
- Calculer la décélération de l'homme.
 - Calculer la norme de la force que subit l'homme lors de l'impact.
47. Une personne de masse totale 80 kg est accélérée par une force de propulsion.

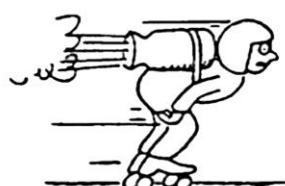


TABLEAU 1

| FORCE | ACCELERATION |
|-------|--------------------|
| 100 N | |
| 200 N | |
| | 10 m/s^2 |

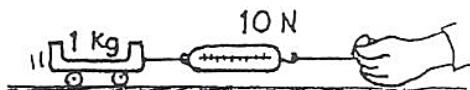
TABLEAU 2

| FORCE | ACCELERATION |
|-------|--------------|
| 50 N | |
| 100 N | |
| 200 N | |

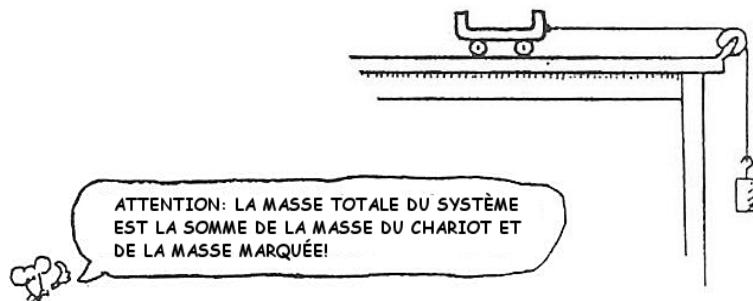
- Remplir le tableau 1 en négligeant le frottement.
 - Remplir le tableau 2 en supposant une force de frottement constante de 50 N.
48. La fusée Falcon 9 FT a une masse au départ de 550 t. Au décollage, elle est propulsée par des réacteurs Merlin 1D qui fournissent une poussée totale de 7,6 MN. Calculer l'accélération de la fusée (ignorer la résistance de l'air). Au bout de combien de secondes a-t-elle atteint une vitesse de 100 km/h ?

49. Accélération d'un chariot

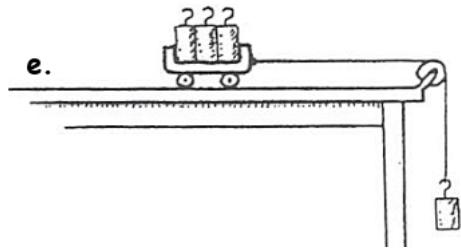
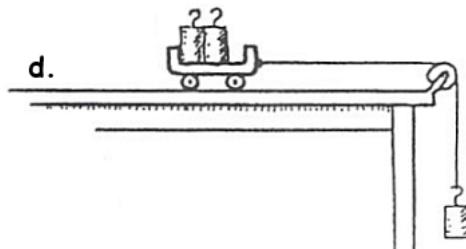
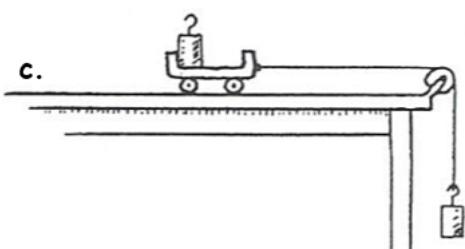
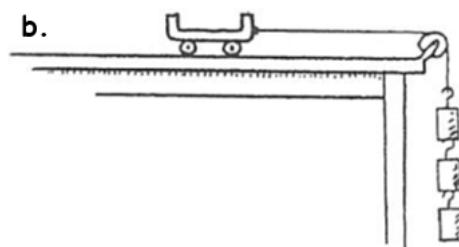
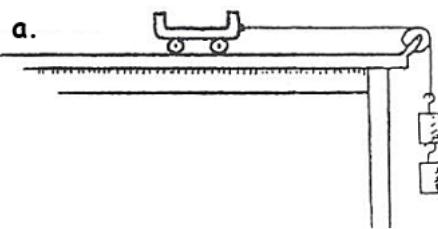
1. Calculer l'accélération du chariot dans le cas illustré ci-dessous.



2. Une masse de 1 kg est reliée au chariot par l'intermédiaire d'un fil qui passe par une poulie tel qu'illustré. Calculer l'accélération du chariot.



3. Calculer l'accélération du chariot dans les cas suivants. Les masses marquées ont toutes 1 kg.

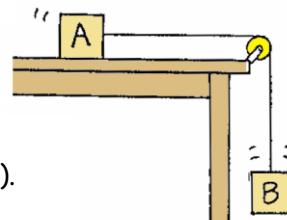


50. Sur une table horizontale, le bloc A est accéléré sans frottement par une force exercée par un fil attaché au bloc B.

1. A et B ont la même masse m et la masse du fil est négligeable.

Encercler les réponses correctes :

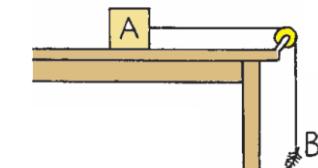
- a. La masse du système A+B est égale à (m) ($2m$).
- b. La force qui accélère le système est le poids de (A) (B) (A+B).
- c. Le poids de B est égal à $(mg/2)$ (mg) ($2mg$).
- d. Utiliser la deuxième loi de Newton pour montrer que l'accélération de A+B est une fraction de g .



2. Supposons que A est toujours un bloc, mais B est une plume.

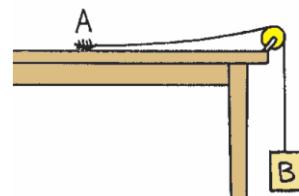
L'accélération de A+B est dans ce cas

- presque nulle
- presque g



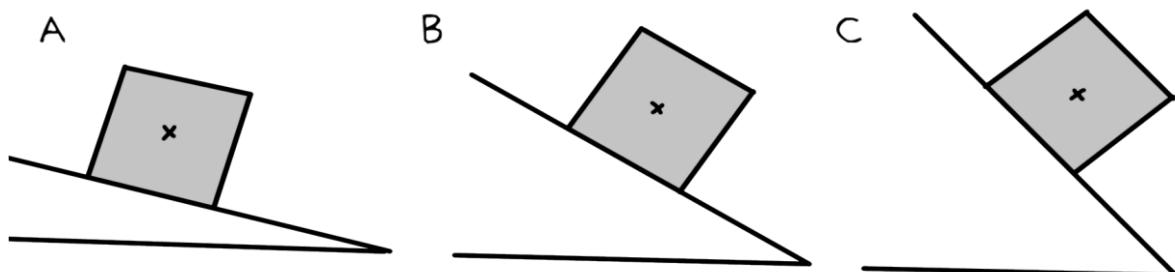
3. Supposons maintenant que A est une plume et que B est un bloc. Dans ce cas, l'accélération de A+B est

- presque nulle
- presque g



4. En résumé, on constate qu'à chaque fois où le poids d'un corps cause l'accélération de deux corps, le domaine des accélérations possibles est entre $(0$ et $g)$ (g et infini) (g et infini).

51. Un bloc de masse $m = 2$ kg se trouve sur les trois plans inclinés ci-dessous. Le frottement est négligé.



- a. Calculer le poids du bloc et représenter-le sur les schémas A, B et C (échelle : 5 N/cm). Indiquer les composantes tangentielle et normale du poids par rapport au plan incliné.

- b. Plus la pente est raide, plus la norme de la composante tangentielle du poids...

- A. devient grande B. devient petite C. reste identique

- c. Quelle est la nature du mouvement du bloc ?

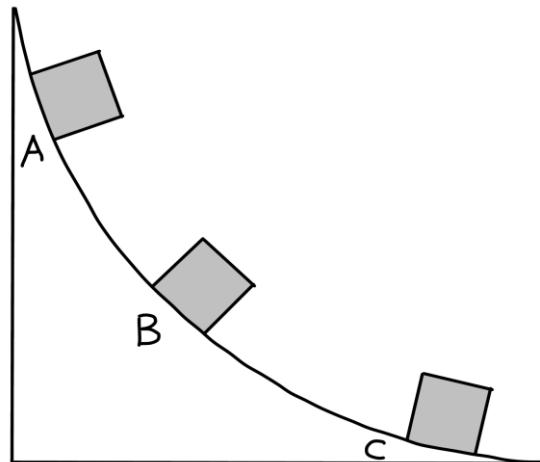
- d. Déterminer l'expression de l'accélération du bloc en fonction de l'angle d'inclinaison α du plan incliné. Est-ce qu'elle dépend de la masse du bloc ?

- e. Dans le cas où $\alpha = 30^\circ$, calculer la vitesse du bloc après une descente de 50 cm.



52. Le même bloc glisse le long d'une courbe.

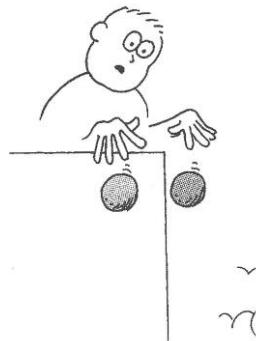
- Représenter sur le schéma le poids du bloc (échelle : 10 N/cm) ainsi que les composantes tangentielles du poids en A, B et C.
- En quel point (A, B ou C) la norme de la composante tangentielle du poids est-elle la plus grande ?
- Le bloc est-il uniformément accéléré ? Justifier.
- Ranger par ordre décroissant les accélérations du bloc en A, B et C.



53. Utiliser la deuxième loi de Newton pour justifier que tous les objets ont même mouvement de chute libre.

54. Lorsque Galilée a laissé tomber deux boules de la tour penchée de Pise, la résistance de l'air n'était pas vraiment négligeable. Dans ce cas, si les deux boules sont de même taille mais l'une est en fer et l'autre en bois, laquelle des deux boules touchera le sol en premier ?

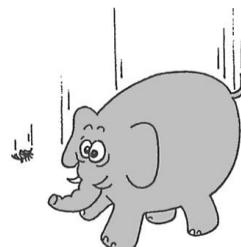
- La boule de fer
- La boule en bois
- Les deux en même temps
- Le résultat n'est pas prévisible



55. Quelle force résultante agit sur une balle de masse 500 g qui tombe et qui subit à cet instant une résistance de l'air de 2 N ? À cet instant, que vaut l'accélération de la balle ?

56. Qui subit une résistance de l'air plus grande lors d'une chute à la vitesse terminale ? Justifier.

- La plume
- L'éléphant
- Identique pour les deux



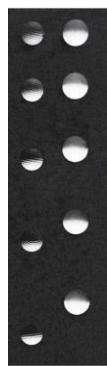
57. Qui subit une résistance de l'air plus grande lors d'une chute à la vitesse terminale ? Justifier.

- Une feuille de papier.
- La même feuille de papier froissée en forme de boule.

58. Vrai ou faux ? Justifier.

« Avant qu'une balle qui tombe n'atteigne sa vitesse terminale, sa vitesse augmente, tandis que son accélération diminue. »

59. Lorsqu'on lâche une balle de tennis de table et une balle de golf simultanément à hauteur d'épaules, les deux balles atteignent le sol à peu près au même instant. Si, en revanche, on lâche les deux balles du haut d'une échelle, la balle de golf va toucher le sol en premier. Pourquoi ?



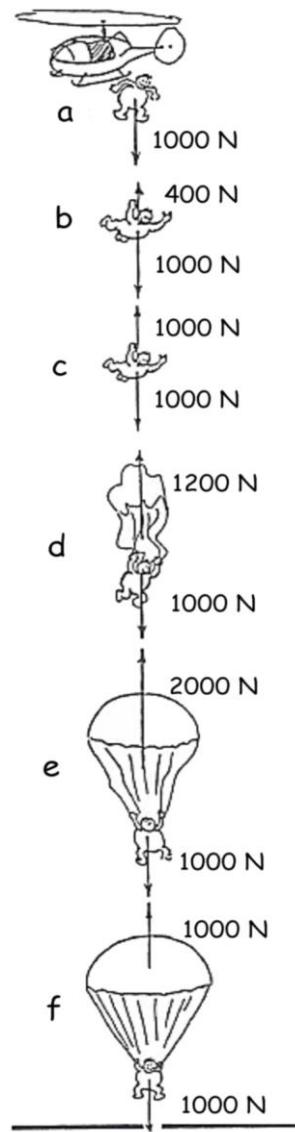
60. Lorsque la résistance de l'air est nulle, une balle lancée verticalement vers le haut avec une certaine vitesse initiale va repasser par le point de lancement avec la même vitesse dans l'autre sens. Lorsque la résistance de l'air n'est pas négligeable, la balle va repasser

- A. plus rapidement
- B. plus lentement
- C. à la même vitesse

61. Un parachutiste de masse 100 kg saute d'un hélicoptère au repos.

Différentes phases de la chute sont illustrées.

1. Calculer pour chaque phase l'accélération du parachutiste.
2. Encercler les propositions correctes.
 - À l'instant du saut (position a), son accélération est (minimale) (maximale).
 - En quelle(s) position(s) le parachutiste subit-il une accélération vers le bas ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
 - En quelle(s) position(s) le parachutiste subit-il une accélération vers le haut ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
 - Lorsque le parachutiste subit une accélération vers le haut, sa vitesse est dirigée vers (le bas) (le haut).
 - En quelle(s) position(s) la vitesse du parachutiste est-elle constante ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
 - En quelle(s) position(s) le parachutiste se déplace-t-il à une vitesse terminale ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
 - En quelle(s) position(s) sa vitesse terminale est-elle plus grande ? (a) (b) (c) (d) (e) (f)
 - Si le poids du parachutiste était plus grand, sa vitesse terminale serait (plus petite) (égale) (plus grande).



2.4 Troisième loi de Newton

Principe de l'action et de la réaction (3^e loi de Newton)

Si un corps A exerce une force sur un corps B (action $\vec{F}_{A/B}$), alors le corps B exerce une force sur le corps A (réaction $\vec{F}_{B/A}$). Les deux forces ont même norme et même direction, mais sont de sens opposé.



Une interaction consiste toujours en une paire de forces qui agissent sur **deux corps différents**. Les deux forces apparaissent et disparaissent simultanément. Il est donc arbitraire laquelle des deux forces on appelle « action » et laquelle on appelle « réaction ».



Exemples

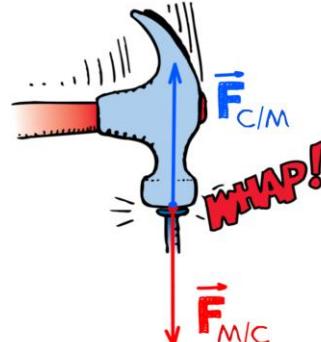
- On frappe un clou avec un marteau :

Action : Le marteau exerce une force $\vec{F}_{M/C}$ sur le clou.

Réaction : Le clou exerce une force $\vec{F}_{C/M}$ sur le marteau.

En effet, cette force freine le marteau lors de l'impact.

Les deux forces ont la même direction et la même intensité mais elles sont de sens opposé.



- Un canon tire un obus :

Action : Le canon exerce une poussée $\vec{F}_{C/O}$ sur l'obus.

Réaction : L'obus exerce une poussée $\vec{F}_{O/C}$ sur le canon. C'est le recul du canon.



Les deux forces ont la même intensité et sont de sens opposé. Notons que les accélérations des deux corps en interaction sont très différentes, car leurs masses sont différentes :

Accélération de l'obus :

$$\frac{F}{m} = a$$

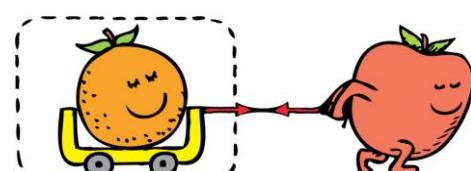
Accélération du canon :

$$\frac{F}{m} = a$$

Remarque

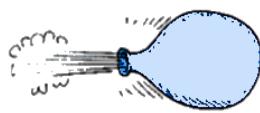
Comme les forces de l'action et de la réaction sont opposées et de même norme, pourquoi ne se neutralisent-elles pas ?

Considérons le système de l'orange. Une force est exercée par la pomme, qui est extérieure au système. D'après le principe fondamental, l'orange accélère vers la droite. Le fait que l'orange exerce simultanément une force sur la pomme influence la pomme, mais pas l'orange. On ne peut pas annuler une force sur l'orange par une force qui agit sur la pomme, extérieure au système.



■ As-tu compris ?

62. Identifier pour chacune des interactions la force de réaction.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| a. Le pouce tire l'index. | b. Le pied frappe la balle. | c. La Terre attire la Lune. |
|  |  |  |
| d. Les pneus poussent la route vers l'arrière. | e. Les ailes poussent l'air vers le bas. | f. Le poisson propulse l'eau vers l'arrière. |
|  |  |  |
| g. L'homme tire le ressort. | h. Le ballon propulse l'air vers l'arrière. | i. La fusée propulse le gaz de combustion vers l'arrière. |

63. Pour chacune des interactions, identifier les forces de réaction.

- a. La pale d'un hélicoptère pousse l'air vers le bas.
- b. Un aimant attire un clou en acier.
- c. Tu frappes une balle de tennis avec ta raquette.

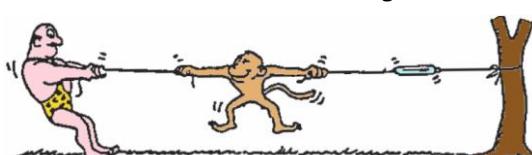
HONESTLY, THE WALL HIT MY HAND AND SPRAINED MY WRIST?



64. Pourquoi une raquette ralentit-elle au moment de frapper la balle ?



65. Lorsqu'une voiture et un camion subissent une collision frontale, lequel des deux véhicules subit la plus grande force ? Lequel est freiné plus brusquement ?

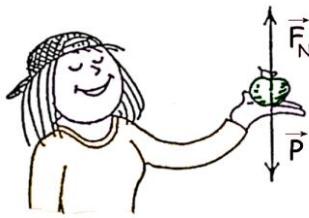


66. Identifier six paires de forces action-réaction sur la figure.



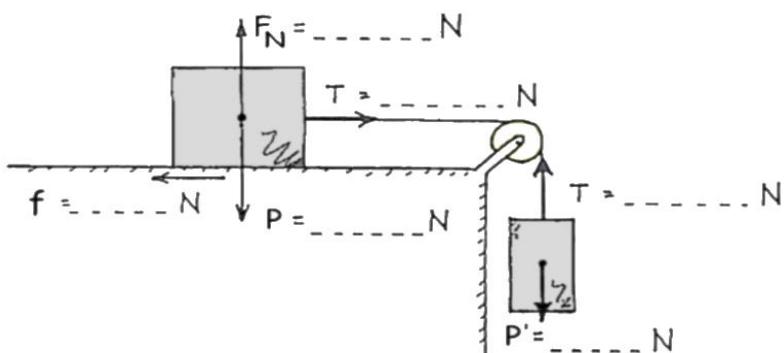
- a. Quelle est la force responsable de cet effet ?
- b. Quel corps exerce cette force ?
- c. Identifier la force de réaction.
- d. Laquelle des deux forces a une norme plus grande ?
- e. Pourquoi l'effet de cette réaction n'est-il pas observable ?

68. Une pomme de poids P reposant dans la main de Nelly. La main de Nelly supporte la pomme avec une force de support \vec{F}_N , qui agit dans le sens opposé de \vec{P} . Puisque la pomme est au repos, la force résultante sur la pomme est nulle. \vec{P} et \vec{F}_N sont donc de même norme : $P = F_N$



- Nous (pouvons) (ne pouvons pas) dire que \vec{P} et \vec{F}_N forment une paire action-réaction. En effet, l'action et la réaction agissent toujours sur (un même corps) (deux corps différents), et dans ce cas, \vec{P} et \vec{F}_N agissent (les deux sur la pomme) (sur deux corps différents).
- Si nous appelons action « la Terre attire la pomme vers le bas », alors la réaction est (la pomme attire la Terre vers le haut) (\vec{F}_N , la force de support que la main de Nelly exerce sur la pomme vers le haut).
- En résumé, nous voyons que \vec{P} et \vec{F}_N sont opposées et de même norme...
 - et forment une paire action-réaction
 - mais ne forment pas une paire action-réaction
- Une autre paire de forces est \vec{F}_N [indiquée sur le dessin] et la force pressante que la pomme exerce sur la main de Nelly [pas indiquée]. Cette paire de forces (est) (n'est pas) une paire action-réaction
- Supposons que Nelly pousse la pomme vers le haut avec une force de 2 N. Comparée à P , F_N est (identique) (le double) (ni identique, ni le double). La pomme (est au repos) (accélère vers le haut).
- Lorsque Nelly descend sa main rapidement de sorte qu'il n'y a plus de contact entre la main et la pomme, F_N est (nulle) (deux fois plus grande P) et la force résultante sur la pomme est (nulle) (égale à P).

69. Un bloc de masse 10 kg se trouve sur une surface horizontale et est relié par un fil à un autre bloc de masse 5 kg (voir figure). Le frottement entre le bloc et la surface est suffisant pour garder le système au repos. Indiquer les normes des forces qui agissent sur le système.



3 Énergie

L'énergie est une notion omniprésente. Bien que tout le monde en ait une idée intuitive, il est difficile de saisir de quoi il s'agit exactement. L'énergie est indispensable à toute sorte de développement. Il faut de l'énergie pour produire du mouvement, de la chaleur, du rayonnement, de l'électricité. Les réactions chimiques sont possibles grâce à l'énergie des réactifs et/ou du milieu réactionnel. La vie a pu se développer sur Terre grâce à l'énergie du rayonnement solaire. Mais comment définir cette « capacité » si importante au fonctionnement de la nature ? Pour répondre à cette question, nous allons d'abord étudier une grandeur liée : le travail.

3.1 Le travail d'une force

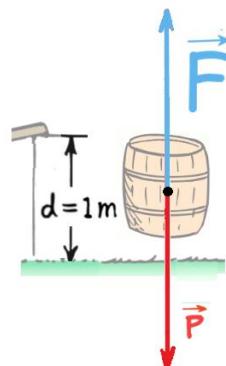
3.1.1 Exemple introductif

Imaginons qu'on veuille soulever un tonneau de masse $m = 60 \text{ kg}$ à une hauteur de $h = 1 \text{ m}$. On peut essayer de le soulever à mains nues, ou utiliser une planche inclinée (p.ex. d'une longueur $l = 5 \text{ m}$) et faire rouler le tonneau par-dessus. Analysons les deux situations en termes de force et de distance parcourue, en supposant que le tonneau soit déplacé à vitesse constante (MRU) et sans frottement⁹.



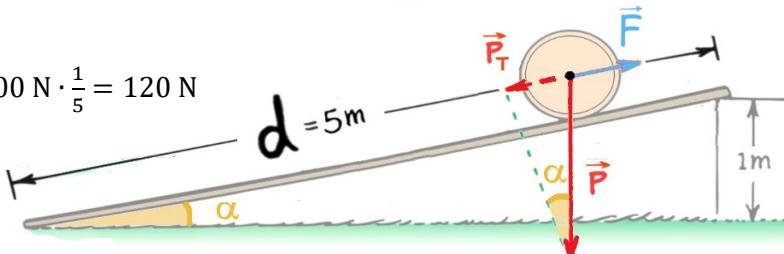
1. Mains nues

- Force : $F = P = mg = 60 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 600 \text{ N}$
- Distance : $d = h = 1 \text{ m}$
- $F \cdot d = 600 \text{ N} \cdot \text{m}$



2. Planche inclinée

- Force : $F = P_T = P \cdot \sin \alpha = 600 \text{ N} \cdot \frac{1}{5} = 120 \text{ N}$
- Distance : $d = l = 5 \text{ m}$
- $F \cdot d = 600 \text{ N} \cdot \text{m}$



Dans le deuxième cas, l'intensité de la force nécessaire est plus faible, mais on doit exercer cette force sur une distance plus longue. Si on avait utilisé une planche de longueur 6 m, l'intensité de la force nécessaire ne serait que de 100 N. Au final, peu importe la longueur de la planche utilisée, on constate que le produit *force* · *distance* reste le même pour un même *travail effectué*, à savoir monter le tonneau à une hauteur de 1 m au-dessus du sol. Autrement dit, ce que l'on gagne en force, on le perd en distance et l'on a :

$$F \cdot d = F \cdot d$$

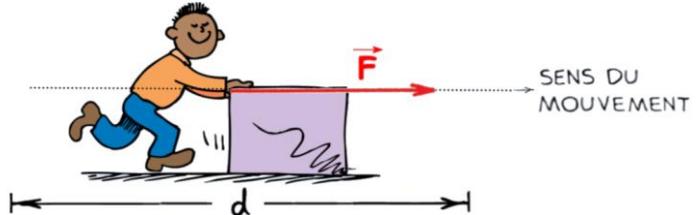
⁹ Au lieu de calculer l'intensité des forces, on peut simplement les mesurer à l'aide d'un dynamomètre approprié.

3.1.2 Définition générale du travail

Dans le cas particulier où une force constante \vec{F} agit dans le sens du mouvement, le travail de cette force est défini par :

travail de la force = force · distance

$$W = F \cdot d$$



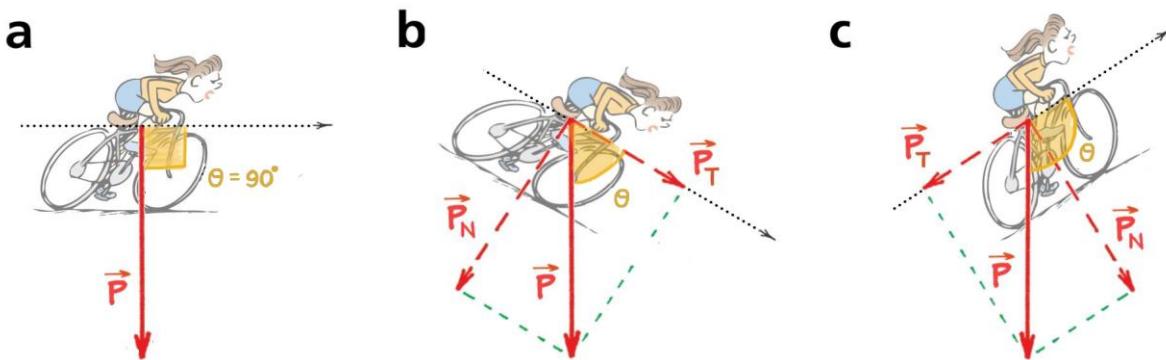
Dans le cas général, où il existe un angle θ entre la force constante \vec{F} et le sens du mouvement, le travail W est défini par :

$$W = F \cdot d \cdot \cos \theta$$

avec F l'intensité de la force et d la distance parcourue par le corps.

Unité SI : le **joule**¹⁰ (J) avec $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$

Pour comprendre l'effet du facteur $\cos \theta$, considérons l'exemple du poids d'une cycliste.



- Sur une route horizontale ($\theta = 90^\circ$), le travail du poids est nul : $W = P \cdot d \cdot \cos 90^\circ = 0$. Dans ce cas, le poids n'a pas d'effet direct sur le mouvement.
- Dans une descente ($\theta < 90^\circ$), la composante tangentielle du poids \vec{P}_T a un effet positif sur le mouvement (effet moteur) tandis que l'effet de la composante normale \vec{P}_N est nul. D'après la définition, le travail du poids est positif et correspond au travail de sa composante tangentielle :

$$W = P \cdot d \cdot \cos \theta = P_T \cdot d > 0$$

- Dans une montée ($\theta > 90^\circ$), la composante tangentielle du poids \vec{P}_T a un effet négatif sur le mouvement (effet résistant). D'après la définition, le travail du poids est négatif et l'on a :

$$W = P \cdot d \cdot \cos \theta = -P_T \cdot d < 0$$

Remarque

Le travail au sens physique n'est pas lié à la sensation de fatigue. En effet, lorsqu'on pousse contre un mur, on ressent vite une fatigue musculaire¹¹, mais aucun travail n'est effectué sur le mur, puisque le mur ne se déplace pas.



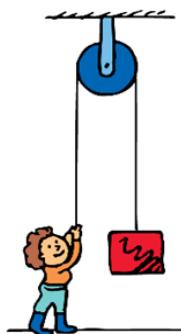
¹⁰ En l'honneur de James Prescott Joule, physicien britannique du 19^e siècle et auteur d'importants travaux sur l'énergie.

¹¹ Nos muscles sont toutefois le siège de processus physiologiques faisant intervenir des forces et des déplacements microscopiques.

■ As-tu compris ?

1. En tirant sur la corde qui passe par une poulie fixe, un ouvrier monte une charge de 60 kg à une hauteur de 4 m.

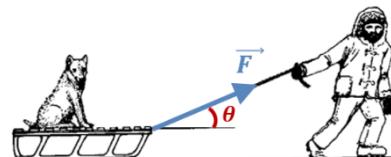
- Calculer le travail de levage effectué par l'ouvrier, sachant que la poulie fixe ne modifie pas l'intensité de la force nécessaire pour soulever la charge.
- Réaliser un diagramme $F(d)$.
- Que représente l'aire sous la courbe du diagramme ?



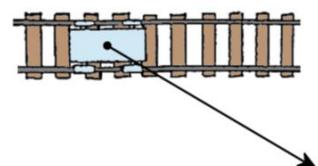
2. Qu'est-ce qui nécessite un travail plus grand : soulever un sac de 50 kg sur une distance verticale de 2 m ou soulever un sac de 25 kg sur une distance verticale de 4 m ? Justifier.

3. Un inuit tire une luge avec une force constante de 200 N sous un angle $\theta = 35^\circ$.

- Calculer l'intensité de la composante tangentielle de la force de l'inuit.
- En déduire le travail effectué par la force de l'inuit pour un trajet de 2 km.

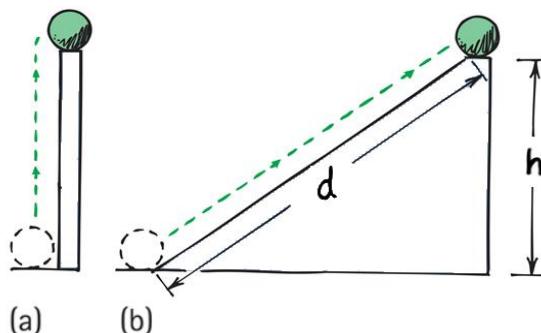


4. On tire un wagon le long des rails comme indiqué sur la figure. L'angle θ entre la force et le sens du mouvement vaut 30° .



Que vaut l'intensité de cette force si elle effectue un travail de 433 kJ pour une distance parcourue de 500 m ?

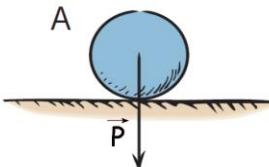
5. Un rocher de masse m est soulevé d'une hauteur h de deux manières différentes (a et b).



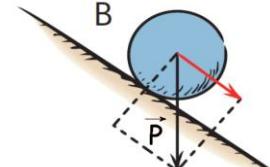
Montrer que dans les deux cas, le travail effectué est le même et établir son expression.

6. Considérons les figures ci-contre.

- Le poids de la boule effectue-t-il un travail lorsque la boule de bowling roule le long d'une piste horizontale (situation A) ? Expliquer.



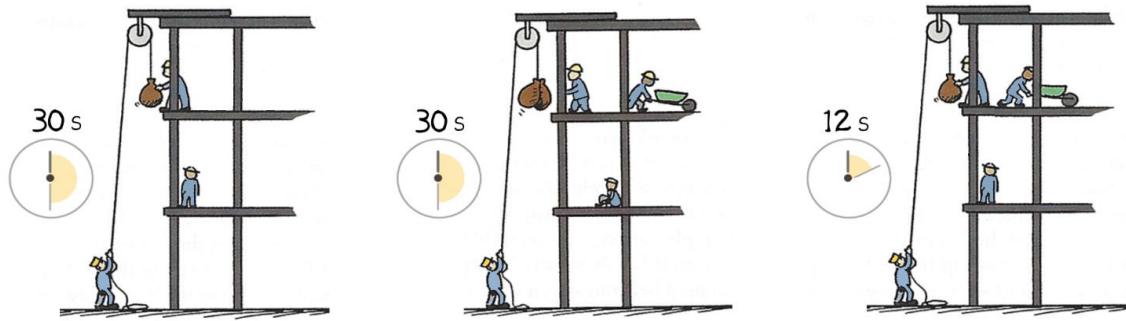
- Le poids de la boule effectue-t-il un travail lorsque la boule descend un plan incliné (situation B) ? Expliquer.



3.2 La puissance mécanique

3.2.1 Exemple introductif

Trois ouvriers effectuent un travail de levage en montant des sacs de sable d'une masse de $m = 25 \text{ kg}$ à une hauteur $h = 6 \text{ m}$. L'ouvrier (1) monte un sac en 30 secondes, l'ouvrier (2) monte deux sacs en 30 s et l'ouvrier (3) monte un sac en 12 s.



Les ouvriers (1) et (3) effectuent le même travail de levage. En effet :

$$W_1 = W_3 = mgh = 25 \cdot 10 \cdot 6 = 1500 \text{ J}$$

L'ouvrier (2) effectue deux fois plus de travail, car il monte une masse double au même étage :

$$W_2 = (2m)gh = 50 \cdot 10 \cdot 6 = 3000 \text{ J}$$

Or, dans le calcul du travail, on ne tient pas compte de la durée nécessaire pour effectuer ce travail. Calculons pour chacun des ouvriers le travail effectué par unité de temps :

| | | |
|---|--|--|
| Ouvrier (1) : | Ouvrier (2) : | Ouvrier (3) : |
| $\frac{W_1}{\Delta t_1} = \frac{1500 \text{ J}}{30 \text{ s}} = 50 \frac{\text{J}}{\text{s}}$ | $\frac{W_2}{\Delta t_2} = \frac{3000 \text{ J}}{30 \text{ s}} = 100 \frac{\text{J}}{\text{s}}$ | $\frac{W_3}{\Delta t_3} = \frac{1500 \text{ J}}{12 \text{ s}} = 125 \frac{\text{J}}{\text{s}}$ |

On constate que l'ouvrier (3) effectue son travail de levage de manière la plus intense. On dit qu'il développe la plus grande *puissance mécanique*.

3.2.2 Définition

La puissance \mathcal{P} est égale au travail effectué par unité de temps, c'est à dire au rapport entre le travail effectué W et le temps écoulé Δt :

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

L'unité SI de la puissance est le **watt**¹² (W) : $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$

Exemple

Les puissances mécaniques développées par les trois ouvriers de l'exemple introductifs valent respectivement $P_1 = 50 \text{ W}$, $P_2 = 100 \text{ W}$ et $P_3 = 125 \text{ W}$.

- L'ouvrier (2) développe une puissance mécanique plus grande que l'ouvrier (1), car il effectue un travail plus grand en une durée identique.
- L'ouvrier (3) développe une puissance mécanique plus grande que l'ouvrier (1), car il effectue le même travail en une durée plus courte.

¹² En l'honneur de James Watt, inventeur et mécanicien du 18^{ème} siècle, qui a développé le moteur à vapeur.

3.2.3 Relation entre puissance et vitesse

Considérons une voiture qui roule à vitesse constante v . La puissance \mathcal{P} de la force motrice \vec{F} peut alors s'écrire :

$$\mathcal{P} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F \cdot d}{\Delta t} = F \cdot \frac{d}{\Delta t} = F \cdot v$$

De manière générale, on peut exprimer la puissance d'une force en fonction de la vitesse :

Puissance d'une force \vec{F} qui s'exerce sur un corps qui se déplace à la vitesse constante v :

$$\mathcal{P} = F \cdot v \cdot \cos \theta$$

avec θ l'angle entre la force et le sens du mouvement.

3.2.4 Le cheval-vapeur

Le cheval-vapeur (Symbole : **ch**) est une unité alternative pour la puissance. Elle fut introduite par James Watt pour comparer la puissance des machines à vapeur à celle des chevaux. Le nom allemand est « Pferdestärke » (Symbole : **PS**).

Conversion :

$$1 \text{ ch} = 1 \text{ PS} = 735 \text{ W} = 0,735 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1/0,735 \text{ ch} = 1,36 \text{ ch}$$



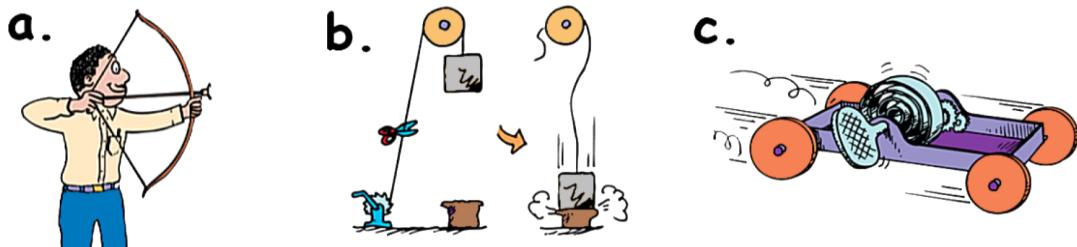
■ As-tu compris ?

7. Deux personnes de même masse montent l'escalier jusqu'au quatrième étage. La première personne met 30 s ; la deuxième nécessite 40 s.
 - a. Quelle personne effectue plus de travail ?
 - b. Quelle personne développe plus de puissance ?
8. À l'arraché (« Reißen »), un haltérophile monte une barre de 180 kg d'une hauteur de 2,2 m en 1,2 s. Quelle puissance développe-t-il ?
9. Une machine à vapeur développe une puissance mécanique de 5 ch.
 - a. Donner sa puissance en unité SI.
 - b. Combien de travail cette machine peut-elle effectuer en une heure ?
10. Laquelle de ces affirmations est correcte ?
 - La puissance développée par une machine dépend de son temps de fonctionnement.
 - Le travail effectué par une machine dépend de son temps de fonctionnement.
11. Une péniche navigue à une vitesse constante de 18 km/h sur la Moselle. Son moteur tourne à plein régime (« volle Fahrt ») et développe une puissance mécanique de 280 kW.
 - a. Indiquer toutes les forces mises en jeu sur un schéma.
 - b. Déterminer l'intensité de la force motrice nécessaire pour maintenir la vitesse.

3.3 L'énergie mécanique

3.3.1 Lien entre les grandeurs travail et énergie

Lorsqu'on effectue un travail sur un corps, ce corps obtient la capacité d'effectuer un travail à son tour.



- a. Lorsqu'un travail est effectué pour tendre un arc, l'arc acquiert la capacité d'effectuer un travail à son tour : il peut accélérer la flèche.
- b. Lorsqu'un travail est effectué pour soulever un bloc en pierre, le bloc acquiert la capacité d'effectuer un travail à son tour : il peut enfoncer un pieux en tombant.
- c. Lorsqu'un travail est effectué pour déformer un ressort, le ressort acquiert la capacité d'effectuer un travail à son tour : il peut faire tourner une montre ou accélérer une voiture-jouet.

En effectuant un travail sur un corps, on lui fournit la capacité d'effectuer un travail à son tour¹³. Lorsqu'on effectue un travail sur un corps, son énergie augmente ; lorsque le corps effectue un travail à son tour, son énergie diminue. Le travail apparaît comme une quantité d'énergie échangée¹⁴. Les grandeurs travail et énergie s'expriment donc à l'aide de la même unité SI : le **joule** (J).

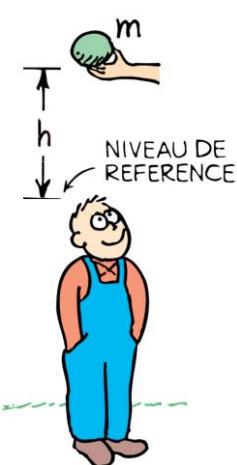
3.3.2 Différentes formes d'énergie mécanique

(1) Le travail de levage et l'énergie potentielle de pesanteur

Soulever un corps signifie effectuer un **travail de levage** (cf. exemple introductif page 49). Le travail de levage effectué sur un corps de masse m lorsqu'on le soulève d'une hauteur h est donné par :

$$W_{\text{lev}} = mgh$$

avec g l'intensité de la pesanteur.



Ce travail de levage est stocké par le corps sous forme d'énergie potentielle de pesanteur. Si l'on admet que l'énergie potentielle de pesanteur initiale du corps est nulle (on définit par là le **niveau de référence**), le corps soulevé possède une énergie potentielle de pesanteur égale au travail de levage effectué.

L'énergie potentielle de pesanteur que possède un corps de masse m et d'altitude h par rapport à un niveau de référence est donnée par :

$$E_{\text{pp}} = mgh$$

$$\text{Unité SI : } \text{kg} \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$$

¹³ Le mot grec « en » signifiant « dans » et le mot « ergon » signifiant « travail », les scientifiques ont désigné la *capacité dans un corps d'effectuer un travail* par le mot **énergie**.

¹⁴ Fortement liées, les grandeurs travail et énergie ne sont toutefois pas identiques. L'énergie décrit l'état dans lequel un corps se trouve alors que le travail est une grandeur d'échange qui décrit l'action d'un corps sur un autre.

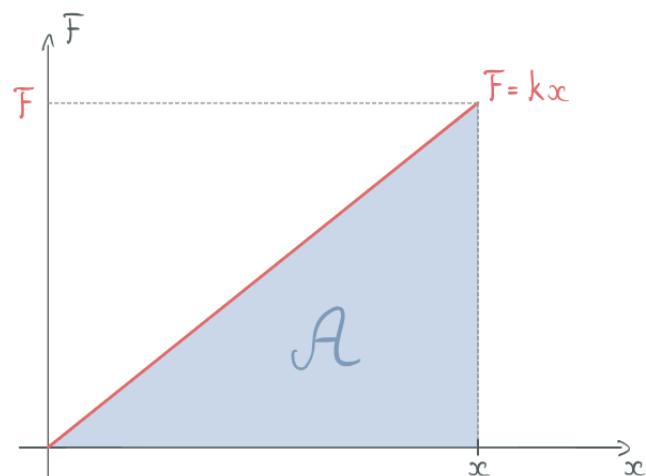
(2) Le travail tenseur et l'énergie potentielle élastique

Déformer (allonger ou comprimer) un ressort signifie effectuer un **travail tenseur**.



Ce travail tenseur n'est pas simplement donné par le produit $F \cdot x$ car la norme F de la force n'est pas constante. En effet, d'après la loi de Hooke, la norme F de la force exercée sur un ressort est proportionnelle à la déformation x du ressort : $F = kx$

Toutefois, on peut trouver le travail tenseur en étudiant la représentation graphique de la force en fonction de l'allongement :



En effet, le travail tenseur effectué pour allonger ou comprimer un ressort de raideur k initialement détendu d'une distance x correspond à l'aire \mathcal{A} de la surface triangulaire sous la droite $F(x)$:

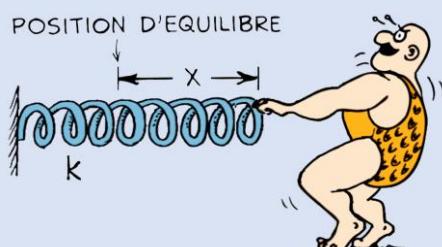
$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} F \cdot x \\ &= \frac{1}{2} kx \cdot x \\ &= \frac{1}{2} kx^2 \end{aligned}$$

L'énergie que possède un corps élastique déformé est appelée *énergie potentielle élastique*. En vertu du lien entre le travail et l'énergie, le travail tenseur est stocké par le ressort sous forme d'énergie potentielle élastique.

L'énergie potentielle élastique que possède un ressort de raideur k allongé ou comprimé d'une distance x est donnée par :

$$E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2$$

Unité SI : $\frac{N}{m} \cdot m^2 = N \cdot m = J$



(3) Le travail accélérateur et l'énergie cinétique

Accélérer un corps signifie effectuer un **travail accélérateur**.

Considérons un corps de masse m initialement au repos, accéléré par une force résultante \vec{F}_{res} . Le corps est accéléré en direction de cette force et l'on a :

$$F_{res} = ma \quad (\text{PFD})$$

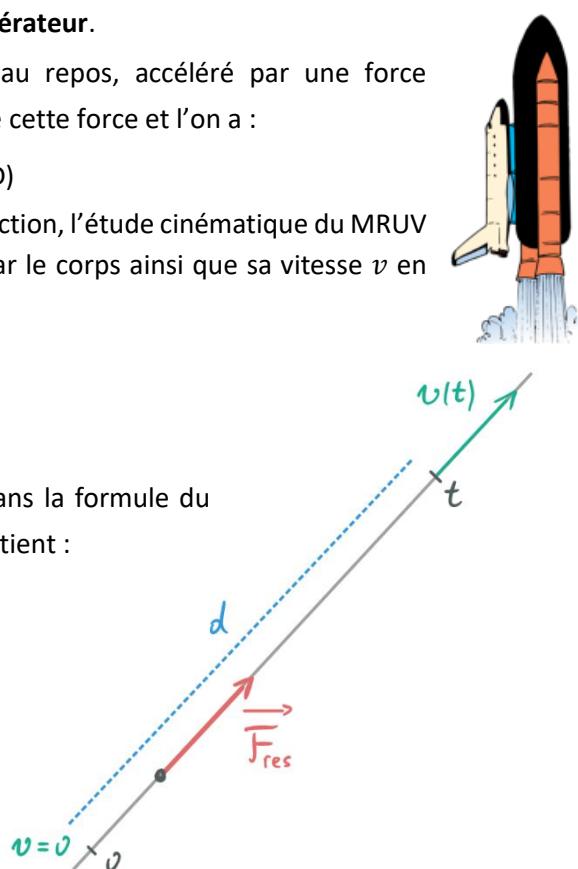
L'accélération a étant constante en norme et en direction, l'étude cinématique du MRUV nous permet d'exprimer la distance parcourue d par le corps ainsi que sa vitesse v en fonction du temps :

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

$$v = at$$

En remplaçant les trois expressions précédentes dans la formule du travail accélérateur effectué par la force \vec{F}_{res} , on obtient :

$$\begin{aligned} W &= F_{res} \cdot d \\ &= ma \cdot \frac{1}{2}at^2 \\ &= \frac{1}{2}m(at)^2 \\ &= \frac{1}{2}mv^2 \end{aligned}$$

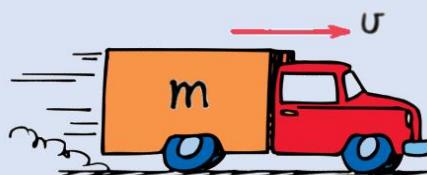


L'énergie que possède un corps en raison de sa vitesse est appelée *énergie cinétique*. En vertu du lien entre le travail et l'énergie, le travail accélérateur est stocké par le corps sous forme d'énergie cinétique.

L'énergie cinétique que possède un corps de masse m en raison de sa vitesse v est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\text{Unité SI : } \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$$



3.3.3 Synthèse

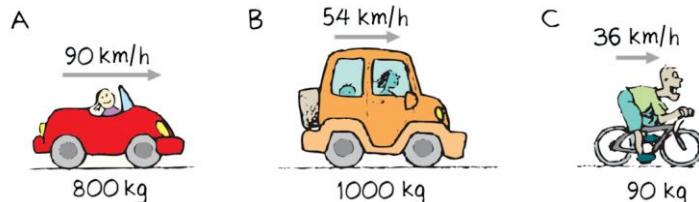
L'énergie mécanique d'un système est la somme de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie potentielle élastique des corps qui forment le système :

$$E_m = E_c + E_{pp} + E_{pe}$$

■ As-tu compris ?

12. Combien d'énergie potentielle de pesanteur une pierre de 1 kg acquiert-elle lorsqu'on la soulève de 4 m ? De 8 m ?
13. Un livre de physique de 500 g est posé sur un bureau. Le bureau a une hauteur de 75 cm et se trouve au premier étage d'une maison.
- Est-il possible de déterminer l'énergie potentielle de pesanteur du livre de façon absolue ? Justifier !
 - On choisit le rez-de-chaussée de la maison comme niveau de référence. Déterminer l'énergie potentielle de pesanteur du livre sachant que l'escalier qui monte au premier étage a une hauteur de 3 m.
14. Lorsqu'on tire avec une force de 10 N sur l'extrémité d'un ressort initialement détendu, on constate que le ressort s'est allongé de 4 cm.
- Que vaut la raideur du ressort ?
 - Quelle énergie (forme et quantité) le ressort possède-t-il lorsqu'il a été allongé ?
 - Quel est le lien entre cette quantité d'énergie et la force avec laquelle le ressort a été allongé ?
15. Une arbalète (« Armbrust ») qui obéit à la loi de Hooke (raideur $k = 1000 \text{ N/m}$) est tendue et possède alors une énergie potentielle élastique de 3,2 J. Que vaut l'intensité de la force avec laquelle l'arbalète a été tendue ?

16. Calculer l'énergie cinétique des corps suivants :



17. Calculer l'énergie cinétique d'une voiture de 1,5 t qui se déplace à 36 km/h. En déduire l' E_C de la même voiture lorsqu'elle se déplace deux fois plus vite. Commentaire ?

18. Est-ce que l'énergie cinétique d'un corps dépend de la direction dans laquelle il se déplace ? Justifier.

19. Compléter :

$$v = 30 \text{ km/h}$$

$$E_C = 10^6 \text{ J}$$

$$v = 60 \text{ km/h}$$

$$E_C = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$v = 90 \text{ km/h}$$

$$E_C = \underline{\hspace{2cm}}$$



20. Un camion de 20 t qui roule à 36 km/h possède de l'énergie cinétique. Que vaut la vitesse d'une voiture de sport de 1,2 t lorsqu'elle a la même énergie cinétique ?

21. Un camion vide roule en ville et possède une énergie cinétique de 500 kJ. Que vaut son énergie cinétique lorsqu'il est plein et qu'il roule sur l'autoroute (masse et vitesse doublées) ?

22. Est-ce que l'énergie cinétique d'une voiture de masse 1000 kg varie davantage lorsqu'elle accélère de 10 m/s à 20 m/s ou lorsqu'elle accélère de 20 m/s à 30 m/s ? Justifier.

3.4 Formes d'énergie non-mécaniques

L'énergie n'intervient pas seulement en mécanique. En fonction du domaine d'étude, les scientifiques distinguent parmi les formes d'énergie non-mécaniques suivantes :

- L'énergie thermique est l'énergie associée à l'agitation désordonnée des corpuscules (atomes, molécules, ...) dont un système est formé. Un corps chaud possède plus d'énergie thermique qu'un corps froid.
- L'énergie électrique est l'énergie associée aux charges électriques. Elle est transportée par le courant électrique et responsable de l'essor technologique.
- L'énergie chimique est l'énergie associée aux liaisons chimiques. Elle se manifeste lors des réactions chimiques. Dans le corps humain, la réaction entre le glucose et le dioxygène libère l'énergie chimique nécessaire au fonctionnement des muscles.
- L'énergie radiative est l'énergie associée au rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement peut être visible (lumière) ou invisible (rayons infrarouges et ultraviolets). L'énergie radiative émise par le Soleil est à l'origine de la vie sur Terre.
- L'énergie nucléaire est l'énergie associée aux noyaux atomiques. Elle se manifeste lorsque des noyaux atomiques se transforment (radioactivité, fission nucléaire, fusion nucléaire).

3.5 Conservation de l'énergie

L'énergie présente une propriété remarquable : elle se conserve ! En effet, *toutes* les observations de *tous* les phénomènes naturels – aussi simple qu'un pendule oscillant ou aussi complexe qu'une étoile qui explose – montrent que l'énergie peut passer d'un système à un autre et/ou d'une forme à une autre, mais qu'elle ne peut ni être créée, ni être détruite.

En raison de sa validité universelle et de sa simplicité, beaucoup de physiciens considèrent que ce **principe de conservation de l'énergie** est la loi physique la plus fondamentale de toutes.

Lors de transferts et de transformations d'énergie, rien ne se crée, rien ne se perd. L'énergie totale d'un système isolé reste constante.

Le fait que l'énergie se conserve en fait une grandeur très pratique en sciences naturelles. En effet, étudier un phénomène naturel revient souvent à se demander : D'où vient l'énergie ? Vers quel(s) corps et à quel taux est-elle transférée ? Quelle(s) transformation(s) subit-elle ?

Exemple

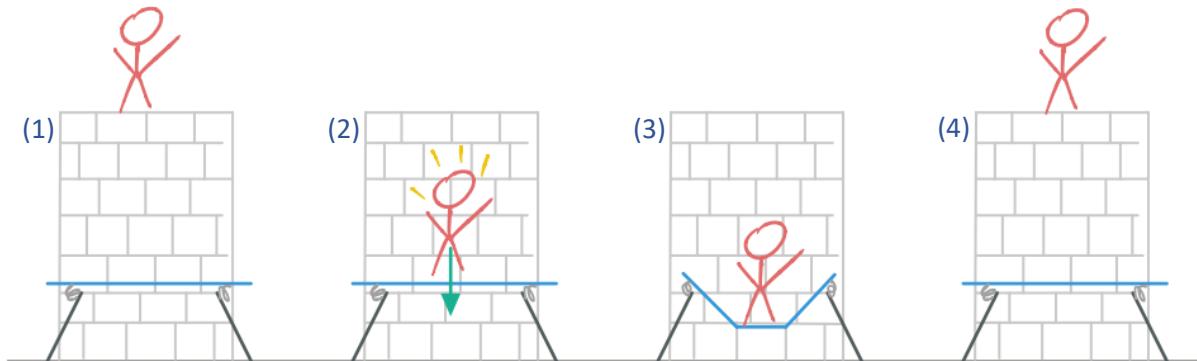
Lorsqu'un cycliste freine sur une route horizontale, il perd de l'énergie cinétique. Mais cette énergie n'a pas disparu : le système de freinage, la route et finalement l'air ambiant ont été (légèrement) réchauffés. À l'aide d'une caméra infrarouge, on peut s'apercevoir que le revêtement de la route ainsi que le pneu se sont légèrement réchauffés lors du freinage (température localement plus élevée).

En termes d'énergie, rien ne se crée et rien ne se perd : toute l'énergie cinétique du cycliste a été transformée en énergie thermique par le travail des forces de frottement.

3.6 Conservation de l'énergie mécanique

3.6.1 Exemple introductif

Considérons un athlète qui saute d'un mur sur un trampoline. Après le rebond, l'athlète revient à son point de départ.



Analysons les transformations d'énergie que subit le système formé par l'athlète et le trampoline :

- (1) énergie potentielle de pesanteur en raison de la position surélevée de l'athlète
- (2) énergie cinétique en raison de la vitesse de l'athlète
- (3) énergie potentielle élastique en raison de la déformation élastique du trampoline
- (4) énergie potentielle de pesanteur en raison de la position de l'athlète

Comme le système retrouve sa configuration de départ, on en déduit que son énergie finale (4) est égale à son énergie initiale (1). Aucune énergie mécanique n'a été perdue en cours de route.

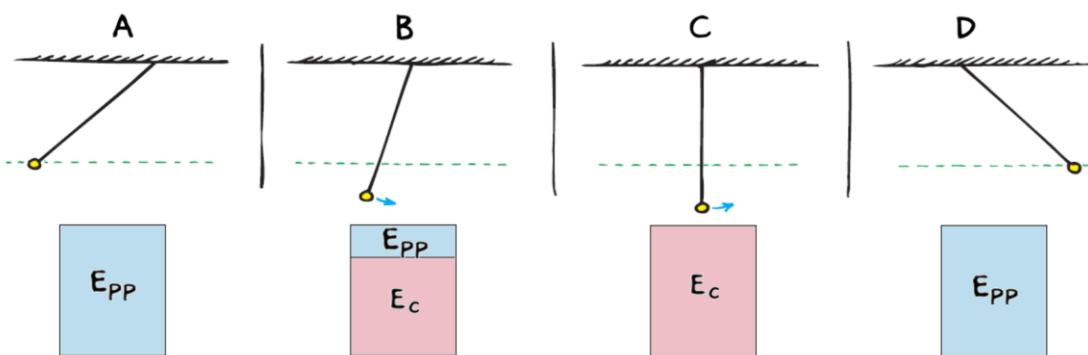
3.6.2 Condition de la conservation de l'énergie mécanique

Il existe des situations pour lesquelles le frottement (résistance de l'air, résistance au roulement, au glissement etc.) est négligeable. Dans ces conditions, on peut énoncer le **résultat pratique** suivant :

En l'absence de frottement, l'énergie mécanique d'un système isolé reste constante.

Exemple

Un pendule simple effectue des oscillations. En l'absence de frottements, son énergie potentielle de pesanteur est intégralement transformée en énergie cinétique et vice-versa. Dans ces conditions idéalisées, le mouvement du pendule se poursuit à l'infini (perpetuum mobile).



Or, en réalité, aucun pendule ne revient *exactement* à sa hauteur de départ, en raison des faibles forces de frottement (résistance de l'air, frottement au point de suspension) dont le travail transforme petit à petit son énergie mécanique en énergie thermique. Au bout d'un certain temps, le mouvement s'arrête : toute l'énergie mécanique du pendule a été dissipée sous forme d'énergie thermique.

3.6.3 Puissance d'un transfert ou d'une transformation énergétique

Comme le travail est un mode de transfert/transformation d'énergie, la puissance nous renseigne sur l'intensité avec laquelle ce transfert ou cette transformation a lieu.

Exemple : La puissance des forces de frottement décrit l'intensité avec laquelle de l'énergie mécanique est transformée en énergie thermique. Pour le pendule réel, cette puissance est très faible mais non-nulle.

- La puissance exprime l'intensité avec laquelle un travail est effectué.
- La puissance exprime l'intensité avec laquelle de l'énergie est échangée.

3.6.4 Rendement d'un transfert ou d'une transformation énergétique

Exemple : Un ventilateur électrique permet de produire un courant d'air. D'abord, l'énergie électrique apporté par le courant électrique est transformée en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'hélice), puis, cette énergie mécanique est transférée de l'hélice aux corpuscules d'air. Or, ni la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, ni le transfert de l'énergie mécanique entre l'hélice et l'air n'est efficace à 100%. En effet, il y a des « pertes » inévitables qui sont dues au travail des forces de frottement.

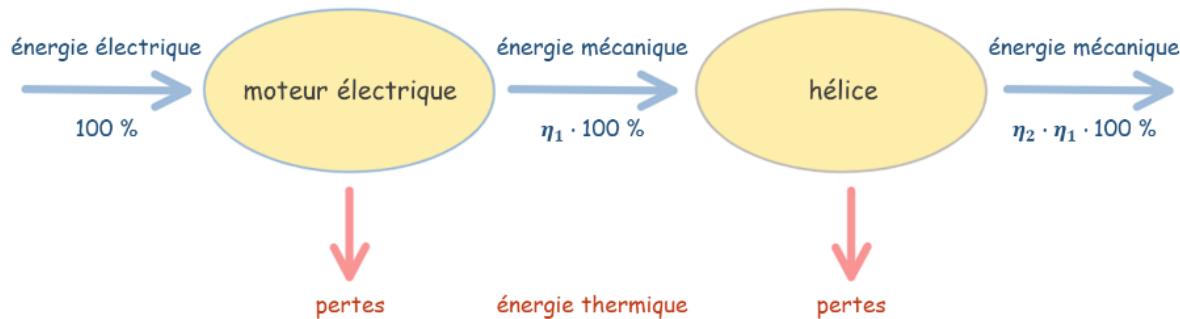
Pour quantifier l'efficacité d'un transfert ou d'une transformation énergétique, on utilise la notion de **rendement**.

Le rendement η d'un transfert ou d'une transformation énergétique est égal au rapport entre l'énergie utile restituée et l'énergie reçue :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{reçue}}}$$

Le rendement est un nombre sans dimension : $0 \leq \eta < 1$. Il est généralement exprimé en pourcent.

Il est pratique d'illustrer les flux d'énergie à l'aide d'un diagramme :



Comme la puissance représente la quantité d'énergie reçue / restituée / perdue par unité de temps, on peut également définir le rendement à l'aide des puissances :

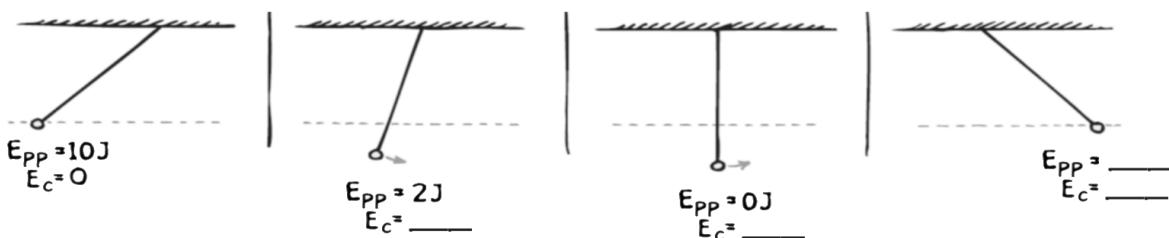
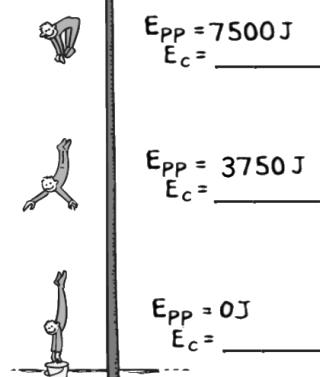
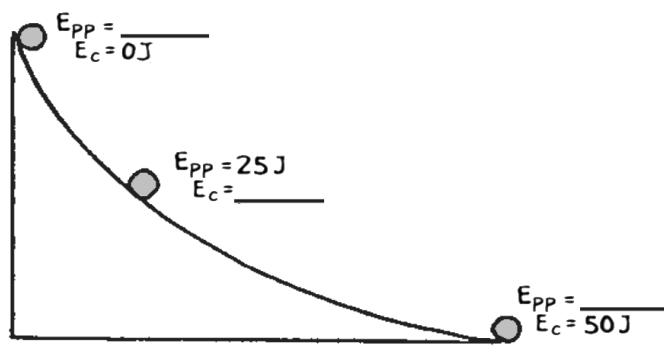
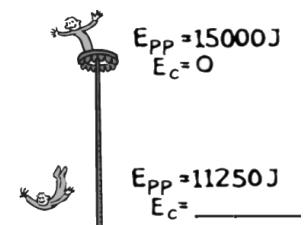
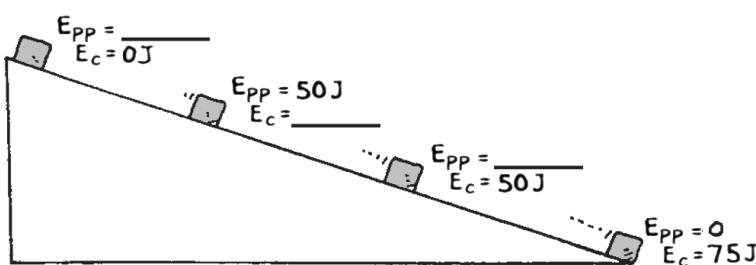
$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}}$$

Pour un ventilateur électrique, les valeurs typiques sont $\eta_1 = 0,85$ et $\eta_2 = 0,60$. Au total, environ la moitié de la puissance électrique reçue est restituée sous forme de puissance mécanique utile du courant d'air :

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,5 = 50\%$$

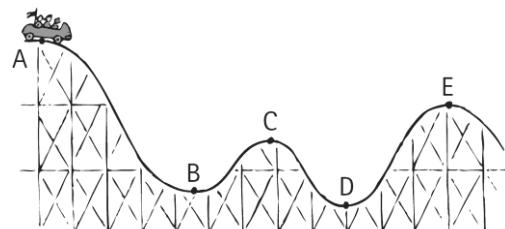
■ As-tu compris ?

23. Compléter les valeurs manquantes. On néglige tout frottement.



24. Un wagon sur une montagne russe démarre du repos au point A et se déplace ensuite sans frottement. Ranger par ordre décroissant les grandeurs suivantes en chaque point :

- E_{PP}
- E_c
- Vitesse



25. Une balle est lancée verticalement vers le haut. En quel point de sa trajectoire a-t-elle...

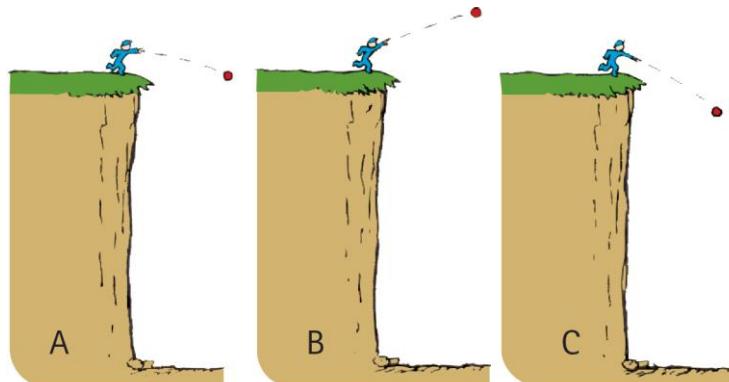
- une énergie cinétique maximale ?
- une énergie potentielle de pesanteur maximale ?
- Que peut-on conclure, si l'expérience est réalisée sur la Lune où il n'y a pas d'atmosphère ?

26. A la piscine découverte, une fille saute du plongeoir de 3 m. Calculer sa vitesse lors de l'impact dans l'eau ? Vérifier le résultat à l'aide des équations horaires de la chute libre.

27. Les rampes ont une hauteur de 50 cm et le bloc glisse sans frottement. Comparer la vitesse du bloc au bas de la rampe dans les deux cas. Peut-on calculer ces vitesses numériquement ?



28. Trois balles sont lancées d'une falaise avec une vitesse initiale de même norme, mais dans des directions différentes, tel qu'illustré sur la figure. On néglige la résistance de l'air.



Ranger par ordre décroissant et en justifiant...

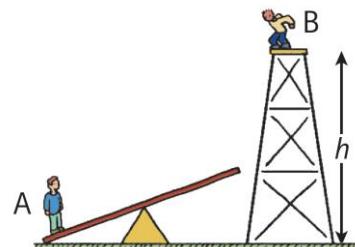
- les énergies potentielles de pesanteur initiales par rapport au bas de la falaise.
- les énergies cinétiques initiales.
- les énergies cinétiques lors de l'impact au sol.
- les vitesses d'impact.
- les temps de vol.

29. Reprendre l'exercice précédent et calculer les vitesses à l'impact pour une falaise haute de 20 m et une vitesse initiale égale à 8 m/s.

30. Pour illustrer le principe de conservation de l'énergie mécanique, le professeur lâche la boule (15 kg) d'un pendule dans la position illustrée. Que se passerait-il si, par mégarde, il donnait une vitesse initiale à la boule. Expliquer.



31. L'acrobate A de masse m se dresse à l'extrémité gauche d'une bascule. L'acrobate B de masse M saute d'une hauteur h sur l'extrémité droite de la bascule, propulsant ainsi A verticalement vers le haut. Si la masse de A est de 40 kg, la masse de B est de 70 kg, et la hauteur du saut initial est de 4 m, calculer la hauteur maximale atteinte par A.



32. Un jouet contient un ressort de raideur 120 N/m. En comprimant le ressort, il permet de lancer une boule en caoutchouc de 15 g à une hauteur de 1,2 m. On néglige le frottement.

Que vaut l'intensité de la force qui a comprimé le ressort ?

33. La figure ci-contre montre un sauteur de bungee (un peu fou) qui s'élance sans vitesse initiale d'une falaise en A. L'élastique commence à s'allonger en C jusqu'à l'instant où l'élastique est allongé au maximum en D. Décrire schématiquement les transformations d'énergie qui ont lieu. Fixer le niveau de référence en ce point et ignorer le frottement.

34. Pourquoi une balle magique n'atteint-elle pas la même hauteur après le rebond ? Répondre en explicitant les transformations d'énergie.

35. En descendant un toboggan sur une aire de jeux, l'énergie potentielle de pesanteur d'un enfant diminue de 1000 J alors que son énergie cinétique augmente de 900 J. Quelle autre forme d'énergie est impliquée et en quelle quantité ?

36. Un arc qui obéit à la loi de Hooke a une raideur de 240 N/m. Pour lancer une flèche verticalement vers le haut, on tire sur la corde avec une force de 96 N, puis on lâche la corde.

- a. Quelle hauteur maximale la flèche atteindra-t-elle si l'on néglige les forces de frottement ?
- b. Que vaut la hauteur réelle, si l'on suppose qu'un quart de l'énergie mécanique est dissipée par la résistance de l'air.
- c. Sous quelle forme retrouve-t-on l'énergie mécanique perdue ?

37. Paul a une masse de 60 kg et tient dans chaque main un haltère (« Hantel ») de 15 kg. Il saute d'une hauteur de 2 m sur un trampoline. Au point le plus bas de sa trajectoire, quand la toile du trampoline est tendue au maximum, il jette les deux haltères par terre. En déduire la hauteur maximale qu'il va atteindre lors du rebond si l'on néglige tout frottement.

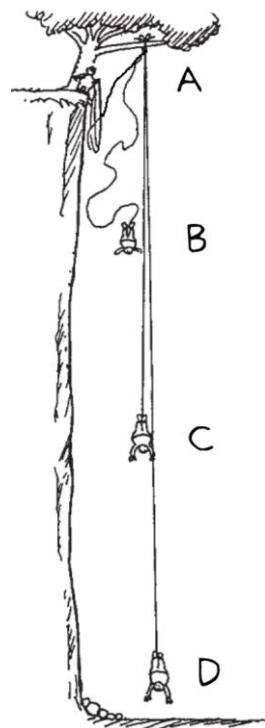
38. Les pompiers utilisent une pompe électrique de 2000 W pour vider une cave inondée de 16 m² de surface où l'eau est montée à 90 cm. La pompe évacue l'eau vers la rue qui se trouve à une hauteur de 2,2 m au-dessus du niveau de la cave.

- a. Quelle est la puissance mécanique restituée par la pompe, sachant que son rendement est de 80%.
- b. Combien de temps la pompe met-elle pour vider la cave ?

39. La centrale hydroélectrique de Rosport se trouve près du barrage situé sur la boucle de la Sûre à Rosport. La centrale comporte deux turbines entraînées par la chute de 300 m³ d'eau par seconde sur une distance verticale de 3 m. Calculer la puissance électrique restituée par l'installation, si l'on admet un rendement de 70%.

40. Lorsqu'il fonctionne en air froid, un sèche-cheveux convertit l'énergie du courant électrique en énergie de rotation de l'hélice avec un rendement de 80%. Ensuite, l'hélice transmet cette énergie mécanique aux corpuscules d'air avec un rendement de 70%.

- a. Etablir un diagramme représentant les flux énergétiques.
- b. Que vaut la puissance mécanique du courant d'air produit par le sèche-cheveux ?



41. La centrale hydroélectrique de Vianden convertit l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique. La différence d'altitude entre le bassin supérieur en haut du « Niklosbierg » et les turbines s'élève à 283 m. La puissance électrique totale de l'installation est de 1,296 GW en plein régime¹⁵. En supposant un rendement de 75% (valeur typique pour ce genre d'installation), déterminer la masse d'eau qui alimente les turbines par minute lorsque la centrale fonctionne en plein régime.

42. Exercice de synthèse (facultatif)

Dans cet exercice, on suppose que l'intensité de la pesanteur vaut 10 N/kg et on néglige la résistance de l'air.

- a.** Une corde élastique de masse négligeable satisfait à la loi de Hooke et a une longueur non tendue de 10 m. Lorsqu'Alice, dont la masse est de 50 kg, est suspendue en équilibre à son extrémité inférieure, la corde a une longueur de 26 m. Calculer la raideur k de la corde, ainsi que l'énergie potentielle élastique stockée dans la corde.

Alice utilise maintenant la même corde élastique pour faire un saut à bungee : une extrémité de la corde est attachée à Alice, et l'autre extrémité à un pont au-dessus d'une vallée très profonde. Alice saute du pont, partant du repos, et se déplace verticalement vers le bas.

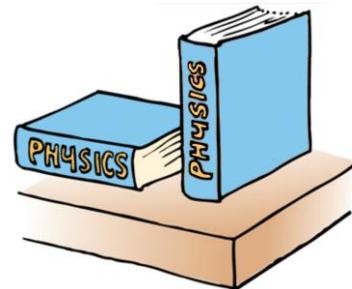
- b.** Décrire en quelques phrases l'accélération d'Alice jusqu'à ce qu'elle atteigne le point le plus bas de son saut.
- c.** Calculer la vitesse d'Alice lorsqu'elle est tombée à une distance verticale de 15 m du pont.
- d.** Calculer la distance sous le pont où Alice est instantanément au repos.
- e.** Calculer la vitesse maximale d'Alice pendant son saut et quelle est sa position correspondante.
- f.** Quelle est la norme et la direction de l'accélération maximale qu'Alice éprouve pendant son saut, et quelle est sa position correspondante ?
- g.** Esquisser un graphique de l'accélération verticale d'Alice en fonction de la distance de chute jusqu'au point le plus bas. Utiliser le sens vers le bas comme positif.

¹⁵Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_de_Vianden

4 Mécanique des fluides

4.1 Définition de la pression

Les deux livres sont de poids égal et exercent donc la même **force pressante** sur la surface (chacun enregistrerait la même valeur sur une balance). Cependant, dans le cas du livre couché horizontalement, cette force s'applique sur une surface beaucoup plus grande. Ce livre exerce une **pression** plus petite sur la surface que le livre posé verticalement.



La **pression** exprime la force par unité de surface :

$$\text{pression} = \frac{\text{force pressante}}{\text{aire de la surface de contact}}$$

$$p = \frac{F}{A}$$



Unité SI : N/m² = pascal = Pa

Autres unités courantes :

$$1 \text{ hPa (hectopascal)} = 100 \text{ Pa}$$

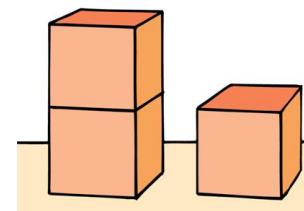
$$1 \text{ bar} = 100000 \text{ Pa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa}$$

Pour une force donnée, la pression et l'aire de la surface sont **inversement proportionnelles**. Si l'aire de la surface pressée augmente deux fois, alors la pression sur cette surface diminue de la moitié.

■ As-tu compris ?

1. Pourquoi un camion lourd a-t-il plus que quatre roues ?
2. Comparée à la pression exercée par les deux blocs superposés sur la table, la pression exercée par le bloc individuel est...
 - A. deux fois plus grande
 - B. identique
 - C. deux fois plus petite
3. Si tu te tiens debout sur une jambe au lieu des deux,
 - a. la force que tu exerces sur le sol est
 - A. la moitié
 - B. identique
 - C. le double
 - b. la pression que tu exerces sur le sol est
 - A. la moitié
 - B. identique
 - C. le double
4. En voulant tester l'expérience de se coucher sur un lit de clous, est-il plus prudent de commencer avec un seul clou et d'augmenter peu à peu le nombre de clous ? Justifier.



4.2 La pression hydrostatique

Lorsqu'on plonge sous l'eau, on sent une pression dans les oreilles. Cette pression est due au poids de l'eau qui se trouve au-dessus. Au fur et à mesure que la profondeur augmente, la pression contre les tympans devient plus grande.

Dans un liquide règne une pression, appelée **pression hydrostatique**, qui est due au poids du liquide. La pression hydrostatique est proportionnelle à :

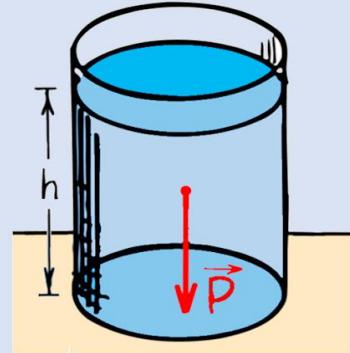
- la masse volumique ρ du liquide ;
- la profondeur h du liquide ;
- l'intensité de la pesanteur g du lieu.

Mathématiquement :

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

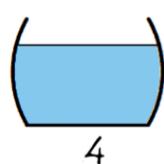
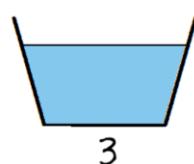
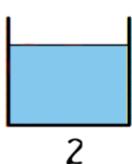
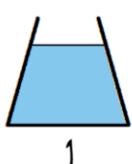
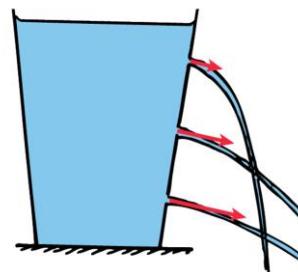
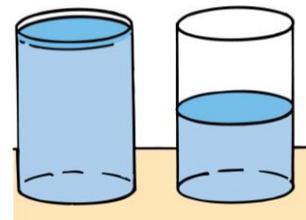
Unités SI :

$$\text{Pa} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \text{m} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$



Conclusions

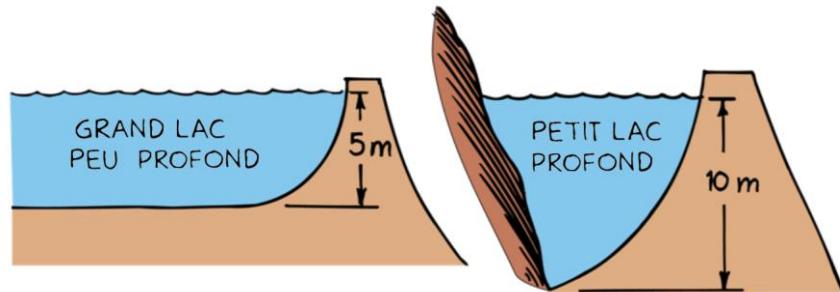
- Lorsque la profondeur du liquide double, la pression hydrostatique du liquide double également. La pression hydrostatique au fond du récipient plein est donc deux fois plus grande que celle au fond du récipient rempli à moitié.
- À une profondeur donnée, un liquide de masse volumique plus élevée exerce une pression plus grande. Par exemple, le mercure a une masse volumique 13,6 fois plus grande que l'eau. La pression hydrostatique exercée par le mercure est donc 13,6 fois plus grande que celle exercée par l'eau¹⁶.
- À une profondeur donnée, un liquide exerce la même pression dans toutes les directions, que ce soit sur le fond ou les côtés du récipient ou encore la surface d'un objet immergé dans le liquide. Les **forces pressantes** exercées par le liquide sur une surface agissent en chaque point **perpendiculairement à la surface**.
- La pression hydrostatique ne dépend pas de la quantité de liquide, mais uniquement de sa profondeur. Cette propriété est connue sous le nom de **paradoxe hydrostatique**. La pression hydrostatique au fond de chacun des quatre récipients illustrés ci-dessous est identique.



¹⁶Un liquide est pratiquement incompressible, donc sa masse volumique est la même à chaque profondeur (hormis quelques petites variations dues à la température).

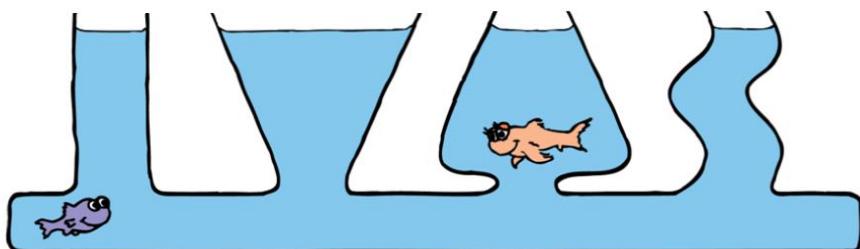
Exemple

La pression hydrostatique est deux fois plus élevée au fond du petit lac profond qu'au fond du grand lac peu profond. Le barrage retenant l'eau du lac profond doit résister à une pression moyenne plus élevée et doit donc être plus solide.

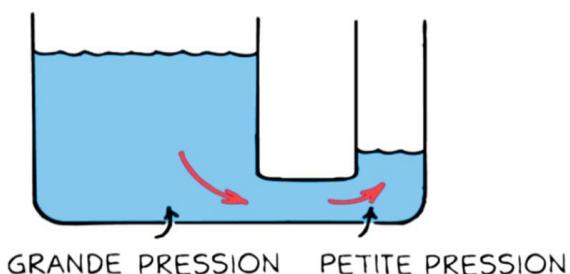


Application

Des **vases communicants** sont des récipients de formes quelconques, ouverts à l'air libre et reliés entre eux. Le niveau de l'eau est identique dans tous les vases.



En effet, le liquide dans le tube de connexion ne reste en équilibre que si la pression à ses deux extrémités est identique, ce qui est le cas lorsque la hauteur du liquide est la même dans les deux vases.

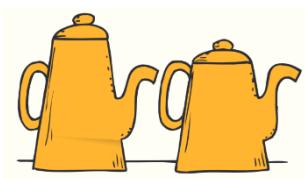
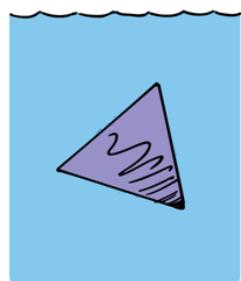
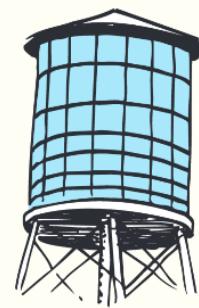


En remplissant un tuyau flexible avec de l'eau et en tenant les deux extrémités à la même hauteur, les niveaux d'eau sont égaux. Si l'une des extrémités est surélevée par rapport à l'autre, l'eau s'écoule de l'extrémité inférieure, même si elle doit couler une partie du chemin « en montée ». Ce fait est utile pour vider un aquarium ou un réservoir de carburant. À l'époque romaine, on a fait construire des aqueducs inutilement élaborés pour s'assurer que l'eau coule légèrement vers le bas à chaque endroit le long de son parcours entre le réservoir et la ville.



■ As-tu compris ?

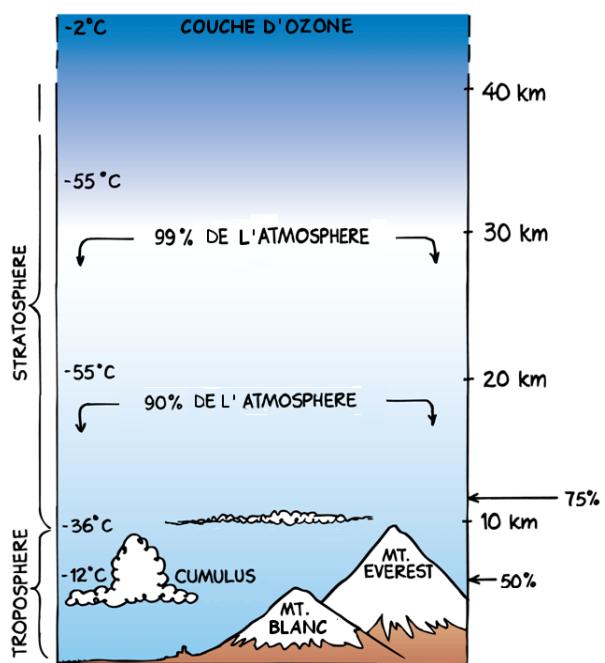
5. La pression de l'eau au fond d'un lac dépend...
- de l'aire de la surface du lac
 - de la profondeur du lac
6. Un réservoir d'eau est renforcé par des cerceaux métalliques.
- Pourquoi le réservoir est-il élevé ?
 - Pourquoi la distance entre les cerceaux est-elle plus petite au fond qu'en haut du réservoir ?
7. Calculer les pressions hydrostatiques :
- au fond d'un récipient rempli d'eau d'une hauteur 20 cm.
 - au fond d'un récipient rempli de mercure d'une hauteur 5 cm.
8. Comment évoluent la masse, le volume et la masse volumique d'une bulle d'air expirée par un plongeur dans l'eau lorsqu'elle remonte à la surface ?
9. Calculer la pression de l'eau au fond d'un château d'eau qui mesure 30 m de hauteur et qui est entièrement rempli d'eau.
10. Représenter la force pressante exercée par l'eau sur chacune des surfaces latérales du corps submergé.
11. Calculer la pression à 4 m de profondeur dans l'eau et en déduire l'intensité de la force qui s'y exerce sur ton tympan (« Trommelfell ») de surface $0,5 \text{ cm}^2$.
12. En 1960, le sous-marin *Trieste* est descendu jusqu'à une profondeur de 11 km dans le fossé des Mariannes. Le sous-marin n'avait qu'une petite lucarne circulaire de 15 cm de diamètre. Expliquer en utilisant les termes *pression hydrostatique* et *force pressante*.
13. Comparer la pression de l'eau à une profondeur de 1 m en dessous de la surface d'un lac à la pression de l'eau à une profondeur de 1 m en dessous d'une piscine.
14. Quelle théière peut contenir plus de liquide ? Justifier.
15. Expliquer schématiquement le principe de fonctionnement d'une écluse (« Schleuse »).



4.3 La pression atmosphérique

4.3.1 L'atmosphère terrestre

Nous vivons au fond d'un océan d'air, appelé atmosphère, qui est constitué de molécules. Grâce à l'énergie solaire, ces molécules se déplacent à des vitesses au-delà des 1000 km/h, se frayant un chemin jusqu'à des altitudes de plusieurs kilomètres. Sans l'énergie solaire, l'atmosphère refroidirait et les molécules d'air se déplaceraient de moins en moins vite pour finir en fine couche liquide ou solide sur la surface terrestre.¹⁷ En revanche, sans l'attraction gravitationnelle de la Terre, les molécules d'air s'évaderaient peu à peu dans l'espace. L'atmosphère de la Terre existe donc grâce à un équilibre entre la tendance des molécules d'air énergétiques à s'évader et la gravitation terrestre qui les retient.



Contrairement à un océan d'eau, l'atmosphère n'a pas de surface limite définie et sa masse volumique n'est pas constante. En effet, les molécules d'air sont plus rapprochées au niveau de la mer qu'en haute montagne. L'air devient donc de moins en moins dense avec l'altitude. 99% de l'atmosphère se trouve en dessous d'une altitude de 30 km. Même l'espace intersidéral ne constitue pas un vide parfait. En effet, la densité de gaz y vaut environ une molécule par cm³. Il s'agit principalement d'hydrogène, l'élément le plus abondant de l'univers.

La température de l'atmosphère diminue d'abord avec l'altitude. Elle augmente ensuite à des altitudes très hautes, pour finalement diminuer de nouveau. La température dans le vide intersidéral vaut environ -270°C.

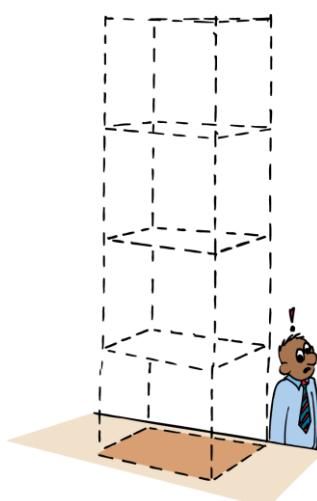
4.3.2 La pression atmosphérique normale

L'atmosphère, comme l'eau, exerce une pression appelée pression atmosphérique. Imaginons une colonne d'air d'une surface de section de 1 m² qui s'étend à travers toute l'atmosphère. Cette colonne contient une masse d'air d'environ 10 tonnes, ce qui correspond à un poids de

$$P = mg = 10000 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 10^5 \text{ N}$$

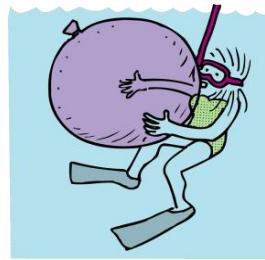
La pression atmosphérique au fond de la colonne d'air vaut donc :

$$p = \frac{P}{A} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^5 \text{ Pa} = 1000 \text{ hPa}$$



¹⁷ Comme des grains de pop-corn qui reposent au fond d'une casserole. Si de la chaleur est fournie aux grains, ils atteignent des vitesses de quelques kilomètres par heure et peuvent sauter à des hauteurs allant jusqu'à deux mètres (ne jamais oublier le couvercle !)

On est tellement habitué à la pression de l'air qui nous entoure qu'on ne s'en rend pas compte. On ne ressent pas le poids de l'air pour la même raison qu'on ne ressent pas le poids d'un ballon rempli d'eau lorsqu'on le tient sous l'eau. La pression de l'air dans nos poumons et nos vaisseaux sanguins est identique à celle de l'air ambiant.

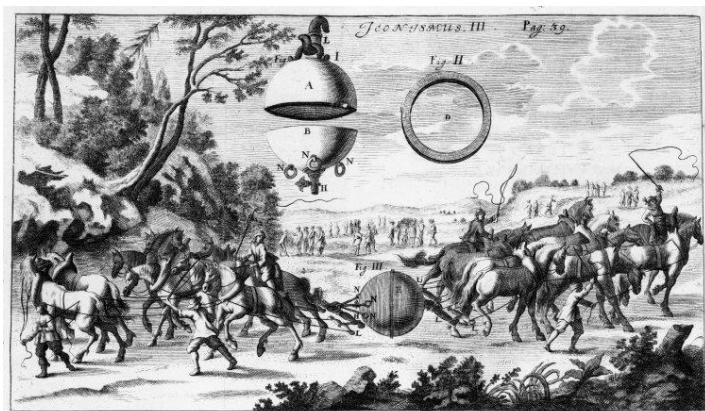


La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer vaut 1013,25 hPa. On l'appelle **pression atmosphérique normale (1 atm)**. Des courants d'air et des vents provoquent des variations de la pression atmosphérique.

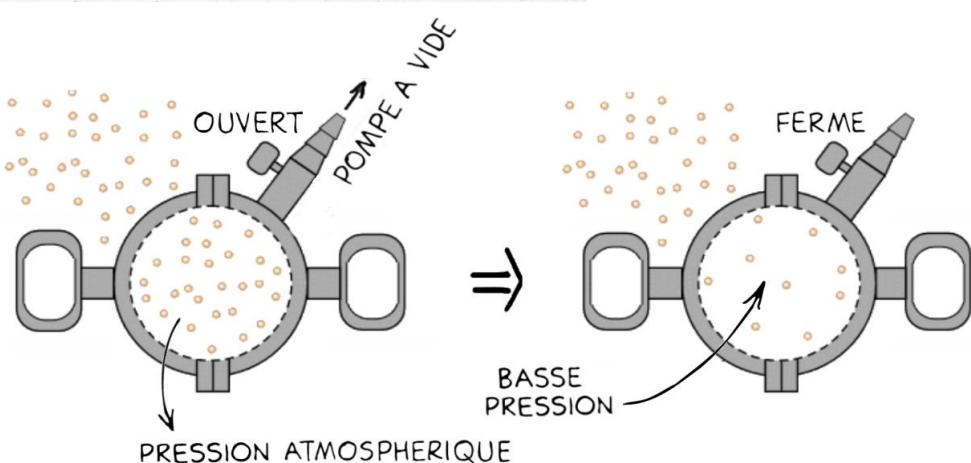
La pression atmosphérique diminue avec l'altitude, parce que de moins en moins de molécules d'air se trouvent au-dessus.

4.3.3 Mise en évidence expérimentale

Otto von Guericke (1602-1686) et les hémisphères de Magdebourg :



« Après avoir intercalé l'anneau entre les deux demi-sphères, j'aspirais l'air rapidement. Je pouvais voir avec quelle force les hémisphères se pressaient contre l'anneau. Sous l'action de la pression atmosphérique, ils collaient l'un contre l'autre avec une véhémence que 16 chevaux parvenaient à peine à les séparer. La séparation produisit une détonation pareille à celle qui accompagne un coup de fusil. »



Lorsque l'air à l'intérieur des deux hémisphères est évacué à l'aide d'une pompe, on n'arrive plus à les séparer. En effet, la pression atmosphérique de l'air ambiant est largement supérieure à la pression atmosphérique à l'intérieur des hémisphères. Si on laisse entrer l'air dans la cavité en ouvrant le robinet, les pressions intérieures et extérieures s'équilibreront et les hémisphères peuvent être séparés.



4.3.4 Les instruments de mesure

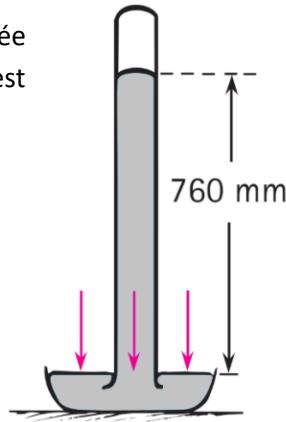
- En 1643, le scientifique italien Evangelista Torricelli a inventé un instrument qui permet de mesurer la pression atmosphérique : le **baromètre à mercure**. Un tube de verre, fermé à l'une de ses extrémités, est rempli à ras bord avec du mercure. L'extrémité ouverte du tube est plongée dans une cuve remplie de mercure. Le mercure dans le tube s'écoule jusqu'à ce que le niveau se stabilise à environ 76 cm (au niveau de la mer), laissant un vide en haut du tube.

Principe

Le niveau du mercure se stabilise lorsque la pression hydrostatique exercée par le mercure dans le tube sur la surface libre du mercure dans la cuve est identique à la pression atmosphérique exercée par l'air :



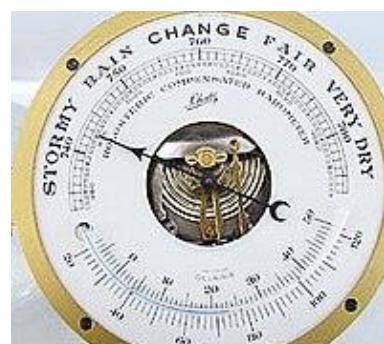
$$\begin{aligned}
 p_{atm} &= p_{Hg} \\
 &= \rho_{Hg} \cdot g \cdot h \\
 &= 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 0,76 \text{ m} \\
 &\cong 1013 \text{ hPa}
 \end{aligned}$$



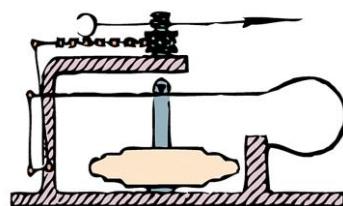
On pourrait utiliser de l'eau au lieu du mercure, mais le tube devrait être 13,6 fois plus long. Un baromètre à eau devrait donc avoir une hauteur d'au moins 10,3 m.

Des variations du niveau de mercure sont dues à des variations de la pression atmosphérique. Si la pression atmosphérique augmente, alors la colonne de mercure atteint plus que 76 cm. Les variations de la pression atmosphérique nous permettent de faire des prévisions météorologiques. Une grande pression atmosphérique prédit en général du beau temps et une basse pression atmosphérique prédit en général du mauvais temps.

- Un **baromètre anéroïde** est un instrument de mesure de la pression atmosphérique qui est facilement transportable et qui fonctionne sans liquide. Des variations de la pression atmosphérique y sont indiquées par une aiguille sur la face de l'instrument. Tel qu'illustré sur la coupe verticale, le baromètre anéroïde contient une capsule anéroïde sous vide dont les parois sont flexibles. La pression atmosphérique exerce des forces pressantes plus ou moins grandes sur le couvercle ondulé de la capsule anéroïde. Un système mécanique de leviers et de ressorts fait alors tourner l'aiguille sur un cadran.



Puisque la pression atmosphérique varie avec l'altitude, un baromètre peut être utilisé pour déterminer l'altitude. Un baromètre anéroïde calibré pour mesurer l'altitude est appelé **altimètre**. Il existe des altimètres avec une sensibilité telle qu'ils peuvent détecter des variations d'altitudes de moins d'un mètre.



- Un **manomètre** est un instrument de mesure de la pression de l'air dans les pneus. Il est conseillé de contrôler la pression des pneus régulièrement, notamment avant un long voyage. À part d'être un facteur de sécurité, la pression des pneus influence considérablement l'usure des pneus et la consommation de carburant de la voiture.

■ As-tu compris ?

16. Dans le cours de chimie on apprend qu'un gaz occupe tout l'espace mis à sa disposition. Pour quelle raison l'atmosphère ne se dissipe-t-elle pas dans l'espace ?
17. La pression atmosphérique est due...
- au poids de l'atmosphère
 - au volume de l'atmosphère
 - à la masse volumique de l'atmosphère
18. Comparée au sommet du mont Everest, la limite supérieure de l'atmosphère est...
- énormément plus haute
 - plus haute, mais pas énormément
 - nettement plus petite
 - environ aussi haute
19. Un paquet de chips a l'air de gonfler lorsqu'il est amené en montagne. Pourquoi ?
20. Pourquoi les fenêtres d'avion sont-elles nettement plus petites que les fenêtres d'un bus ?
21. Après une semaine de pluie, les prévisions de météo annoncent du froid et du soleil. Que peut-on en déduire quant à l'évolution de la pression atmosphérique ?
22. Un altimètre fonctionne selon le principe que la pression atmosphérique...
- reste plus ou moins constante avec l'altitude
 - diminue avec l'altitude
 - augmente avec l'altitude
23. Le diagramme ci-dessous montre la diminution de la pression atmosphérique avec l'altitude.

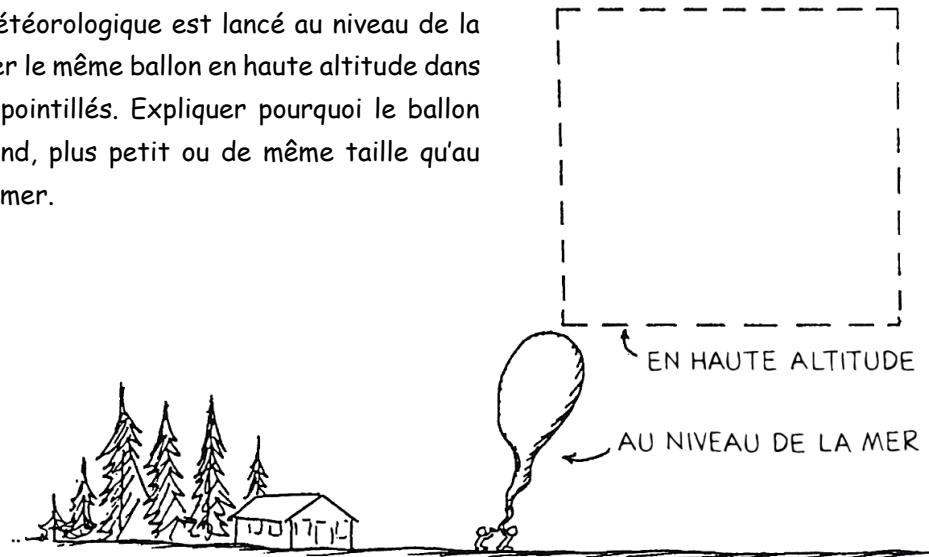


- Pourquoi la pression atmosphérique diminue-t-elle avec l'altitude.
- À quelle altitude la pression atmosphérique est-elle 10 fois plus petite qu'au niveau de la mer ?
- Combien vaut la pression atmosphérique en haut de la Zugspitze (3000 m) ? Et en haut du mont Everest (9000 m) ?

24. Une différence fondamentale entre un liquide et un gaz est que si le liquide est mis sous pression, son volume (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative) et sa masse volumique (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative).

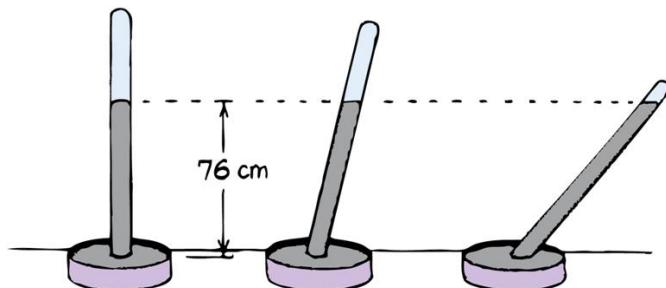
Si un gaz est mis sous pression, son volume (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative) et sa masse volumique (augmente) (diminue) (ne change pas de manière significative).

25. Un ballon météorologique est lancé au niveau de la mer. Dessiner le même ballon en haute altitude dans le carré en pointillés. Expliquer pourquoi le ballon est plus grand, plus petit ou de même taille qu'au niveau de la mer.



26. Si, au lieu du mercure, on pouvait utiliser un liquide plus dense dans un baromètre de Torricelli, le niveau du liquide serait-il supérieur ou inférieur au niveau du mercure ? Pourquoi ?

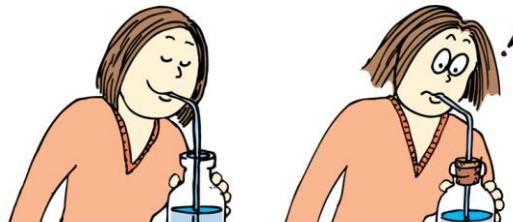
27. Expliquer pourquoi le niveau du mercure dans le baromètre de Torricelli reste identique lorsque le tube est incliné.



28. La taille de la section du tube d'un baromètre à mercure influence-t-elle la hauteur de la colonne de mercure ? Justifier.

29. Est-ce qu'il est plus facile ou plus difficile de boire un soda avec une paille au niveau de la mer qu'en haut d'une montagne ? Expliquer.

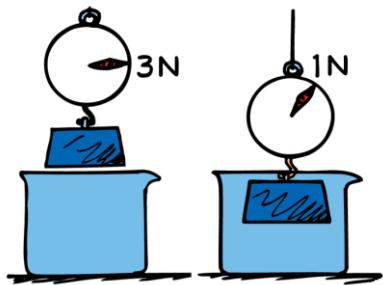
30. Pourquoi la femme n'arrive-t-elle pas à boire son soda dans la figure de droite ?



4.4 La poussée d'Archimède

4.4.1 Le principe d'Archimède

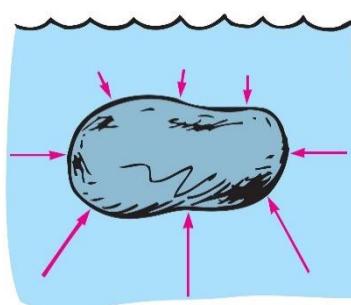
Le corps de poids 3 N paraît plus léger dans l'eau que dans l'air. Or, le poids du corps n'a pas changé, puisqu'il se trouve au même endroit sur la Terre. L'observation que le poids apparent est plus petit que le poids réel doit venir du fait que l'eau exerce sur le corps immergé une poussée verticale vers le haut, appelée la **poussée d'Archimède**.



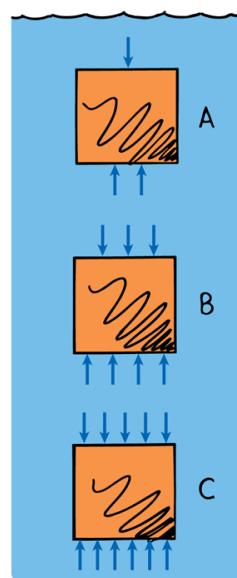
$$F_A = P_{réel} - P_{apparent} = 3 \text{ N} - 1 \text{ N} = 2 \text{ N}$$

Explication

La pression hydrostatique qui règne en bas du corps submergé est plus grande qu'en haut du corps. La force pressante exercée par l'eau sur la partie inférieure du corps est donc plus grande que sur la partie supérieure. Les forces latérales se compensent, puisqu'elles s'appliquent à une même profondeur. Il en résulte une force résultante verticale vers le haut. C'est la poussée d'Archimède.

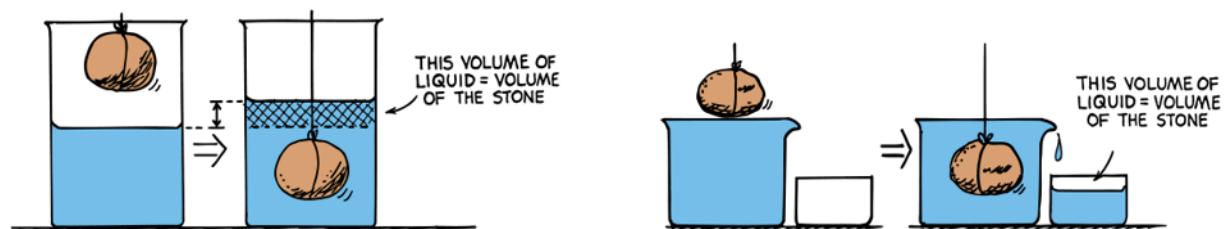


Considérons un corps de forme cubique de longueur d'arête a qui est submergé dans l'eau. La poussée d'Archimède subie par le corps est égale à la différence entre la force pressante exercée sur la face inférieure du corps vers le haut et la force pressante exercée sur la face supérieure du corps vers le bas. Tant que le corps est complètement immergé, cette différence reste identique à toute profondeur.



$$\begin{aligned} F_A &= F_{\uparrow} - F_{\downarrow} \\ &= p_{bas} \cdot S - p_{haut} \cdot S \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot h_{bas} \cdot S - \rho_{liquide} \cdot g \cdot h_{haut} \cdot S \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot S \cdot (h_{bas} - h_{haut}) \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot S \cdot a \\ &= \rho_{liquide} \cdot g \cdot V_{corps} \end{aligned}$$

Archimède réalisa que le volume du corps submergé est identique au volume du liquide déplacé par le corps submergé : $V_{corps} = V_{liquide déplacé}$



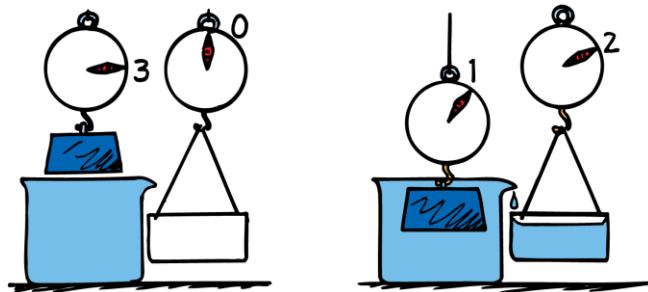
L'expression de la poussée d'Archimède peut donc être reformulée :

$$F_A = \rho_{liquide} \cdot g \cdot V_{liquide déplacé} = m_{liquide déplacé} \cdot g = P_{liquide déplacé}$$

PRINCIPE D'ARCHIMÈDE

La poussée d'Archimède subie par un corps immergé dans un fluide (liquide ou gaz) a même norme que le poids du fluide déplacé :

$$F_A = P_{\text{fluide déplacé}}$$

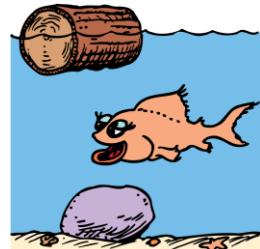


La poussée d'Archimède ne dépend ni de la profondeur d'immersion (tant que le corps est complètement submergé), ni de la nature du corps immergé. Elle dépend uniquement du volume du liquide déplacé et de la masse volumique du liquide.

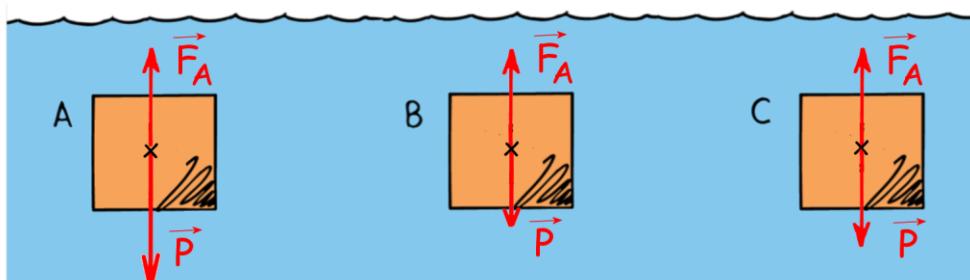
4.4.2 Flotter, couler, rester entre deux eaux

La poussée d'Archimède permet d'expliquer pourquoi les corps coulent, flottent ou restent entre deux eaux. Les deux forces qui s'exercent sur un corps submergé dans un liquide sont :

- le poids : $P = mg = \rho_{\text{corps}} \cdot g \cdot V_{\text{corps}}$ (vers le bas)
- la poussée d'Archimède : $F_A = \rho_{\text{liq}} \cdot g \cdot V_{\text{liq déplacé}}$ (vers le haut).



Lorsque le corps est complètement immergé dans l'eau, le volume du corps est identique au volume du liquide déplacé. Pour déterminer si le corps va couler, rester entre deux eaux ou flotter, il faut considérer la force résultante sur le corps.



$$\begin{aligned} P &> F_A \\ \rho_{\text{corps}} &> \rho_{\text{liquide}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P &< F_A \\ \rho_{\text{corps}} &< \rho_{\text{liquide}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P &= F_A \\ \rho_{\text{corps}} &= \rho_{\text{liquide}} \end{aligned}$$

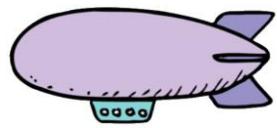
Conclusion

Un corps de masse volumique plus grande que celle du liquide coule.

Un corps de masse volumique plus petite que celle du liquide flotte.

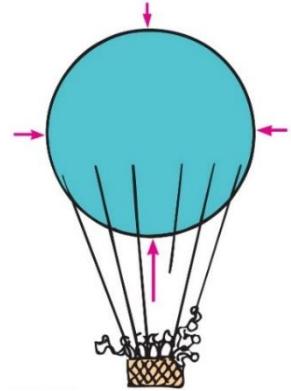
Un corps de même masse volumique que celle du liquide va rester entre deux eaux.

Un dirigeable (Zeppelin) reste en suspension dans l'air, alors qu'il est attiré par la Terre. La raison pour laquelle le dirigeable ne tombe pas dans l'air est la même pour laquelle un poisson ne coule pas dans l'eau. Un corps dans un gaz subit également une poussée d'Archimède vers le haut, exercée par le gaz. Le principe d'Archimède s'applique également aux corps dans un gaz.



Explication

Prenons l'exemple de la montgolfière. La pression atmosphérique est plus grande en bas de la montgolfière qu'en haut car la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. La force pressante exercée par l'air sur la partie inférieure de la montgolfière est donc plus grande que la force pressante exercée par l'air sur la partie supérieure. Les forces latérales se compensent. Il en résulte une force résultante verticale vers le haut. C'est la poussée d'Archimède exercée par l'atmosphère.



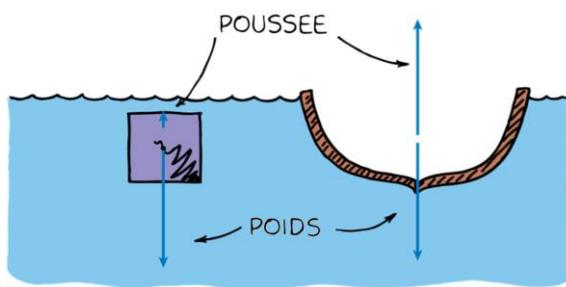
Un corps de masse volumique plus grande que celle de l'air tombe dans l'air.

Un corps de masse volumique plus petite que celle de l'air monte dans l'air.

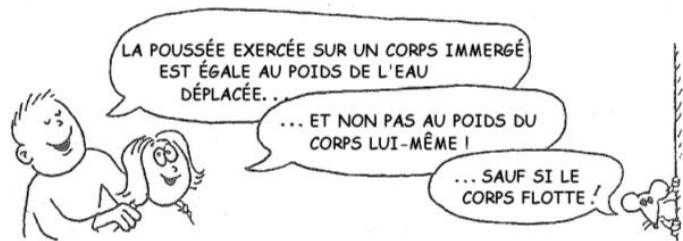
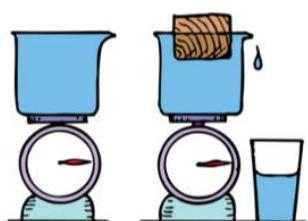
Un corps de même masse volumique que l'air reste suspendu dans l'air.

4.4.3 Flottaison

Comment un énorme pétrolier constitué de fer peut-il flotter, alors que la masse volumique du fer est plus grande que celle de l'eau ? La masse volumique du fer est environ huit fois plus grande que celle de l'eau. La poussée d'Archimède sur un bloc de fer est largement insuffisante pour compenser son poids et le bloc coule. En refaçonnant le bloc de fer en forme de bateau, le poids reste inchangé. En revanche, à cause de sa forme, le bateau déplace un volume d'eau beaucoup plus grand, même en n'étant pas encore complètement immergé. Plus le bateau est immergé, plus il déplace d'eau et plus la poussée d'Archimède sur le bateau est grande. Lorsque le poids de l'eau déplacé correspond exactement au poids du bateau, le bateau se trouve en équilibre et flotte sur l'eau.



Pour un corps qui **flotte**, la poussée d'Archimède a même norme que le poids du corps.



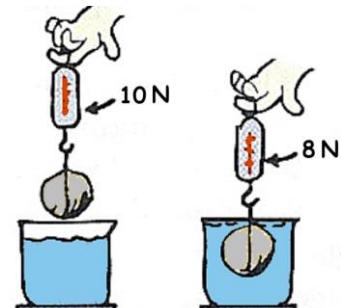
■ As-tu compris ?

31. Expliquer pourquoi sur une plage rocheuse les pierres font moins mal aux pieds lorsqu'on se trouve debout dans l'eau profonde que lorsqu'on se trouve debout à l'extérieur de l'eau ?

32. Si la pression hydrostatique était la même à toute profondeur, y aurait-il une poussée d'Archimède sur un objet immergé ? Justifier.

33. La figure ci-contre montre une pierre qui est suspendue à un dynamomètre et qui est plongée dans un récipient d'eau.

- Quel est le poids de la pierre ?
- Quel est le poids apparent de la pierre lorsqu'elle est immergée dans l'eau ?
- Quelle poussée d'Archimède l'eau exerce-t-elle sur la pierre immergée ?



34. Un bloc d'aluminium d'un volume de 10 cm^3 est plongé dans un récipient d'eau rempli à ras bord. L'eau déborde. On refait l'expérience avec un bloc de plomb de 10 cm^3 . Est-ce que le bloc de plomb déplace plus, moins ou la même quantité d'eau ?

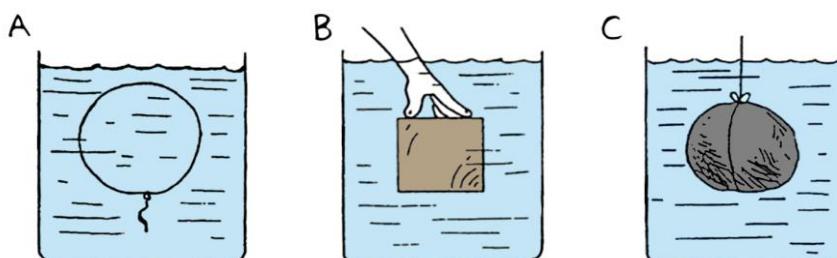
35. Même question pour un bloc d'aluminium de 1 kg et un bloc de plomb de 1 kg.

36. Considère un bloc submergé aux positions A, B, et C. En quelle position la poussée d'Archimède est-elle la plus grande ? Justifie

37. Qui subit une poussée d'Archimède plus grande dans l'eau ? Justifier.

- Un bloc de polystyrène qui flotte.
- Un bloc de fer de même volume qui coule.

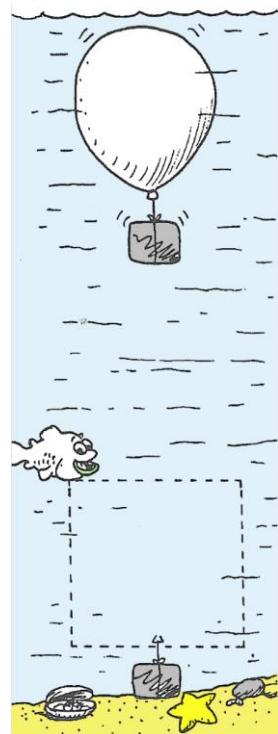
38. Différents corps immergés.



- Un ballon rempli d'1 litre d'eau est immergé dans de l'eau (fig A).
 - Calculer le poids de l'eau dans le ballon.
 - Calculer la poussée d'Archimède subie par le ballon.
 - Sur une figure, représenter le poids du ballon et la poussée d'Archimède au centre de gravité du ballon (1 cm correspond à 5 N).
 - Le ballon va-t-il couler, flotter ou rester entre deux eaux ? Justifier.
- Mêmes questions pour un bloc de bois d'une masse de 0,5 kg et d'un volume de 1 dm^3 que l'on tient immergé sous la surface de l'eau (fig B).
- Mêmes questions pour un rocher de même volume mais de masse égale à 2 kg, que l'on tient suspendu sous la surface de l'eau (fig C).

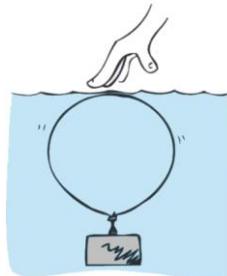
39. Un ballon rempli d'air est lesté de manière qu'il coule dans un lac.

- Dessiner le ballon au fond du lac (dans le carré en pointillés).
- Comparer, en justifiant, la masse volumique du système qui coule (ballon + lestage) avec la masse volumique de l'eau.
- Lorsque le système coule, sa masse volumique... (justifier)
 - devient plus grande.
 - reste identique.
 - devient plus petite.
- Comparer le poids du système et la poussée d'Archimède qu'il subit.
- Au fur et à mesure que le système coule, la poussée d'Archimède sur le système... (justifier)
 - devient plus grande.
 - reste identique.
 - devient plus petite.
- Mêmes questions b, c, d, et e si le système est un rocher.

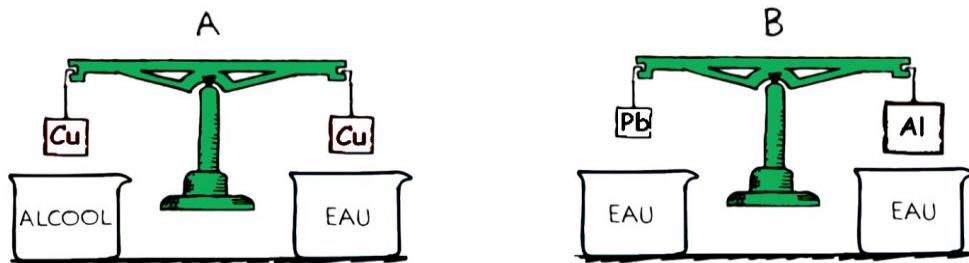


40. Un ballon est lesté de manière qu'il flotte encore tout juste à la surface de l'eau. Lorsqu'on pousse le ballon plus bas, il va... (justifier)

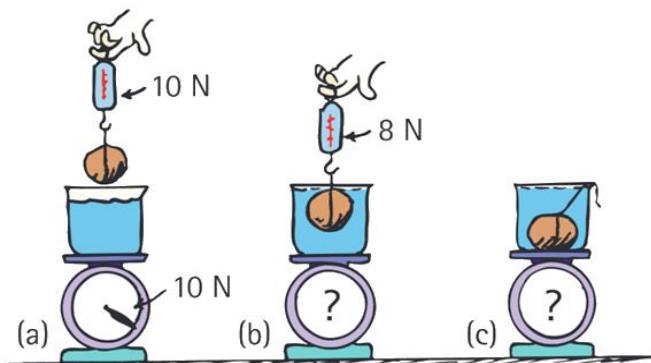
- remonter vers la surface.
- rester entre deux eaux.
- couler.



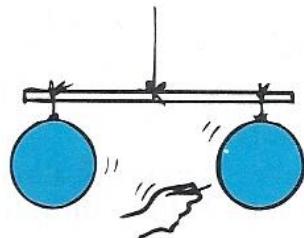
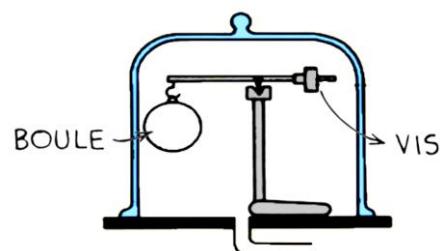
41. Qu'observe-t-on lorsqu'on descend les balances et que les blocs suspendus sont complètement submergés dans les liquides ? Justifier.



42. Déterminer, en justifiant, la valeur indiquée par la balance dans les cas (b) et (c).



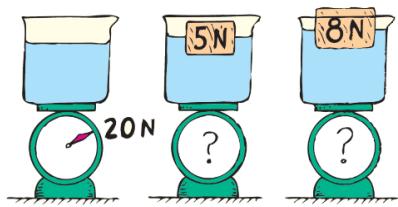
43. Il n'est pas exact de dire que des objets lourds coulent et des objets légers flottent. Donner deux exemples extrêmes pour expliquer.
44. Pourquoi un bloc de fer flotte-t-il sur le mercure alors qu'il coule dans l'eau ?
45. Quelle est la différence entre les méthodes employées par un poisson et un sous-marin pour changer leur masse volumique respective et ainsi contrôler leur profondeur dans l'eau ?
46. Est-ce que la poussée d'Archimède s'exerce sur tous les corps dans l'air ou seulement sur des corps très légers comparé à leur taille ?
47. Un ballon rempli d'hélium lévite sur place dans l'air. La pression atmosphérique sur la partie inférieure du ballon est alors
- égale à celle exercée sur la partie supérieure.
 - inférieure à celle exercée sur la partie supérieure.
 - supérieure à celle exercée sur la partie supérieure.
48. Sur quel corps la poussée d'Archimède atmosphérique est-elle plus grande ? Justifier.
- Un éléphant qui tombe.
 - Un ballon de fête d'anniversaire rempli d'hélium et qui monte.
49. Un ballon qui pèse 1N reste en suspension dans l'air.
- Quelle est la norme de la poussée d'Archimède qui s'exerce sur le ballon ?
 - Que se passe-t-il si la poussée d'Archimède diminue ? Justifier.
 - Que se passe-t-il si la poussée d'Archimède augmente ? Justifier.
50. On remplace l'hélium dans un ballon par du dihydrogène moins lourd.
- La poussée d'Archimède de l'atmosphère change-t-elle en considérant que le volume du ballon reste identique ? Justifier.
 - Lequel des deux ballons en premier le plafond de la salle ? Justifier.
51. Un récipient en acier rempli avec de l'hélium ne monte pas dans l'air, alors qu'un ballon rempli avec de l'hélium monte. Pourquoi ?
52. Un levier auquel sont accrochée une boule en polystyrène d'un côté et un contrepoids (une vis sur la figure) de l'autre côté, est placé sous une cloche à vide. Lorsque l'air sous la cloche est évacué, le levier est en équilibre. Qu'observe-t-on lorsque la cloche est remplie d'air ? Justifier.
53. Deux ballons d'air identiques et de même volume sont suspendus aux extrémités d'une tige horizontale en équilibre. On pique l'un des ballons (à travers un morceau de scotch pour que le ballon n'explose pas) et l'air s'échappe de ce ballon. L'équilibre de la balance est-il rompu ? Si oui, dans quel sens va basculer la balance ? Justifier.



54. Un bécher rempli à plus de la moitié d'eau pèse 20 N.

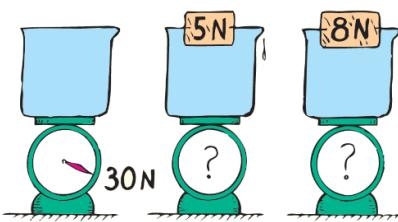
Quelle valeur indique la balance lorsqu'un bloc de bois... (justifier)

- de 5 N flotte dans le bécher ?
- de 8 N flotte dans le bécher ?

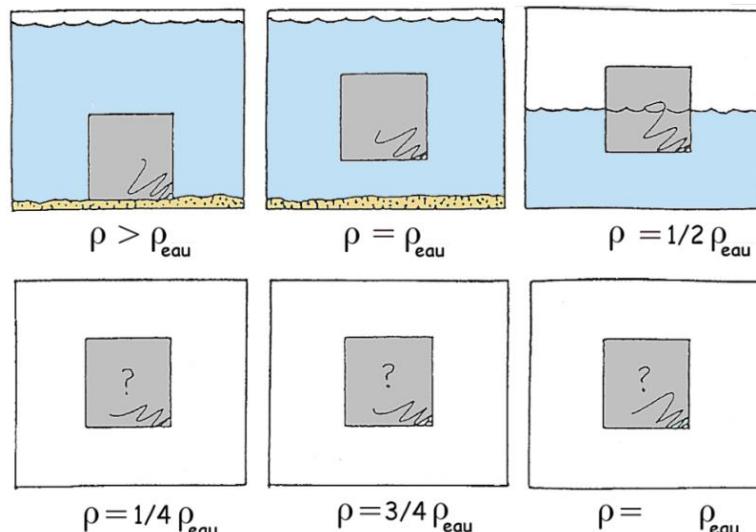


Le même bécher rempli à ras bord pèse 30 N. Quelle valeur indique la balance lorsqu'un bloc de bois... (justifier)

- de 5 N flotte dans le bécher ?
- de 8 N flotte dans le bécher ?



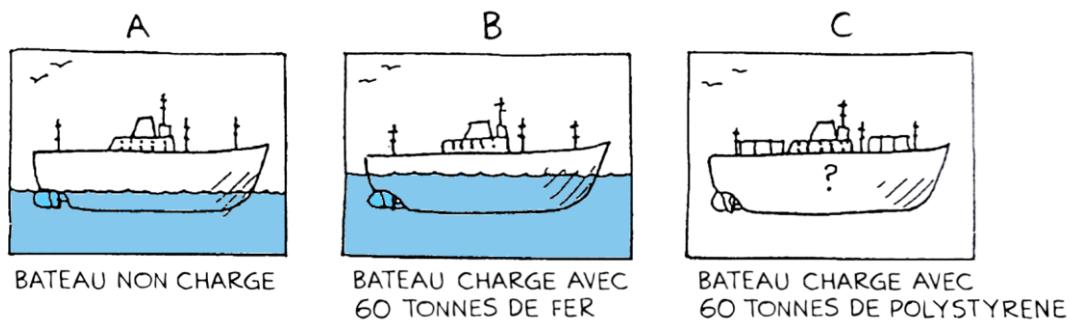
55. Le niveau de l'eau est indiqué dans les trois premières figures. Représenter le niveau pour les autres cas et donner un nouvel exemple pour le dernier cas.



56. Classer par ordre décroissant le pourcentage de volume d'un ballon de basketball au-dessus d'une surface...

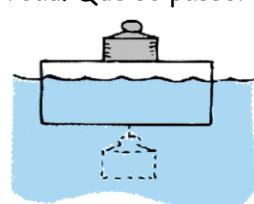
- d'eau distillée.
- d'eau salée.
- du mercure.

57. Représenter le niveau de l'eau dans la figure C.



58. Un bloc de bois chargé par un lestage en fer flotte sur l'eau. Que se passera-t-il si le lestage est suspendu en dessous du bois ? Justifier.

- Le bois flotte au même niveau.
- Le bois flotte plus bas.
- Le bois flotte plus haut.



Crédits photos et illustrations

- © I-ing / Shutterstock.com (460967056) – **p.1** (*montagne russe*)
- © Forgem / Shutterstock.com (1537331159) – **p.4** (*tachymètre*)
- © Wikimedia Commons/Phil Moore – **p.65** (*aqueduc*)
- © Wikimedia Commons/public domain – **p.66** (“*Trieste*”)
- © Wikimedia Commons/NASA; public domain – **p.67** (*atmosphère*)
- © Wikimedia Common/Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 – **p.69** (*baromètre anéroïde*)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT, auteur de toutes les autres illustrations de ce cours. Elles ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

- © HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson
- © HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson
- © EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press

Partie II

Électricité



L'électricité est la branche de la physique qui traite de l'ensemble des phénomènes associés à la présence et au mouvement de charges électriques.

Le mot électricité vient du grec *elektron*, ce qui signifie ambre (« Bernstein »). En effet, cette matière a la propriété d'attirer des objets légers après avoir été frottée – ce qui témoigne de la présence de charges électriques.

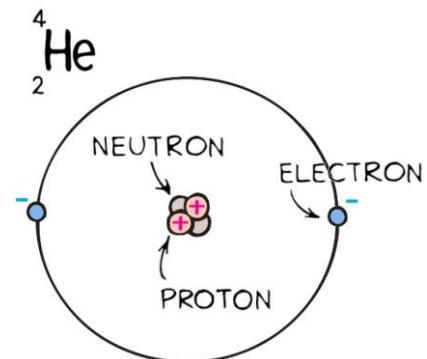
Sommaire

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Rappels de 4C | 1 |
| 1.1 | La charge électrique | 1 |
| 1.2 | Interactions électriques..... | 1 |
| 1.3 | L'énergie électrique..... | 1 |
| 1.4 | La tension électrique | 2 |
| 1.4.1 | La pile..... | 2 |
| 1.4.2 | Définition de la tension électrique..... | 2 |
| 1.4.3 | Mesure de la tension électrique (TP) | 3 |
| 1.5 | Le courant électrique | 3 |
| 1.5.1 | Origine du courant électrique dans un fil métallique | 3 |
| 1.5.2 | Sens du courant électrique..... | 4 |
| 1.5.3 | Définition de l'intensité du courant électrique | 4 |
| 1.5.4 | Mesure de l'intensité du courant électrique (TP) | 4 |
| 1.6 | Générateurs et récepteurs | 5 |
| 1.7 | La puissance électrique | 5 |
| 2 | La résistance électrique..... | 7 |
| 2.1 | Interprétation microscopique de la résistance électrique..... | 7 |
| 2.2 | La loi d'Ohm..... | 9 |
| 2.3 | La caractéristique courant-tension d'un récepteur électrique | 10 |
| 3 | Circuits électriques simples..... | 12 |
| 3.1 | Circuit série..... | 12 |
| 3.2 | Circuit parallèle | 13 |
| 3.3 | Synthèse | 13 |
| 4 | La résistance équivalente | 15 |
| 4.1 | Résistances en série | 15 |
| 4.2 | Résistances en parallèle | 16 |
| 4.3 | Applications | 16 |

1 Rappels de 4C

1.1 La charge électrique

- La **charge électrique** (Symbole q ou Q) est une caractéristique fondamentale des particules élémentaires. La charge électrique est mesurable et son unité SI est le **coulomb¹ (C)**.
- Les **protons**, confinés dans le noyau atomique, portent une charge électrique **positive** de valeur $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, dite la **charge élémentaire**.
- Les **électrons**, beaucoup plus légers et mobiles autour du noyau atomique, portent une charge électrique **négative** de même valeur absolue : $-e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.



1.2 Interactions électriques

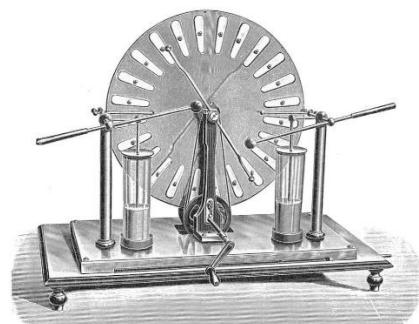
Les phénomènes électriques reposent sur l'**interaction électrique** entre particules chargées : **des charges de même signe se repoussent ; des charges de signe opposé s'attirent**.



1.3 L'énergie électrique

L'énergie électrique est la forme d'énergie liée à aux charges électriques. Elle se manifeste lors de la séparation et lors du mouvement de charges électriques.

En actionnant la manivelle de la machine de Wimshurst, on provoque une séparation de charges électriques : le bras gauche de la machine se charge positivement (manque d'électrons) et le bras droit négativement (excès d'électrons). Au bilan, de l'énergie mécanique (mouvement de la manivelle et du disque) est transformée en énergie électrique (séparation de charges électriques). En effet, une fois les charges séparées, la machine possède la capacité d'effectuer un travail à son tour, puisqu'elle peut se décharger de manière spectaculaire en produisant un petit éclair.

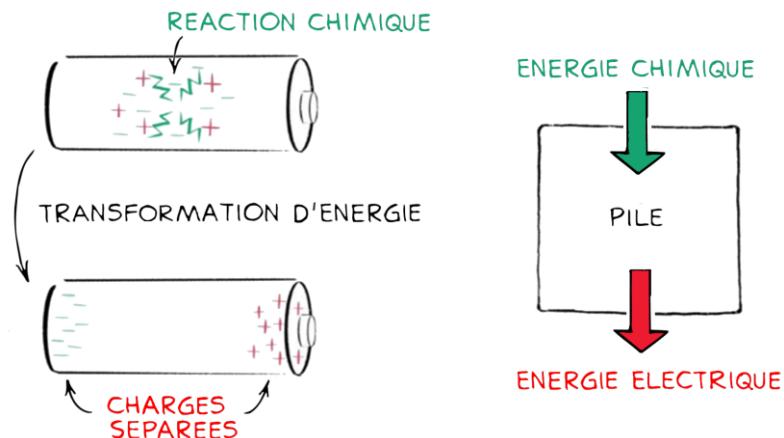


¹ En l'honneur de Charles Augustin de Coulomb, physicien français du 18^e siècle et père fondateur de l'électrostatique.

1.4 La tension électrique

1.4.1 La pile

Une pile (« Batterie ») est une source d'énergie électrique. Les réactions chimiques entre les substances contenues dans la pile provoquent une séparation de charges électriques. Le pôle **+** d'une pile est chargé positivement (manque d'électrons) ; le pôle **-** est chargé négativement (excès d'électrons).



1.4.2 Définition de la tension électrique

Sur différentes piles on peut lire différentes inscriptions, p.ex. 1,5 V ou 9 V. Ces nombres, exprimés en **volt² (V)**, indiquent la **tension électrique** entre les pôles de la pile.

La **tension électrique** entre deux bornes (p.ex. entre les pôles d'une pile) est égale à l'énergie électrique transformée entre ces bornes par unité de charge électrique.

$$\text{tension électrique (en V)} = \frac{\text{énergie électrique (en J)}}{\text{charge électrique (en C)}}$$

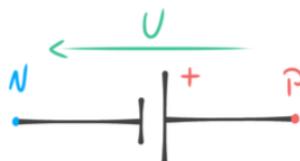
$$U = \frac{E_{\text{el}}}{Q}$$

Concrètement, une tension de $U = 9 \text{ V}$ entre les pôles d'une pile signifie qu'une charge de $Q = 1 \text{ C}$ acquiert une énergie électrique de $E_{\text{el}} = Q \cdot U = 1 \text{ C} \cdot 9 \text{ V} = 9 \text{ J}$ en étant séparée par la pile.

Une fois séparées, les charges électriques ont tendance à vouloir retrouver un état de neutralité électrique. Plus la tension entre les pôles d'une pile est grande, plus les charges séparées possèdent de l'énergie qu'elles peuvent libérer en se déplaçant. Par conséquent, la valeur de la tension entre les pôles d'une pile caractérise cette pile en tant que **source d'énergie électrique**.

Représentation

La tension entre deux points est indiquée à l'aide d'une flèche qui pointe vers le pôle négatif de la source.

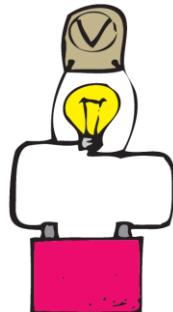


² En l'honneur d'Alessandro Volta, physicien italien du 19^e siècle à qui l'on doit la première pile électrique.

1.4.3 Mesure de la tension électrique (TP)

Un **voltmètre branché en parallèle** permet de mesurer la tension électrique entre deux points (p.ex. entre les bornes d'une lampe).

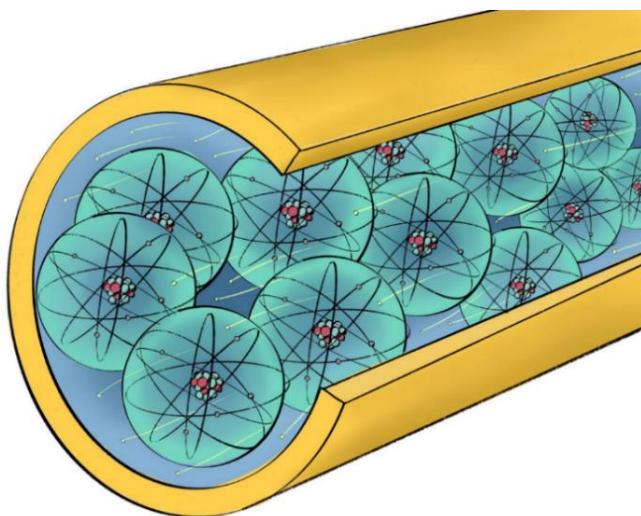
Le voltmètre indique une tension positive si la borne **V** de l'appareil est plus proche du pôle **+** que la borne **COM**. Dans le cas contraire, la mesure donne une tension négative de même valeur absolue.



1.5 Le courant électrique

1.5.1 Origine du courant électrique dans un fil métallique

Les métaux (or, cuivre, aluminium, ...) possèdent des électrons - porteurs d'une charge élémentaire négative - très peu liés aux noyaux atomiques. Ces **électrons libres** peuvent se déplacer d'un atome à l'autre dès qu'une légère force les y constraint.

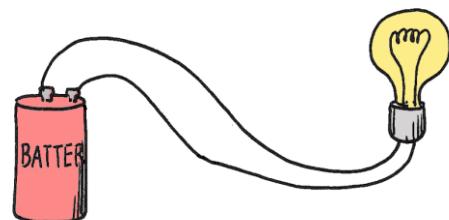


Lorsque les électrons libres se déplacent de manière collective à travers un fil métallique, on dit que le fil est parcouru par un **courant électrique**.

De manière générale, un courant électrique est un flux de charges électriques.

Les matériaux qui ont la propriété de permettre le passage du courant électrique sont appelés des **conducteurs électriques** ; les matériaux qui ont la propriété d'empêcher le passage du courant électrique sont appelés des **isolants**.

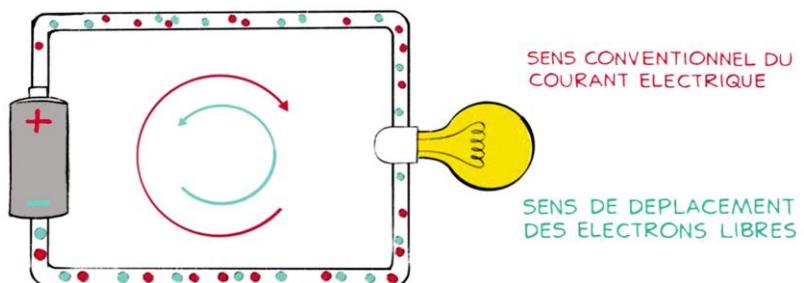
Pour obtenir un courant électrique, il suffit de relier les pôles d'une source de tension (p.ex. d'une pile) à l'aide d'un matériau conducteur. Les porteurs de charge libres qui se trouvent dans le conducteur sont alors mis en mouvement en raison de la tension électrique qui existe entre les pôles de la source. Autrement dit, la **tension** électrique est la **cause** du **courant** électrique.



En faisant passer le courant électrique par une lampe, on obtient un **circuit électrique utile** : l'énergie électrique fournie par la source est transportée par les électrons libres vers la lampe où elle est transformée en chaleur (énergie thermique) et lumière (énergie rayonnée).

1.5.2 Sens du courant électrique

Par convention³, le courant électrique circule du pôle + vers le pôle - de la source d'énergie électrique. En raison de leur charge négative, les électrons libres se déplacent en sens inverse, c.à.d. du pôle - vers le pôle + de la source. Les protons, confinés dans les noyaux atomiques, ne se déplacent pas.



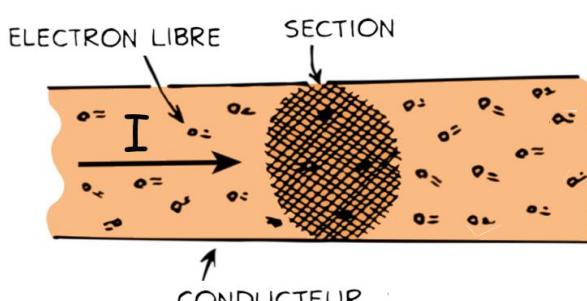
1.5.3 Définition de l'intensité du courant électrique

L'intensité du courant électrique (« Stromstärke »), mesurée en **ampère**⁴ (A), indique si le flux de charge électrique est fort ou faible.

L'intensité du courant électrique est égale à la charge électrique transportée à travers une section du conducteur par unité de temps.

$$\text{intensité du courant (en A)} = \frac{\text{charge électrique (en C)}}{\text{intervalle de temps (en s)}}$$

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

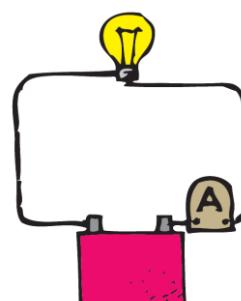


Remarques

- L'intensité du courant est indiquée à l'aide d'une flèche qui pointe vers le pôle négatif de la source (sens conventionnel du courant électrique).
- L'ampère-heure (Ah) est une unité de charge électrique : $1 \text{ Ah} = 1 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ C}$

1.5.4 Mesure de l'intensité du courant électrique (TP)

Un **ampèremètre branché en série** permet de mesurer l'intensité du courant dans un conducteur électrique. L'ampèremètre indique une intensité positive si la borne A de l'appareil est plus proche du pôle + que la borne COM. Dans le cas contraire, la mesure donne une intensité négative de même valeur absolue.



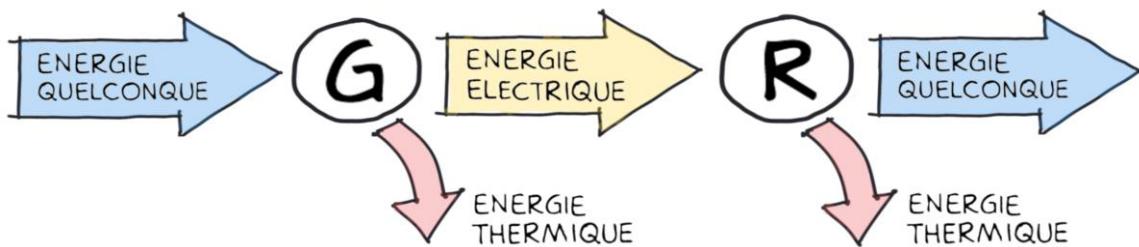
³ Le sens (positif) du courant électrique a été fixé de cette façon par la communauté scientifique.

⁴ En l'honneur de André-Marie Ampère, physicien français du 19^e siècle et pionnier de l'électromagnétisme.

1.6 Générateurs et récepteurs

On distingue entre deux types de composants électriques : les générateurs et les récepteurs.

- Les **générateurs** électriques (ou sources d'énergie électrique) sont des dipôles qui transforment une forme d'énergie quelconque en énergie électrique.
- Les **récepteurs** électriques sont des dipôles qui transforment l'énergie électrique en une autre forme d'énergie.



Exemples

- Une cellule photovoltaïque est un générateur : elle transforme l'énergie lumineuse qu'elle reçoit en énergie électrique. La majeure partie est toutefois perdue sous forme d'énergie thermique.
- Un moteur électrique est un récepteur : il transforme l'énergie électrique qu'il reçoit en énergie cinétique et en énergie thermique.
- Un accumulateur de téléphone portable joue les deux rôles : c'est un générateur lors d'une utilisation sans fil du téléphone et un récepteur lors de la recharge du téléphone.

1.7 La puissance électrique

La puissance électrique nous renseigne sur la « vitesse » des transformations énergétiques qui ont lieu dans un circuit électrique.

La **puissance électrique** d'un dipôle est égale à l'énergie électrique qu'il fournit/reçoit par unité de temps :

$$\text{puissance électrique (en W)} = \frac{\text{énergie électrique (en J)}}{\text{intervalle de temps (en s)}}$$

$$P_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{t}$$

Puissance électrique en fonction de U et I

En utilisant les définitions de la tension électrique et de l'intensité du courant électrique :

$$P_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{t} = \frac{U \cdot Q}{t} = U \cdot \frac{Q}{t} = U \cdot I$$

$$P_{\text{el}} = U \cdot I$$

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



■ As-tu compris?

- Un ballon en plastique est frotté contre tes cheveux. Le ballon se charge négativement.
 - Que se passe-t-il lors de ce phénomène au niveau microscopique ?
 - Déterminer le nombre d'électrons que le ballon a arraché à tes cheveux si sa charge électrique vaut $Q = -0,032 \text{ mC}$.
- Une pile de 9 V neuve peut fournir une énergie électrique totale de 19440 J. Que vaut la quantité de charge totale que cette pile peut séparer ?
- Que vaut l'intensité du courant lorsqu'une charge de 590 mC traverse la section d'un circuit électrique en 2 secondes ? Quelle charge électrique traverse alors la section en une minute ?
- L'accumulateur d'un téléphone portable porte l'indication « 1000 mAh ». Lorsque l'écran est réglé sur une luminosité moyenne, le téléphone est alimenté par un courant électrique d'une intensité de 200 mA. Quelle est l'autonomie du téléphone lorsqu'on l'utilise en luminosité moyenne ?
- Un sèche-cheveux porte l'inscription (2300 W ; 230 V).
 - Que vaut l'intensité du courant électrique lorsqu'il fonctionne en pleine puissance ?
 - Combien d'énergie électrique est transformée lorsqu'une fille sèche ses cheveux (durée typique de 6 min) ? Donner le résultat en J et en Wh.
- Une pile alimente le moteur électrique d'un petit ventilateur.
 - Décrire les transformations d'énergie qui ont lieu au niveau de la pile et au niveau du moteur électrique.

On mesure la tension aux bornes de la pile et l'intensité du courant dans le moteur.

 - Faire un schéma du montage en indiquant les instruments de mesure et les grandeurs mesurées.

Le voltmètre indique 9V et le ventilateur porte l'inscription (9V ; 1W).

 - Que vaut l'intensité du courant dans le moteur ?
 - Combien d'énergie électrique est fournie par la pile en 5 minutes ?
 - Combien d'électrons ont traversé le moteur pendant ce temps ?
- Une pile de 4,5 V alimente une petite lampe qui porte l'inscription (4,5 V ; 1 W).
 - Que vaut l'intensité du courant dans la lampe ?
 - Combien d'énergie électrique est reçue par la lampe en 30 s ?
 - Combien d'électrons ont traversé la lampe pendant ce temps ?
- Le moteur des nouvelles locomotives électriques de la CFL fonctionne sous 15 kV ; 200 A.
 - Calculer la puissance électrique reçue par le moteur.
 - Quelle quantité de charge électrique traverse le moteur pendant une heure ?
 - Evaluer la quantité d'énergie électrique nécessaire pour un trajet Luxembourg - Paris qui dure environ 4 h.
 - Une fois arrivé à Paris, sous quelle forme retrouve-t-on toute l'énergie électrique reçue par le moteur ?

2 La résistance électrique

En appliquant une même tension électrique aux bornes de différents conducteurs, on mesure différentes intensités du courant. Les électrons circulent plus facilement à travers certains conducteurs que d'autres. On dit que les conducteurs se distinguent en termes de leur résistance électrique.

La **résistance électrique** d'un conducteur mesure sa capacité de s'opposer au passage du courant électrique. Numériquement, la résistance électrique est égale au rapport entre la tension électrique aux bornes du conducteur et l'intensité du courant électrique qui le traverse :

$$\text{résistance électrique (en } \Omega) = \frac{\text{tension électrique (en V)}}{\text{intensité du courant (en A)}}$$

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

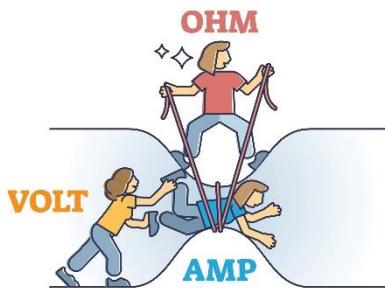
Dans le système international (SI), la résistance électrique est exprimée en **ohm**⁵ (Ω).

En transformant la formule ci-dessus, on obtient que l'intensité du courant dans un conducteur

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

est d'autant plus grande que :

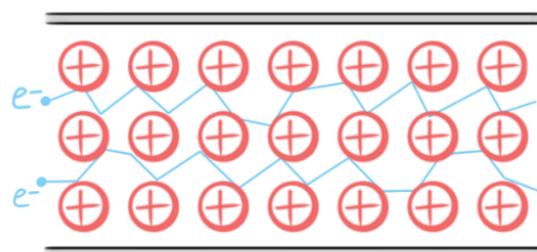
- la tension électrique aux bornes du conducteur est grande ;
- la résistance électrique du conducteur est faible.



La résistance d'un conducteur électrique dépend de ses dimensions. Un fil électrique long et/ou fin a une résistance plus grande qu'un fil court et/ou épais. La résistance dépend également du matériau. Le cuivre étant meilleur conducteur que l'aluminium, la résistance d'un fil en cuivre est plus petite que celle d'un fil en aluminium de même dimension⁶. Enfin, la résistance d'un fil électrique dépend de sa température. Pour la plupart des métaux, la résistance augmente lorsque la température augmente.

2.1 Interprétation microscopique de la résistance électrique

Lorsque les électrons libres se déplacent à travers un conducteur, ils interagissent avec le réseau métallique⁷. Si l'interaction entre les électrons libres et les ions est importante, les électrons perdent beaucoup d'énergie électrique lors de leur déplacement et la résistance du conducteur est grande ; en revanche, si l'interaction avec le réseau métallique est très faible, les électrons libres se déplacent pratiquement sans perte d'énergie électrique et la résistance du conducteur est négligeable.



⁵ En l'honneur de Georg S. Ohm, physicien du 19^e siècle dont les travaux ont ouvert la voie à une description mathématique des circuits électriques.

⁶ Pour certaines applications, on préfère toutefois l'aluminium en raison de sa plus faible masse volumique (câbles plus légers) et de son prix.

⁷ Le réseau métallique est la structure tridimensionnelle formée par les ions du métal en question. Les électrons libres forment une espèce de « gaz » et peuvent se déplacer plus ou moins facilement à travers cette structure.

■ As-tu compris ?

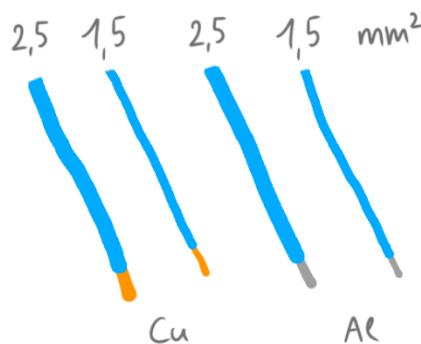
9. Vrai ou Faux ? Justifier !

- a. Lorsqu'on applique une tension de 10 V aux bornes d'une résistance de 20Ω , on obtient une intensité du courant de 500 mA.
- b. Un isolant électrique a une résistance très faible.

10. On considère deux conducteurs électriques. Le premier a une résistance $R_1 = 10 \Omega$ et le deuxième une résistance $R_2 = 100 \Omega$. Cocher les réponses correctes.

- Il est possible d'avoir la même tension aux bornes des deux conducteurs.
- Il est impossible d'avoir la même intensité de courant dans les deux conducteurs.
- Pour avoir la même intensité du courant dans les deux conducteurs, R_2 doit être soumis à une tension 10 fois plus grande.
- Lorsqu'on a la même tension aux bornes des deux conducteurs, l'intensité du courant dans R_2 est 10 fois plus grande.

11. Pour réaliser les connexions dans un circuit électrique, on dispose de quatre fils différents (cuivre/aluminium section $1,5 \text{ mm}^2$ et $2,5 \text{ mm}^2$).



- a. Lequel choisir, si l'on veut que l'intensité du courant soit la plus grande ? Justifier.
- b. Lequel choisir, si l'on veut que l'intensité du courant soit la plus petite ? Justifier.

12. La résistance électrique d'un conducteur idéal est nulle. Sachant qu'il est impossible d'avoir une intensité infinie dans un circuit électrique, que peut-on en déduire au sujet de la puissance électrique d'un conducteur idéal ?

13. Une lampe torche (« Taschenlampe ») est parcourue par un courant électrique d'une intensité de 250 mA lorsqu'elle est branchée à une source de tension de 12 V. Que vaut la résistance de la lampe ?

14. Une bouilloire (« Wasserkocher ») a une résistance électrique de 23Ω . Que vaut l'intensité du courant électrique dans la bouilloire lorsqu'elle est branchée à une prise de tension domestique (230V) ?

2.2 La loi d'Ohm

Expérience : Un fil métallique est tendu entre deux points A et B. La tension aux bornes du fil est réglée avec un générateur et mesurée à l'aide d'un voltmètre. L'intensité du courant électrique qui circule à travers le fil est mesurée à l'aide d'un ampèremètre.

Le tableau et le graphique indiquent les résultats obtenus pour un fil en constantan de longueur $l = 1 \text{ m}$ et de diamètre $d = 0,2 \text{ mm}$.

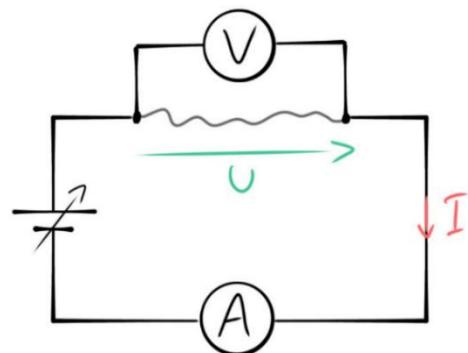
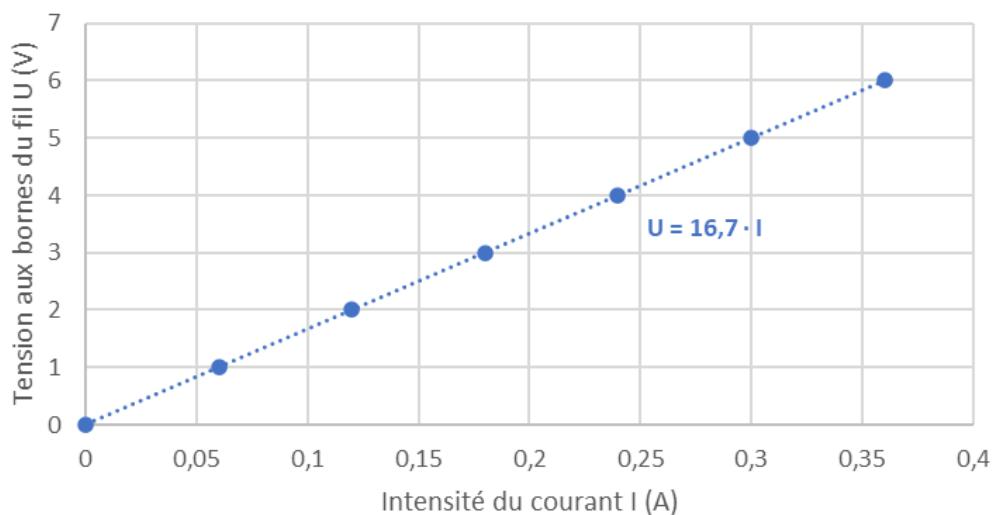


Tableau des mesures :

| U(V) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|---|------|------|------|------|------|------|
| I (A) | 0 | 0,06 | 0,12 | 0,18 | 0,24 | 0,30 | 0,36 |
| R(Ω) | / | 16,7 | 16,7 | 16,7 | 16,7 | 16,7 | 16,7 |

Pour ce fil, on constate que le rapport $\frac{U}{I} = R$ est constant⁸. Cela signifie que l'intensité du courant électrique dans le fil de constantan est proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes. Cette proportionnalité se traduit également par le fait que la représentation graphique de U en fonction de I donne une demi-droite issue de l'origine de pente égale à la résistance (constante) du fil.

Caractéristique $U(I)$ d'un fil de constantan



La loi d'Ohm

On dit qu'un conducteur (ou composant électrique) vérifie la **loi d'Ohm** si et seulement si l'intensité du courant qui le traverse est proportionnelle à la tension appliquée :

$$\frac{U}{I} = R = \text{const.}$$

Un conducteur qui vérifie la loi d'Ohm a une résistance constante. On l'appelle **conducteur ohmique**.

⁸ d'où le nom de cet alliage.

2.3 La caractéristique courant-tension d'un récepteur électrique

Un récepteur électrique se caractérise par la relation qui existe entre la tension appliquée à ses bornes et l'intensité du courant qui le traverse. La représentation graphique de U en fonction de I traduit cette relation (cf. diagramme précédent). Voilà pourquoi on parle de la **caractéristique** du récepteur.

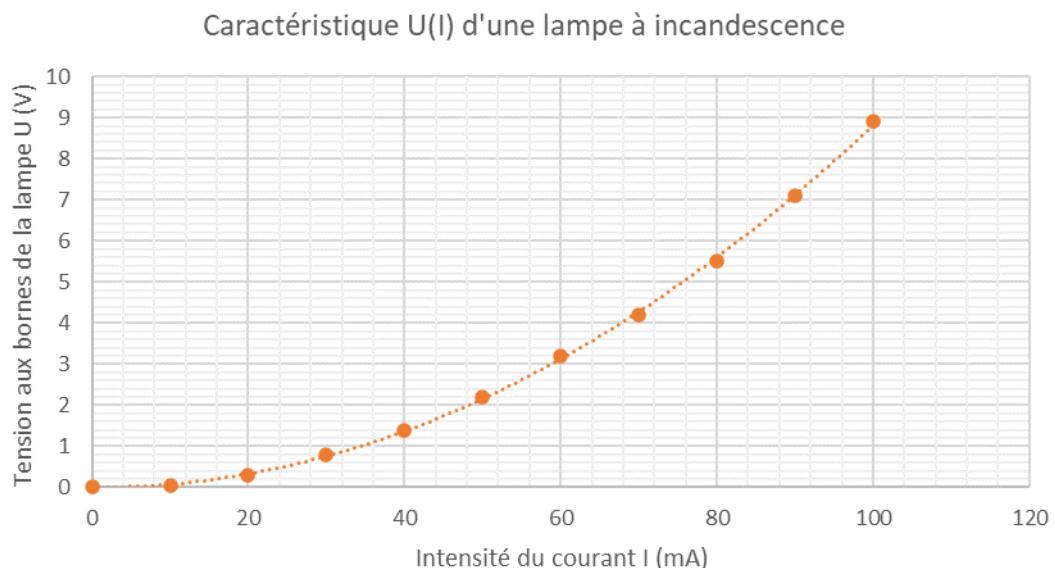
Conducteurs ohmiques

Par définition, les conducteurs ohmiques ont une résistance constante : leur caractéristique $U(I)$ est une demi-droite issue de l'origine (U proportionnel à I) de pente égale à la valeur de la résistance.

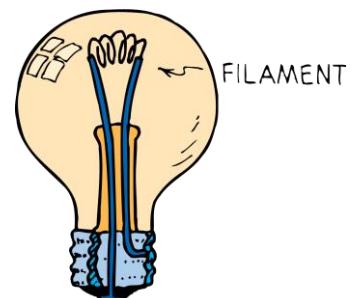
Exemples : Le fils électriques sont des conducteurs ohmiques à condition que leur température reste constante. Leur caractéristique est une demi-droite issue de l'origine dont la pente équivaut à la résistance du fil.

Conducteurs non-ohmiques

La résistance des conducteurs non-ohmiques dépend de l'intensité du courant qui les traverse. Leur caractéristique $U(I)$ est non-linéaire.



Exemples : Une lampe à incandescence (« Glühlampe ») présente une caractéristique non-linéaire. En effet, la résistance du filament métallique⁹ augmente lorsque le courant électrique qui le traverse devient plus intense. Ceci s'explique par le fait que les collisions entre les électrons et les ions sont plus fréquentes/importantes lorsque l'intensité du courant augmente. Ces collisions entraînent une augmentation de la température du fil, ce qui favorise de nouvelles collisions etc.



Lorsque l'intensité du courant atteint sa valeur nominale, la température du fil peut dépasser les 2000 °C. Le fil émet alors une lumière d'une qualité comparable à celle du Soleil. Ce rayonnement thermique « naturel », apprécié par les êtres humains, est pourtant en train d'être supplanté par le rayonnement « artificiel » des lampes LED¹⁰, en raison de leur plus grande efficacité énergétique.

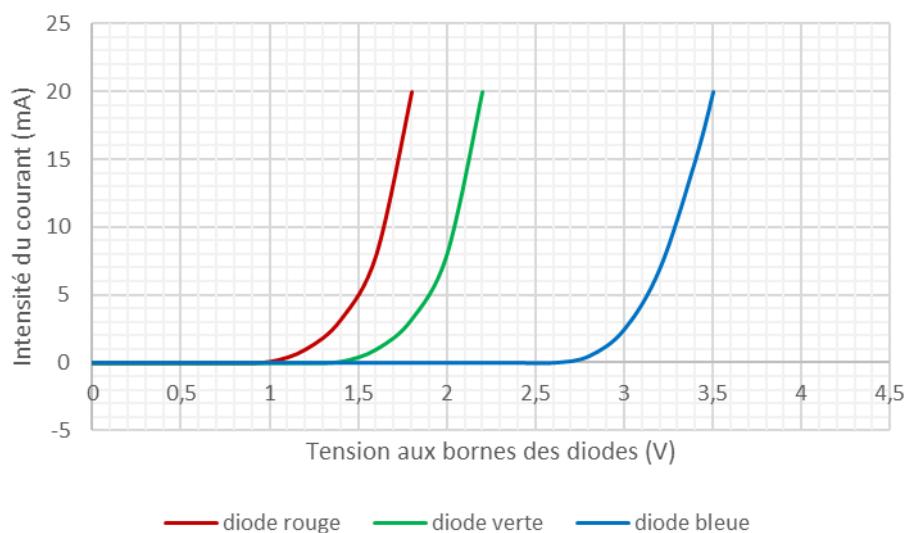
⁹ On utilise généralement du tungstène en raison de sa température de fusion très élevée.

¹⁰ Une diode LED est un récepteur non-ohmique. Sa caractéristique est fortement non-linéaire.

■ As-tu compris ?

16. Le constantan est un alliage composé de cuivre (55%), de nickel (44%) et de manganèse (1%). Quelle est la particularité de ce matériau ?
17. Cocher les réponses correctes.
- À température constante, les conducteurs métalliques vérifient la loi d'Ohm.
 - Lorsque la tension aux bornes d'un fil de constantan est doublée, sa résistance double également.
 - La caractéristique d'un composant électrique est une demi-droite passant par l'origine si et seulement si sa résistance est constante.
18. Un fil métallique (p.ex. un fil de fer) peut être modélisé par un réseau ionique (structure tridimensionnelle de cations) rempli d'un « gaz » d'électrons libres. Dans le cadre de ce modèle, expliquer les phénomènes suivants en précisant ce qui se passe au niveau microscopique.
- Lorsque l'intensité du courant dans le fil augmente, sa température augmente.
 - Lorsque la température du fil augmente, sa résistance électrique augmente.
19. A la page précédente, on donne la caractéristique d'une lampe à incandescence. Que vaut la résistance de cette lampe lorsqu'elle est parcourue par un courant de 40 mA ? Et lorsque le courant passe à 80 mA ? Conclusion ?
20. Lorsqu'une bouilloire ohmique est branchée à une prise européenne (230V), elle absorbe une puissance électrique de 2300 W. Que vaut la puissance électrique absorbée par la bouilloire lorsqu'on la branche sur une prise américaine (110V) ?

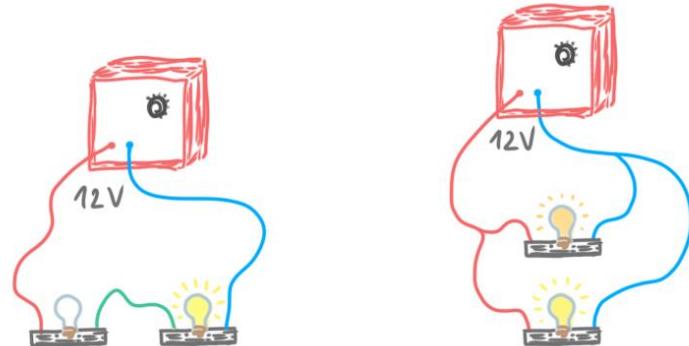
Caractéristiques $I(U)$ de diodes LED



21. On considère le graphique ci-dessus.
- Est-ce que les diodes LED sont des composantes ohmiques ? Justifier !
 - Que vaut la résistance de la diode rouge lorsqu'elle est parcourue par une intensité du courant de 5 mA ? Et pour une intensité de 20 mA ?
 - Estimer la résistance des diodes verte et bleue lorsqu'on applique une tension de 2 V.

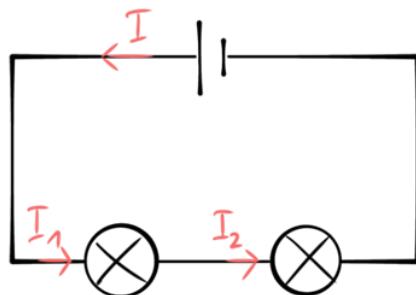
3 Circuits électriques simples

Deux lampes sont reliées à une source de tension constante de deux façons différentes : en série (gauche) et en parallèle (droite).



On constate que dans les deux cas, les lampes ne brillent pas avec le même éclat. Les paramètres électriques diffèrent en fonction du branchement. Dans la suite, nous allons étudier l'origine de ces différences.

3.1 Circuit série



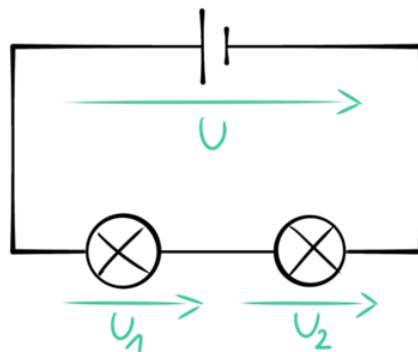
Intensité du courant électrique

Mesurons l'intensité du courant à différents endroits du circuit. Aux erreurs expérimentales près, on constate que : $I = I_1 = I_2$.

Conclusion : Dans un circuit série, l'intensité du courant a même valeur à chaque endroit.

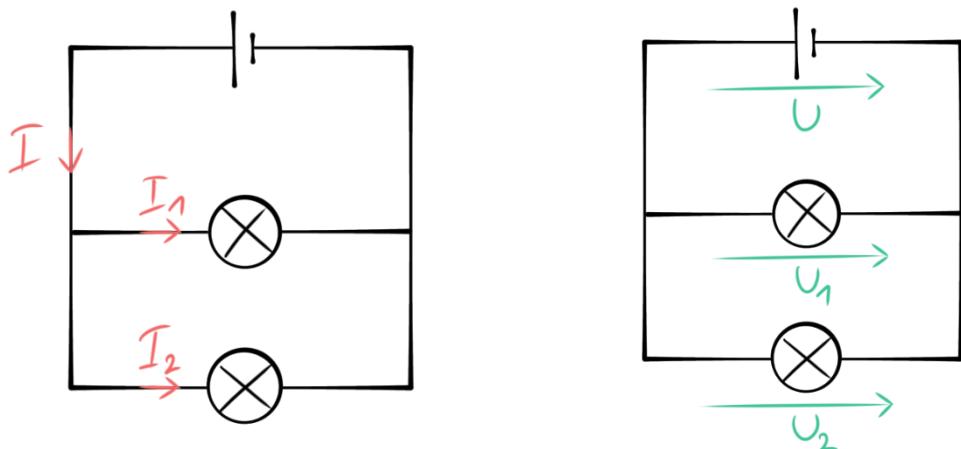
Tension électrique

Mesurons la tension électrique aux bornes des différents composants électriques. Aux erreurs expérimentales près, on constate que : $U = U_1 + U_2$.



Conclusion : La tension globale U (i.e. la tension entre les pôles de la source) est égale à la somme des tensions individuelles (i.e. la somme des tensions aux bornes des récepteurs branchés en série).

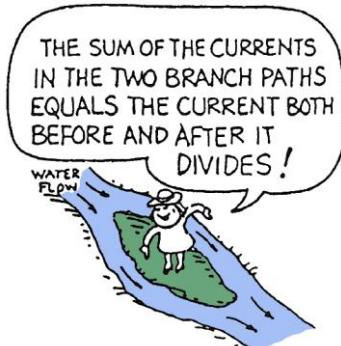
3.2 Circuit parallèle



Intensité du courant électrique

Mesurons l'intensité du courant à différents endroits du circuit. Aux erreurs expérimentales près, on constate que : $I = I_1 + I_2$.

Conclusion : La somme des intensités du courant dans chaque branche est égale à l'intensité du courant débité par la source. Les endroits où le courant se divise puis se recombine sont appelés des **nœuds**.



Tension électrique

Mesurons la tension électrique aux bornes des différents composants électriques. Aux erreurs expérimentales près, on constate que : $U = U_1 = U_2$.

On se rend compte que les bornes des trois composants sont reliées par des fils électriques dont la résistance est négligeable. En effet, on a donc mesuré trois fois la même tension électrique.

Conclusion : La tension aux bornes de deux ou plusieurs composants branchés en parallèle est identique.

3.3 Synthèse

Lois du circuit série

Loi des intensités : $I = I_1 = I_2$

Loi des tensions : $U = U_1 + U_2$

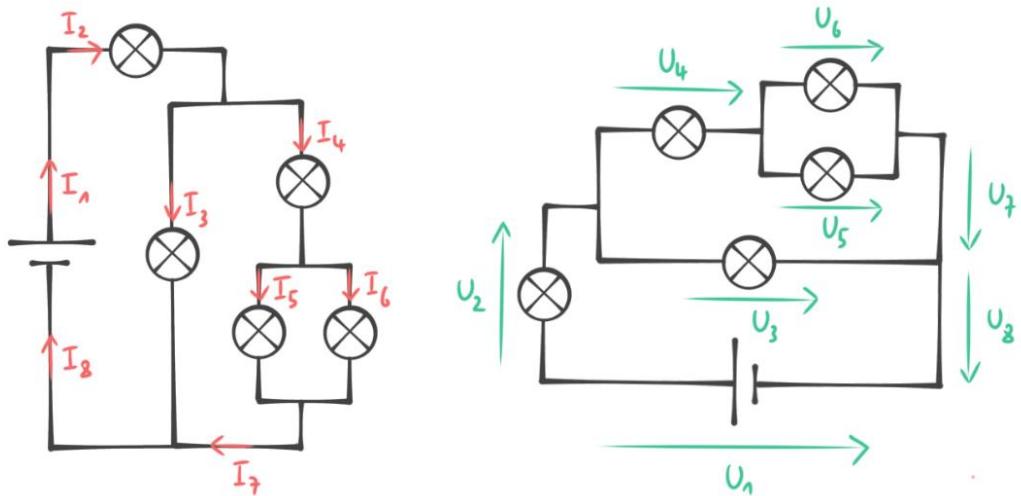
Lois du circuit parallèle

Loi des intensités : $I = I_1 + I_2$

Loi des tensions : $U = U_1 = U_2$

■ As-tu compris ?

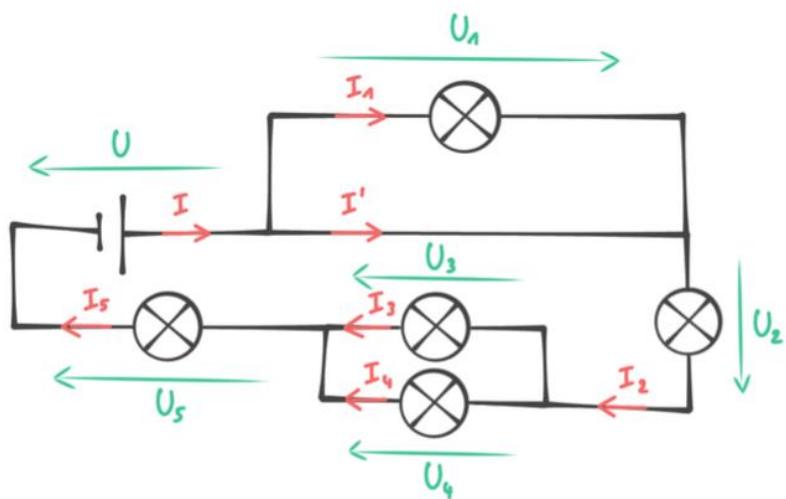
22. Déterminer les valeurs des intensités et des tensions manquantes.



$$I_1 = 2 \text{ A} ; I_4 = 1,4 \text{ A} ; I_6 = 0,8 \text{ A}$$

$$U_1 = 12 \text{ V} ; U_3 = 8 \text{ V} ; U_5 = 5 \text{ V}$$

23. $U = 9 \text{ V}$; $U_2 = 6 \text{ V}$; $U_3 = 2 \text{ V}$; $I_2 = 300 \text{ mA}$; $I_4 = 200 \text{ mA}$. Déterminer les valeurs manquantes.

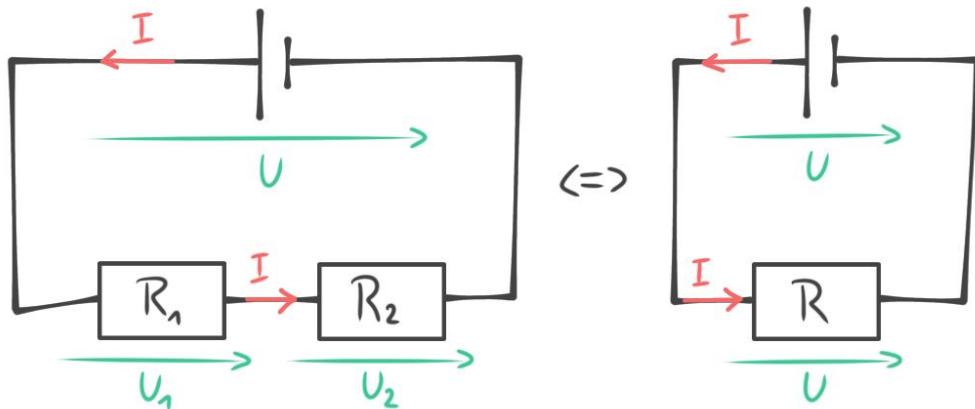


4 La résistance équivalente

Lorsque deux résistances sont branchées à une source de tension, on peut reproduire leur effet combiné grâce à une seule résistance, appelée **résistance équivalente**. L'expression de la résistance équivalente diffère selon qu'il s'agit d'un branchement en série ou d'un branchement en parallèle.

4.1 Résistances en série

Considérons le montage suivant :



On a la loi des tensions :

$$U = U_1 + U_2$$

Pour chaque résistance, on a par définition :

$$U_1 = R_1 I ; \quad U_2 = R_2 I$$

La résistance équivalente R vient remplacer les résistances R_1 et R_2 sans pour autant changer les paramètres électriques U et I . On a donc :

$$U = RI$$

En injectant (2) et (3) dans (1), on obtient :

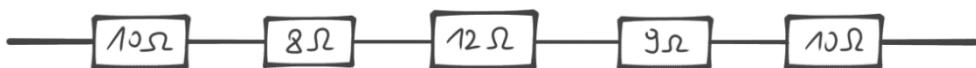
$$RI = R_1 I + R_2 I$$

et après division par $I \neq 0$, on vient d'établir la **loi des résistances en série** :

$$R = R_1 + R_2$$

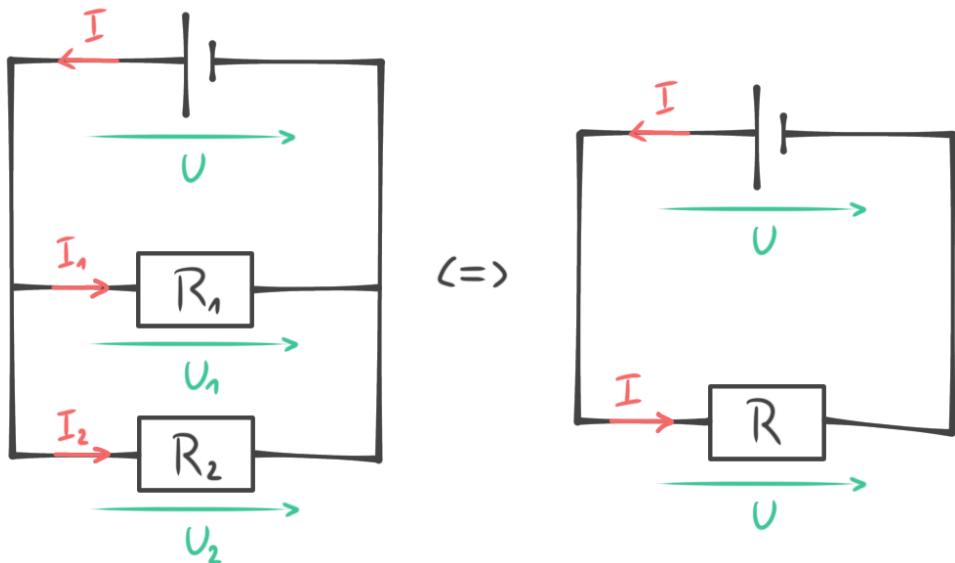
■ As-tu compris ?

24. Déterminer la résistance équivalente du montage suivant.



4.2 Résistances en parallèle

Considérons le montage suivant :



On a la loi des intensités :

$$I = I_1 + I_2$$

Pour chaque résistance, on a par définition :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad ; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

La résistance équivalente R vient remplacer les résistances R_1 et R_2 sans pour autant changer les paramètres électriques U et I . On a donc :

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

En injectant (2) et (3) dans (1), on obtient :

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

et, après division par $U \neq 0$, on vient d'établir la **loi des résistances en parallèle** :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

4.3 Applications

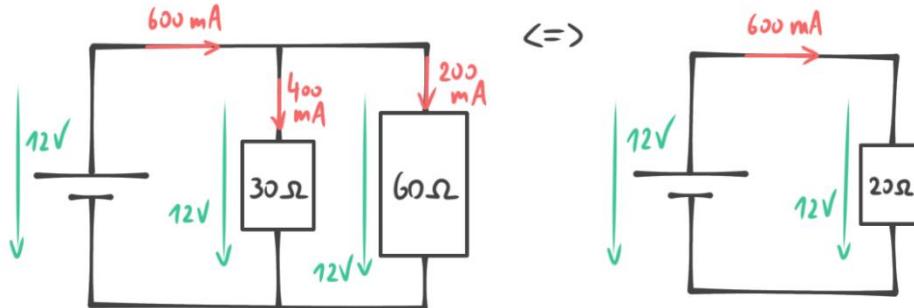
Grâce à la notion de résistance équivalente, on peut prévoir (calculer) l'intensité du courant lorsqu'on branche par exemple deux résistances en parallèle à une source de tension constante.

Données : $R_1 = 30 \Omega$; $R_2 = 60 \Omega$; $U = 12 \text{ V}$

On a :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30 \cdot 60}{30 + 60} = 20 \Omega$$

On constate que la résistance équivalente est plus petite que la plus petite des résistances branchées en parallèle. Ce constat est vrai en général, peu importe les valeurs des résistances branchées en parallèle.



L'intensité du courant dans la branche principale vaut alors :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12 \text{ V}}{20 \Omega} = 0,6 \text{ A} = 600 \text{ mA}$$

et pour chaque branche on trouve une intensité du courant de :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12 \text{ V}}{30 \Omega} = 0,4 \text{ A} = 400 \text{ mA} \quad ; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{12 \text{ V}}{60 \Omega} = 0,2 \text{ A} = 200 \text{ mA}$$

Evidemment, on retrouve bien la loi des intensités du circuit parallèle :

$$I = I_1 + I_2$$

■ As-tu compris ?

25. Expliquer l'utilité du concept de résistance équivalente.

26. Cocher les réponses correctes.

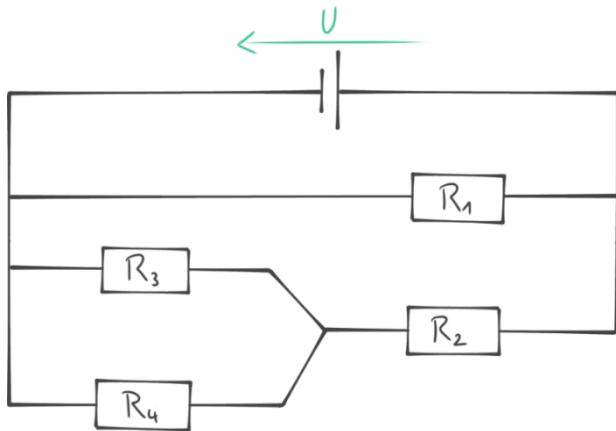
- La résistance équivalente d'un montage dépend de la façon dont les résistances sont branchées entre-elles.
- En ajoutant une résistance dans le circuit, il est possible de diminuer la résistance équivalente du montage.
- La résistance équivalente peut être négative.

27. Deux résistances $R_1 = 4\Omega$ et $R_2 = 6\Omega$ sont branchées en parallèle. On rajoute une résistance $R_3 = 3,6\Omega$ en série, puis on branche l'ensemble à une source de tension $U = 12 \text{ V}$.

- a. Faire un schéma du montage.
- b. Déterminer la résistance équivalente.
- c. Déterminer la valeur des paramètres électriques (tensions, intensités) pour les différentes branches du circuit.
- d. Calculer les puissances électriques transformées dans les résistances.
- e. Comparer la somme des puissances transformées dans les résistances à la puissance électrique fournie par la source de tension. Conclure.

28. On dispose d'un grand nombre de résistances de $10\ \Omega$. Est-il possible de les assembler de façon à obtenir une résistance équivalente de $17\ \Omega$? Justifier!

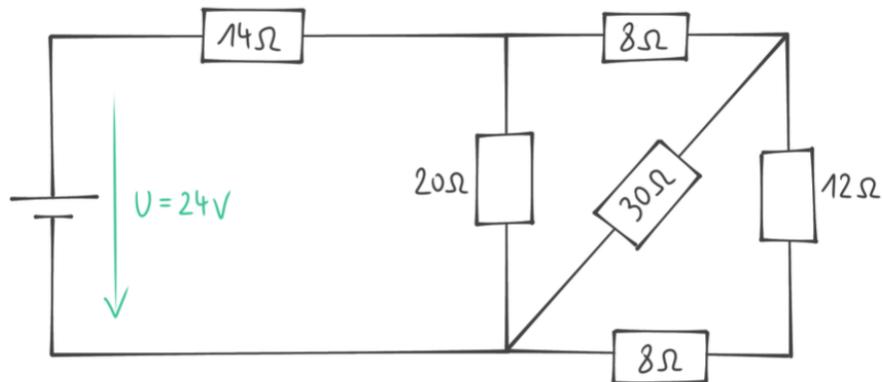
29. On considère le montage suivant avec $R_1 = 36\ \Omega$, $R_2 = 24\ \Omega$, $R_3 = 8\ \Omega$, $R_4 = 12\ \Omega$ et $U = 15V$.



a. Déterminer la valeur de la résistance équivalente.

b. Déterminer la tension aux bornes de chaque résistance ainsi que l'intensité du courant dans chaque branche du circuit.

30. On considère le montage suivant.

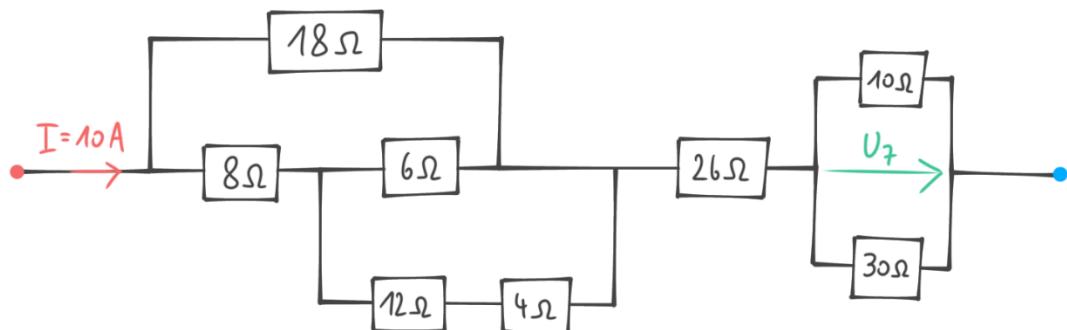


a. Refaire le schéma du montage suivant en indiquant clairement quelles résistances sont branchées en série et quelles résistances sont branchées en parallèle.

b. Calculer la valeur de la résistance équivalente.

c. Déterminer toutes les tensions et toutes les intensités du courant.

31. Déterminer la valeur de la tension U_7 .



Crédits photos et illustrations

© DD2020 / Shutterstock.com (2042688746) – **page titre (orage)**

© Laurent HILD - **p.1** (*modèle atomique*) ; **p.3** (*voltmètre*) ; **p.4** (*intensité du courant*) ; **p.4** (*ampèremètre*) ; **p.5** (*générateur – récepteur*)

© Andrei CLONTEA - **p.1** (*boules chargées*) ; **p.2** (*pile*) ; **p.3** (*intérieur d'un câble*) ; **p.3** (*circuit simple*) ; **p.4** (*sens du courant électrique*)

© Robert DROULANS - **p.2** (*représentation d'une pile*) ; **p7** (*interprétation de la résistance*) ; **p.8** (*fils électriques*) ; **p9** (*toutes*) ; **p10** (*graphique*) ; **p.11** (*caractéristiques des diodes*) ; **p12** (*toutes*) ; **p13** (*circuits électriques*) ; **p.14** (*toutes*) ; **p15** (*toutes*) ; **p16** (*circuits électriques*) ; **p.17** (*circuits électriques*) ; **p18** (*toutes*)

© VectorMine / Shutterstock.com (2093624809) – **p.7** (*loi d'Ohm*)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT, auteur de toutes les autres illustrations de ce cours. Elles ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

© EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press

Partie III

Thermodynamique



La thermodynamique est la branche de la physique consacrée à l'étude du mouvement microscopique des constituants de la matière. Le mot thermodynamique vient du grec et signifie « mouvement de la chaleur ». En effet, l'enjeu majeur de la thermodynamique est l'étude de la transformation d'énergie thermique en énergie mécanique, ce qui a permis le développement des moteurs thermiques.

Sommaire

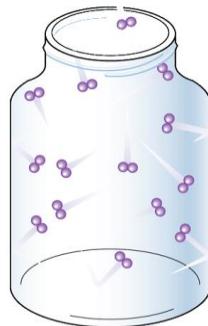
| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Énergie thermique et température | 1 |
| 1.1 | Définitions | 1 |
| 1.2 | Mesure de la température | 1 |
| 1.3 | Échelles de température | 2 |
| 2 | Chaleur | 4 |
| 2.1 | Définition | 4 |
| 2.2 | Unités de la chaleur | 4 |
| 2.3 | Équilibre thermique | 4 |
| 3 | Capacité thermique massique | 6 |
| 3.1 | Étude expérimentale | 6 |
| 3.2 | Définition | 6 |
| 3.3 | Phénomènes naturels | 7 |
| 4 | Dilatation thermique | 9 |
| 4.1 | Dilatation et contraction | 9 |
| 4.2 | Coefficient de dilatation thermique | 9 |
| 4.2.1 | Solides de forme allongée | 9 |
| 4.2.2 | Liquides | 10 |
| 4.2.3 | Phénomène naturel : Les anomalies de l'eau | 10 |
| 5 | Modes de transferts thermiques | 15 |
| 5.1 | Conduction | 15 |
| 5.2 | Convection | 16 |
| 5.3 | Rayonnement | 18 |
| 5.3.1 | Emission | 18 |
| 5.3.2 | Absorption | 20 |
| 5.3.3 | Réflexion | 20 |
| 5.3.4 | Phénomène naturel : L'effet de serre | 21 |
| 5.4 | Isolation thermique | 22 |

1 Énergie thermique et température

1.1 Définitions

Toute la matière (solides, liquides et gaz) est composée d'atomes et de molécules qui s'agitent en permanence et possèdent ainsi de l'énergie cinétique. L'énergie cinétique totale de tous ces corpuscules microscopiques d'un système constitue son énergie thermique¹.

L'énergie thermique d'un système est l'énergie cinétique (microscopique) totale due à l'agitation de ses corpuscules.



L'énergie cinétique moyenne des corpuscules d'un corps provoque un effet mesurable : la température du corps. Une augmentation de la température d'un corps équivaut à une augmentation de l'agitation microscopique de ses corpuscules.

La température d'un corps est une mesure pour l'énergie cinétique moyenne de ses corpuscules.

Plus cette énergie cinétique moyenne est grande, plus la température du corps est élevée.

Attention

Il faut bien faire la distinction entre la température d'un corps et son énergie thermique :

- L'énergie thermique dans deux litres d'eau en ébullition est deux fois plus grande que celle dans un seul litre d'eau en ébullition. Cependant, leurs températures sont les mêmes parce que l'énergie cinétique moyenne de leurs molécules est identique.
- La température des étincelles d'un cierge magique est très grande, aux alentours de 1500°C. Cette température correspond à une très grande énergie cinétique moyenne des corpuscules. Or, comme il y a peu de corpuscules dans une étincelle, son énergie thermique reste assez faible. Voilà pourquoi les étincelles ne provoquent pas de graves brûlures lorsque l'énergie thermique de l'étincelle est absorbée par notre peau.



1.2 Mesure de la température

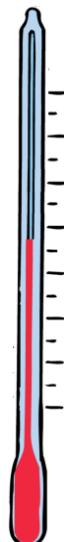
Notre peau n'est pas un indicateur précis de température. Notre sens du toucher nous permet de distinguer approximativement des températures entre 15°C et 45°C. C'est autour de la température corporelle (37°C) que notre peau est la plus sensible. En effet, on peut sentir avec la main si une personne a de la fièvre. Lorsqu'on touche des corps solides dont les températures sont au-delà de 60°C ou en dessous de -30°C, la peau est endommagée et l'on ressent de la douleur.



Pour mesurer des températures de manière précise on utilise un **thermomètre**. Toute grandeur physique qui varie avec la température en peut servir de base :

¹ Outre cette énergie thermique, les corpuscules possèdent de l'énergie potentielle en raison des interactions entre les corpuscules (électrique, nucléaire, ...).

- Dans un **thermomètre à dilatation**, le volume d'un liquide (du mercure ou de l'alcool coloré) dans le réservoir varie avec la température. Le liquide se dilate lorsque sa température augmente et se contracte lorsque sa température diminue. Une fois calibrée, l'échelle le long du tube de verre permet de lire la température correspondante.²
- Le **thermomètre à résistance** utilise l'influence de la température sur la résistance électrique d'un fil métallique (ou d'un semi-conducteur).
- Le **thermomètre de Galilée** utilise l'influence de la température sur la masse volumique de substances.
- Le **thermomètre infrarouge** utilise l'influence de la température d'un corps sur le rayonnement thermique qu'il émet. (voir page 19)



1.3 Échelles de température

| | Celsius ³ | Fahrenheit ⁴ | Kelvin ⁵ |
|--|----------------------|-------------------------|---------------------|
| Symbole usuel | θ | t_F | T |
| Unité | °C | °F | K |
| Températures de solidification et d'ébullition de l'eau (à pression atmosphérique normale) | 0 °C et 100 °C | 32 °F et 212 °F | 273 K et 373 K |

L'échelle Kelvin est l'échelle de température absolue, utilisée dans le domaine scientifique. Alors qu'il ne semble pas y avoir de limite supérieure de la température, il existe bien une limite inférieure. Lorsque l'agitation thermique des corpuscules d'un corps diminue, sa température baisse. Dans l'échelle Kelvin, le nombre 0 est associé à la température la plus basse qui puisse exister – le **zéro absolu**. Au zéro absolu, les corpuscules d'une substance sont tous au repos. Il n'est alors plus possible de réduire davantage la température du corps. La température minimale de 0 K (zéro kelvin) correspond à -273,15 °C. Contrairement à l'échelle Celsius, l'échelle Kelvin ne contient pas de nombres négatifs. Les intervalles entre les unités sur l'échelle Kelvin et l'échelle Celsius sont toutefois identiques. Ainsi, la glace fond à 0°C, soit 273 K, et l'eau bout à 100°C, soit 373 K.

Conversion des unités de température :

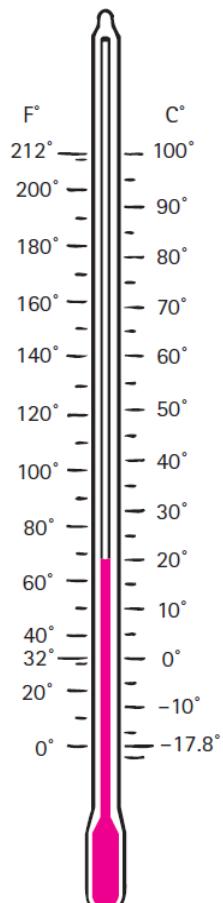
$$t_F = 1,8 \cdot \theta + 32 \Leftrightarrow \theta = \frac{t_F - 32}{1,8}$$

$$T = \theta + 273 \Leftrightarrow \theta = T - 273$$

Exemple

En été, une température de $t_F = 95^{\circ}F$ correspond à

$$\theta = \frac{95 - 32}{1,8} = 35^{\circ}C$$

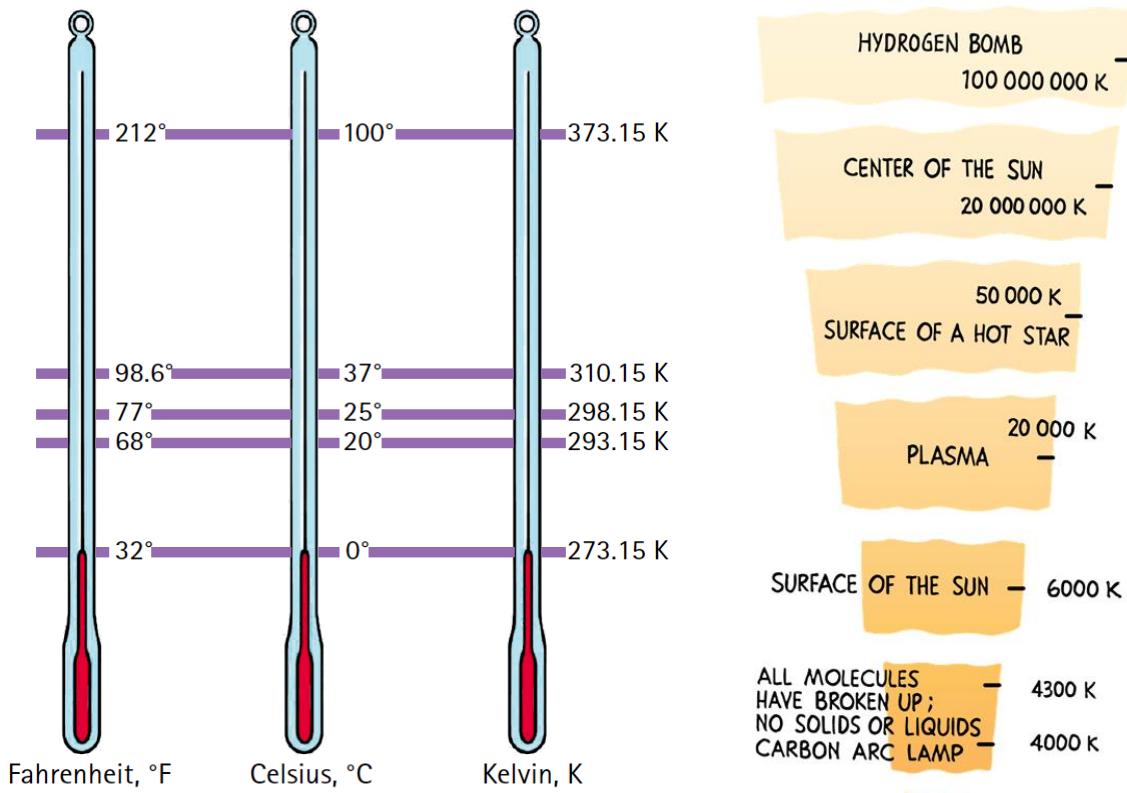


² Le premier thermomètre à dilatation fut inventé par Galilée en 1602. Le liquide utilisé était le mercure.

³ L'échelle Celsius, nommée en l'honneur de Anders Celsius (18^e siècle), est l'échelle de température la plus courante.

⁴ L'échelle Fahrenheit, nommée en l'honneur de Gabriel Daniel Fahrenheit (18^e siècle), est utilisée aux États-Unis.

⁵ L'échelle Kelvin, nommée en l'honneur de William Thomson, appelé Lord Kelvin (19^e siècle), est utilisée en sciences.



As-tu compris ?

1. Dans des laboratoires, les physiciens utilisent souvent des thermomètres à gaz. Que varie avec la température dans un thermomètre à gaz ?
2. Quelles sont les températures de solidification et d'ébullition de l'eau dans
 - a. l'échelle Celsius ?
 - b. l'échelle Kelvin ?
3. Qu'est-ce qui représente la plus grande variation de température ?
 - Une augmentation d'un degré Celsius.
 - Une augmentation d'un degré Fahrenheit.
 - Identique pour les deux.
4. Qu'est-ce qui représente la plus grande variation de température ?
 - Une augmentation d'un degré Celsius.
 - Une augmentation d'un kelvin.
 - Identique pour les deux.
5. Vrai ou faux ? « Dans un verre d'eau, toutes les molécules d'eau ont la même vitesse. »
6. Qui possède plus d'énergie cinétique moyenne ? Justifier.
 - Les molécules H_2O dans un gramme d'eau glacée.
 - Les molécules H_2O dans un gramme de vapeur d'eau.
7. Convertir les unités de température en utilisant les formules :

$$30^\circ C = \dots^\circ F \quad ; \quad 451^\circ F = \dots^\circ C \quad ; \quad 0^\circ C = \dots^\circ F$$

$$300 K = \dots^\circ C \quad ; \quad 90^\circ F = \dots K \quad ; \quad 500,3 K = \dots^\circ C$$

2 Chaleur

2.1 Définition

Au 18^e siècle, on pensait que la chaleur était un fluide invisible, appelé fluide calorique, qu'on imaginait couler du corps chaud vers le corps froid. Dans les années 1840, James Joule a découvert que la chaleur est en réalité un transfert d'énergie thermique.

La **chaleur Q** est l'énergie thermique transférée entre deux corps en contact, à cause de leur différence de température. La chaleur se propage spontanément du corps plus chaud vers le corps plus froid.

- Lorsqu'on touche une tasse chaude, de l'énergie thermique est transférée de la tasse à la main parce que la tasse est plus chaude que la main.
- Lorsqu'on touche de la glace, de l'énergie thermique est transférée de la main à la glace parce que la glace est plus froide que la main.

Un corps ne contient pas de la chaleur. Si un corps cède de la chaleur, son énergie thermique diminue. En revanche, si un corps reçoit de la chaleur, son énergie thermique augmente⁶.

2.2 Unités de la chaleur

Puisque la chaleur est de l'énergie thermique transférée, elle est exprimée en **joules (J)**. Une autre unité courante de la chaleur (et de l'énergie en général) est la **calorie**.

Une **calorie** est la chaleur qu'il faut fournir à 1 g d'eau pour augmenter sa température de 1°C.

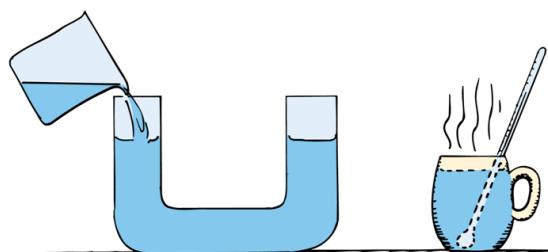
$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

Les données énergétiques des aliments sont déterminées en mesurant l'énergie libérée lorsqu'ils sont brûlés. Lors de la digestion, notre métabolisme « brûle » les aliments, ce qui libère l'énergie chimique qu'ils contiennent. L'unité de chaleur indiquée sur les paquets des aliments est en général la **kilocalorie** (1 kcal = 1000 cal = 4186 J). C'est la chaleur nécessaire pour chauffer la température de 1 kg d'eau de 1°C. Par exemple, une cacahuète qui « contient » 10 kcal libère 10000 cal (ou 41860 J) d'énergie lorsqu'elle est digérée.



2.3 Équilibre thermique

Lorsque l'eau a atteint le même niveau dans des vases communicants, le flux d'eau s'arrête. Similairement, lorsque des corps en contact ont atteint la même température, il n'y a plus de propagation de chaleur entre ces corps. On dit qu'ils sont en équilibre thermique.



Des corps en contact sont en **équilibre thermique** lorsqu'ils ont la même température.

Pour lire un thermomètre, il faut attendre qu'il soit en équilibre thermique avec la substance dont il mesure la température. Un thermomètre doit être mince pour qu'il ne change pas (de manière significative) la température que l'on veut mesurer.

⁶ Le travail est également un mode de transfert d'énergie. Un corps ne contient pas de travail ; il peut seulement fournir ou recevoir du travail.

■ As-tu compris ?

8. Dans une salle se trouvent une table, des chaises et des personnes. Lesquels de ces corps ont une température inférieure / supérieure / égale à la température de l'air ?
9. Une amie affirme que les molécules dans un mélange de gaz en équilibre thermique ont la même énergie cinétique moyenne. Es-tu d'accord ? Justifier.
10. Un autre ami affirme que les molécules de dihydrogène et d'azote dans un mélange gazeux en équilibre thermique ont la même vitesse moyenne. Es-tu d'accord ? Justifier.
11. Pourquoi ne peut-on pas déterminer si on est fiévreux en touchant son propre front ?
12. Lorsque tu touches une surface froide,
 - le froid se propage de la surface vers ta main.
 - la chaleur se propage de ta main vers la surface froide.
13. Quelle est la différence entre la calorie et le joule ?
14. Quelle unité d'énergie est la plus petite ?
 - A. le joule
 - B. la cal
 - C. la kcal
15. Expliquer en une phrase la signification de la valeur énergétique que l'on peut lire sur l'étiquetage alimentaire du paquet de chips (photo).



16. Une bille très rapide heurte un amas de billes lentes.
 - a. La bille rapide a-t-elle tendance à gagner ou perdre de la vitesse lors des chocs ?
 - b. Qui gagne en énergie cinétique lors des chocs - la bille rapide ou les billes lentes ?
 - c. Quel est le lien entre ces questions et la propagation de la chaleur ?
17. Deux chocolats chauds, l'un à 50°C et l'autre à 60 °C, sont mélangés dans un bol. Que peut-on dire de la température du mélange ? Justifier.
18. Vrai ou faux ? Justifier.
« La température se propage du corps chaud vers le corps froid. »
19. Pourquoi peut-on dire qu'un thermomètre mesure sa propre température ?

3 Capacité thermique massique

Certaines substances gardent mieux leur température d'autres. Cuite, une tomate est souvent encore trop chaude pour manger, alors que la purée ne l'est plus. Une feuille d'aluminium peut être retirée d'un plat qui sort du four, mais on se brûle les doigts en touchant le plat. Inversement, un objet métallique chauffe plus vite au soleil qu'un morceau de bois.

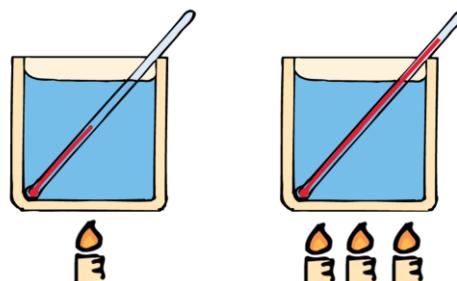


La calorimétrie est l'étude de la relation entre la quantité de chaleur reçue ou cédée par un corps et sa variation de température.

3.1 Étude expérimentale

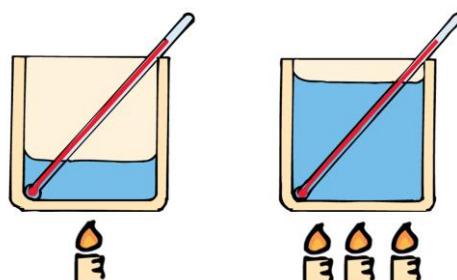
- a. La variation de température d'une substance donnée (p.ex. 1 kg d'eau) est proportionnelle à la quantité de chaleur reçue ou cédée :

$$\Delta T \sim Q \quad (m = \text{const})$$



- b. Pour une variation de température donnée (p.ex. 10 °C), la quantité de chaleur qu'une substance doit recevoir ou céder est proportionnelle à sa masse :

$$Q \sim m \quad (\Delta T = \text{const})$$



Synthèse : $Q \sim m \cdot \Delta T$ et donc $Q = \text{constante} \cdot m \cdot \Delta T$

La constante de proportionnalité, notée c , est appelée capacité thermique massique de la substance. Elle dépend de la composition chimique de la substance et de son état d'agrégation.

3.2 Définition

La **capacité thermique massique c** d'une substance indique la quantité de chaleur reçue ou cédé par 1 kg de cette substance lors d'une variation de sa température de 1 K (ou 1 °C) :

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

L'unité SI de la capacité thermique massique est le $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.⁷

En mécanique, l'inertie d'un corps est sa tendance à s'opposer à un changement de son état de mouvement. En thermodynamique, la capacité thermique massique d'une substance est son inertie thermique, c'est-à-dire sa tendance à s'opposer à un changement de température.

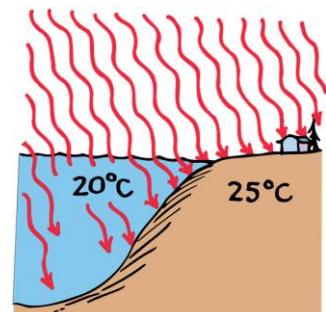
L'eau absorbe plus de chaleur par unité de masse que le fer pour une même variation de température. À cause de sa très grande capacité thermique massique (4186 $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$), l'eau est utilisée dans les systèmes de refroidissement des voitures et des machines.

⁷ Puisqu'une variation de température de 1 K est identique à une variation de 1 °C, on peut également utiliser l'unité $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$.

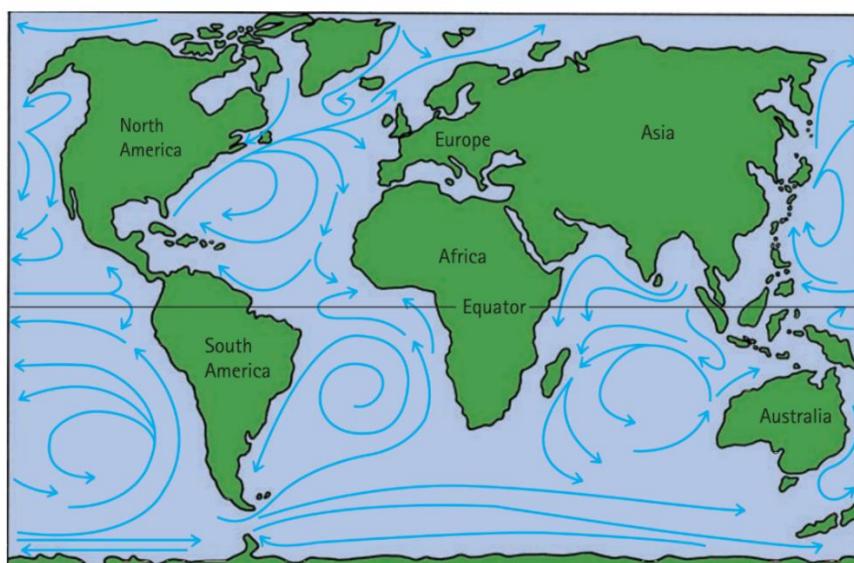
| Substance | c ($\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$) | Substance | c ($\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$) |
|-----------|---|---------------|---|
| Or | 130 | Air | 1010 |
| Plomb | 130 | Polystyrène | 1500 |
| Argent | 240 | Huile d'olive | 1970 |
| Cuivre | 380 | Ethanol | 2460 |
| Fer | 450 | Lait | 3900 |
| Sable | 840 | Eau | 4186 |
| Aluminium | 890 | Dihydrogène | 14320 |

3.3 Phénomènes naturels

- Il faut considérablement plus d'énergie solaire pour chauffer l'eau de mer que le sable sur la plage. En effet, due à la transparence de l'eau, l'énergie solaire reçue est diluée sur une couche d'eau de plusieurs mètres, alors qu'elle est concentrée en une fine couche de sable. La masse d'eau chauffée est donc beaucoup plus grande que la masse de sable. En outre, l'eau a une capacité thermique massique plus grande que le sable. Voilà pourquoi la température du sable augmente rapidement lors d'une journée ensoleillée en été, alors que l'eau garde une température quasiment constante.

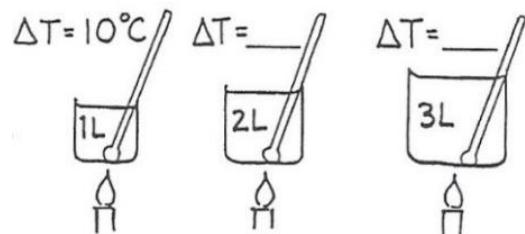


- La grande capacité thermique massique de l'eau a une forte influence sur le climat. Situés à une latitude similaire, l'Europe et le Canada reçoivent à peu près la même quantité d'énergie solaire par kilomètre-carré. Or, la température moyenne au Canada est nettement plus basse que celle en Europe. Le Gulf Stream apporte de l'eau chaude en direction nord-est depuis les Caraïbes. Grâce à sa grande capacité thermique massique, l'eau conserve une grande partie de son énergie thermique avant de se refroidir aux côtes atlantiques de l'Europe. L'énergie thermique transférée de l'eau à l'air est transportée par les vents d'ouest dominants vers le continent européen.



■ As-tu compris ?

20. On fournit de la chaleur à 1 L d'eau et sa température augmente de 10°C . On fournit la même quantité de chaleur à 2 L, puis à 3 L d'eau. Indiquer les températures finales sur la figure.



21. Une même quantité de chaleur est fournie à un kilogramme d'eau et un kilogramme de fer. Lequel des deux va montrer la plus grande variation de température ? Justifier.

22. Si l'eau avait une capacité thermique massique plus petite...

- les lacs gèleraient-ils plus vite ou moins vite ?
- pourrait-on profiter plus ou moins longtemps d'un bain chaud ?

23. Un clou et une poêle en fer sont retirés d'un même four chaud et sont immédiatement plongés dans des récipients contenant un volume identique d'eau (à la même température). Lequel des deux objets va augmenter davantage la température de l'eau ? Justifier.

24. Pourquoi un melon reste-il frais longtemps lorsqu'il est sorti d'une glacière en été ?

25. Pour garder les pieds chauds, on peut glisser un objet chaud sous la couverture du lit. Qu'est-ce qui procure plus de chaleur ?

- une brique en fer de 10 kg
- une bouteille de 10 kg d'eau chaude (à la même température)

26. Dans quel cas l'affirmation suivante est-elle correcte ?

« Si un corps chaud est en contact avec un corps froid, l'augmentation de la température du corps froid est égale à la diminution de la température du corps chaud. »

27. Une masse de 1 kg de fer incandescent est plongée dans 1 L d'eau froide. Vrai ou faux ? Justifier.

[Ne pas tenir compte de l'énergie thermique transférée au récipient et à l'air.]



- L'augmentation de la température de l'eau est égale à la diminution de la température du fer.
- La quantité de chaleur reçue par l'eau est égale à la quantité de chaleur perdue par le fer.
- Le fer et l'eau vont avoir la même température finale.
- La température finale du fer et de l'eau est comprise entre les températures initiales des deux.

28. Un seau contient 1 L d'eau à 20°C .

- Quelle va être la température finale du mélange si on ajoute 1 L d'eau à 40°C ?
- Si on ajoute 2 L d'eau à 40°C , la température du mélange sera-t-elle plus grande ou plus petite que 30°C ?

29. Pourquoi la température sur les îles entourées par de grandes quantités d'eau (p.ex. Hawaï) est-elle plus ou moins constante tout au long de l'année ?



4 Dilatation thermique

4.1 Dilatation et contraction

Lorsque la température d'une substance augmente, l'augmentation de l'agitation thermique de ses corpuscules tend à les écarter davantage. Hormis quelques rares exceptions, les substances se dilatent lorsqu'elles sont chauffées et se contractent lorsqu'elles sont refroidies. En général :

Les gaz se dilatent et se contractent beaucoup plus que les liquides.

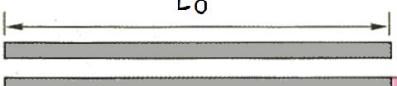
Les liquides se dilatent et se contractent plus que les solides.

Par exemple, le liquide dans un thermomètre à dilatation se dilate davantage que le verre du tube et du réservoir. Voilà pourquoi le liquide monte dans le tube lorsque le thermomètre est chauffé.

4.2 Coefficient de dilatation thermique

4.2.1 Solides de forme allongée

La dilatation de **solides** de forme allongée se manifeste principalement par une variation de leur longueur. Lorsque la température d'un solide augmente, son allongement ΔL est proportionnel à sa variation de température ΔT et proportionnelle à sa longueur initiale L_0 . La constante de proportionnalité, notée α , est appelée **coefficients de dilatation linéaire**.

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$




L'unité du coefficient de dilatation linéaire est le K^{-1} . Une unité plus pratique est le $\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ (ou $\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$).

Pour le cuivre, $\alpha = 0,017 \frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot \text{K}}$. Une barre de cuivre de longueur 1 m dont la température augmente de 1 K s'allonge donc de 0,017 mm.

| Matériau | α (en $\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot \text{K}}$) | Matériau | α (en $\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot \text{K}}$) |
|-------------|--|-----------|--|
| Verre usuel | 0,009 | Cuivre | 0,017 |
| Acier | 0,012 | Laiton | 0,018 |
| Béton | 0,012 | Argent | 0,020 |
| Fer | 0,012 | Aluminium | 0,024 |
| Nickel | 0,013 | Etain | 0,027 |
| Or | 0,014 | Plomb | 0,029 |

Exemples

- Des températures extrêmes en été font dilater les rails de chemin de fer. Pour éviter la déformation des rails (voir photo), il faut les poser pendant les jours d'été les plus chauds. De même, des températures très froides en hiver font contracter les rails.
- Les ponts en acier ont des joints de dilatation aux extrémités qui permettent au pont de se dilater en été et de se contracter en hiver.
- Un bilame est formé de deux lames de métaux différents (p. ex. du fer et du laiton) soudées sur toute la longueur. Lorsque le bilame est chauffé, la lame en laiton se dilate davantage que la lame

en fer parce que le coefficient de dilatation du laiton est supérieur à celui du fer. Le bilame se courbe vers le côté du fer. Lorsque le bilame est refroidi, sa courbure est dans l'autre sens car le laiton se contracte davantage que le fer.



Le principe d'un bilame peut être utilisé pour faire tourner une aiguille d'un thermomètre ou pour opérer un thermostat (système qui permet de régler la température). On les trouve par exemple dans les fours, les réfrigérateurs, les grille-pains ou les fers à repasser.



- Lorsqu'on veut assembler différents matériaux, il est important de connaître leur comportement face à des variations de température. Des dilatations différentes donnent lieu à des forces qui peuvent détruire l'assemblage. Ainsi, les dentistes utilisent des matériaux de plombage dont le coefficient de dilatation est similaire à celui des dents. Le béton armé (béton coulé autour d'une armature en acier) peut être utilisé comme matériau de construction parce que l'acier a le même coefficient de dilatation que le béton.

4.2.2 Liquides

La variation de volume ΔV d'un liquide est proportionnelle à la variation de température ΔT et proportionnelle au volume initial V_0 . La constante de proportionnalité, notée γ , est appelée coefficient de dilatation volumique.

$$\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$$

L'unité du coefficient de dilatation volumique est le K^{-1} . Une unité plus pratique est le $\frac{\text{cm}^3}{\text{L}\cdot\text{K}}$ (ou $\frac{\text{cm}^3}{\text{L}\cdot^\circ\text{C}}$).

Pour l'alcool, $\gamma = 1,1 \frac{\text{cm}^3}{\text{L}\cdot\text{K}}$. Un litre d'alcool dont la température augmente de 1 K se dilate de 1,1 ml.

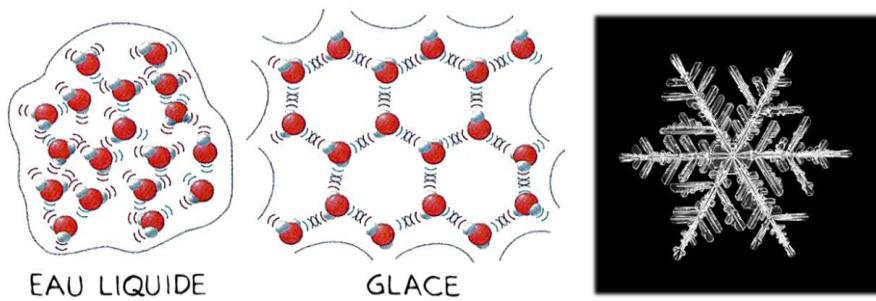
| Liquide | γ (en $\frac{\text{cm}^3}{\text{L}\cdot\text{K}}$) |
|---------|--|
| Mercure | 0,18 |
| Eau | 0,21 |
| Alcool | 1,1 |
| Essence | 1,06 |



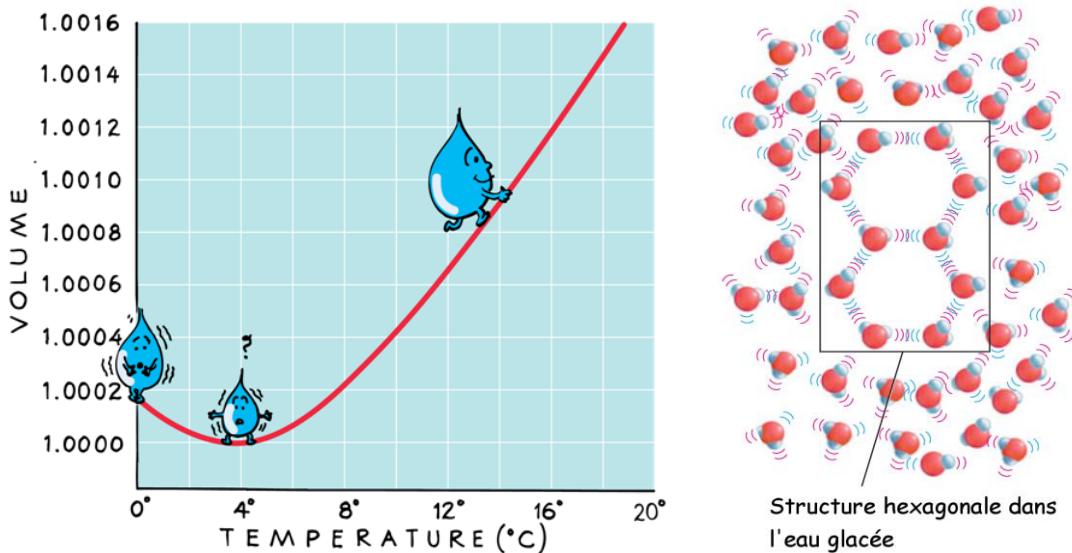
4.2.3 Phénomène naturel : Les anomalies de l'eau

- Contrairement aux autres liquides qui se contractent en se solidifiant, l'eau se dilate en devenant de la glace. 1 L d'eau à 0°C devient en effet 1,1 L de glace de 0°C. La glace a donc une masse volumique plus petite que l'eau liquide. Voilà pourquoi la glace flotte à la surface de l'eau. Cette anomalie de l'eau est due à la structure microscopique de la glace. À cause de la forme des molécules H_2O et de la forte cohésion entre ces molécules à certains angles (ponts H), la glace est constituée de structures hexagonales où les molécules H_2O occupent un volume plus grand que dans l'eau liquide⁸.

⁸ La structure hexagonale d'un flacon de neige, formé à partir de la vapeur d'eau, est une conséquence des structures hexagonales des molécules H_2O de la glace.

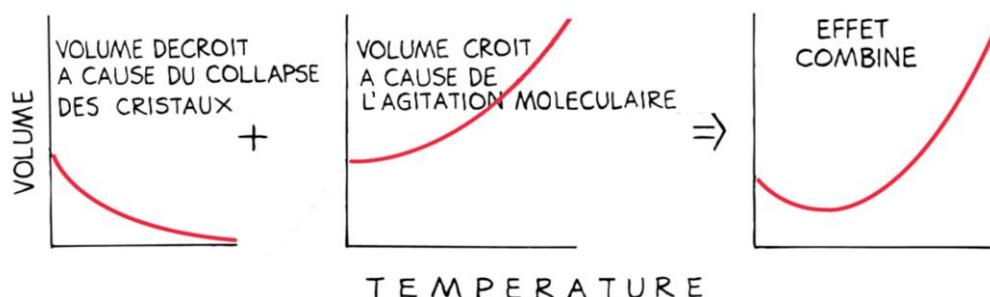


- Comme la grande majorité des substances, l'eau liquide se dilate en chauffant et se contracte en se refroidissant. Toutefois, entre 0°C et 4°C, l'eau se contracte ! Ce n'est qu'à partir de 4°C que l'eau chauffée commence à se dilater. L'eau a donc un volume minimal (et une masse volumique maximale) à 4°C. Ce comportement atypique de l'eau entre 0°C et 4°C est une deuxième anomalie.



Explication

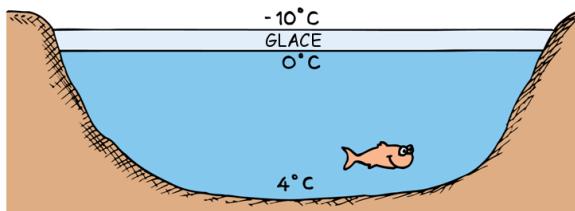
Dans l'eau glacée, certaines structures hexagonales persistent. À mesure que la température augmente, de plus en plus de structures s'effondrent ce qui provoque une diminution du volume de l'eau. En parallèle, l'augmentation de la température provoque une augmentation de l'agitation moléculaire et donc un effet de dilatation. Ces deux effets combinés font que la masse volumique de l'eau est maximale à 4°C.



Les anomalies de l'eau jouent un rôle très important dans la nature :

- Le fait que l'eau se dilate en se solidifiant contribue à la désagrégation des roches. Chaque rocher est parsemé de minuscules crevasses dans lesquelles l'eau de pluie peut pénétrer. En hiver, lorsque l'eau gèle et se dilate, ces crevasses s'élargissent. Au cours des millénaires, les eaux pluviales ont ainsi contribué à casser les rochers en petites pierres.

- Le refroidissement des eaux stagnantes a lieu en surface. Même par temps très froid, l'eau des lacs reste liquide sous une couche de glace qui s'épaissit au cours de l'hiver. L'eau est disposée en couches de températures : au contact immédiat de la glace, l'eau a une température de 0°C. Au fur et à mesure que la profondeur augmente, la température augmente et atteint 4°C au bout de quelques mètres.



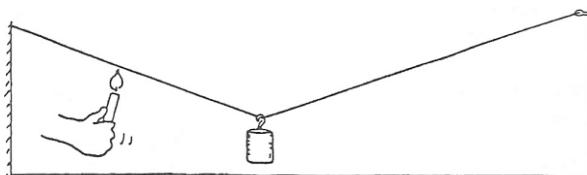
Les anomalies de l'eau permettent d'expliquer la formation de ces couches de températures. Lorsque la température de l'air chute en début d'hiver, l'eau superficielle des lacs se refroidit. Lorsqu'elle atteint une température inférieure à celle des couches plus profondes, elle descend vers le fond, tandis que l'eau du fond – plus chaude et de masse volumique plus petite – remonte en surface. Ce brassage de l'eau continue jusqu'à ce que la température de toute l'eau du lac est de 4°C. Si l'eau à la surface continue encore à refroidir, sa masse volumique diminue, et cette eau plus froide ne descend plus vers le fond. Elle flotte sur l'eau de 4°C. La température de l'eau diminue donc seulement à la surface et c'est ici, à 0°C, que se forme la glace. Un lac gèle donc toujours du haut vers le bas. Au fond du lac, la vie aquatique peut subsister dans l'eau liquide.

Des lacs très profonds ne sont jamais couverts de glace, même lors des hivers les plus rudes. Toute l'eau du lac doit être refroidie à 4°C avant qu'elle ne puisse atteindre des températures plus basses, et les hivers ne durent simplement pas assez longtemps. À cause de la grande capacité thermique massique et la mauvaise conductivité thermique de l'eau, la température au fond des lacs profonds dans les régions froides en hiver vaut 4°C durant toute l'année.

■ As-tu compris ?

30. Une masse est suspendue à un fil de cuivre.

Que se passe-t-il avec la hauteur de suspension de la masse marquée lorsque le fil est chauffé ? Justifier.



31. Pourquoi les matériaux se dilatent-ils si leur température augmente ?

32. Dans les greniers on peut souvent entendre le craquement des charpentes en bois lors d'une nuit froide. Pourquoi ?

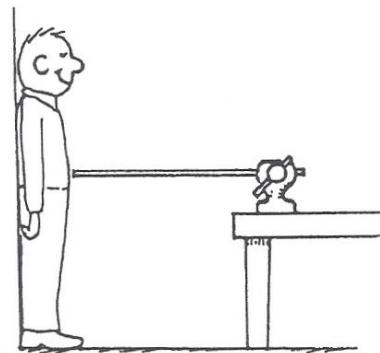
33. Supposons qu'une tige en laiton de 1,0 m se dilate de 0,5 cm lorsque sa température est augmentée d'une certaine valeur. De combien va se dilater une tige en laiton de 100 m si elle subit la même variation de température ?

34. Un tube de chauffage en cuivre a une longueur de 6 m à 20°C. L'eau chaude fait augmenter sa température à 70°C. Calculer l'allongement du tube.

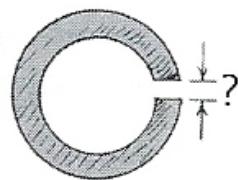
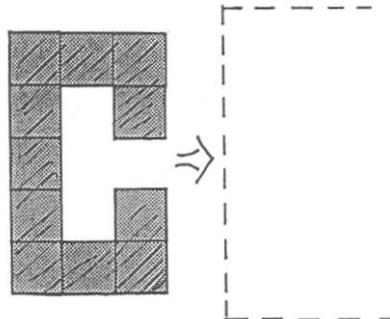
35. On mesure deux fois le joint de dilatation d'un pont en béton armé. La première mesure est prise en été, à 30°C (largeur du joint : 48 mm). La deuxième mesure est prise en hiver, à -10°C (largeur du joint : 72 mm). Calculer la longueur de ce pont.

36. Le coefficient de dilatation de l'acier vaut environ $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

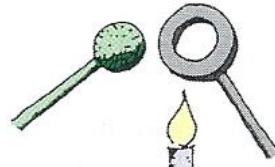
- De combien se dilate une tige en acier de 1 mètre lorsque sa température augmente de 10°C ?
- De combien se dilate une tige en acier de 1 kilomètre lorsque sa température augmente de 10°C ?
- La poutre principale en acier de la *Golden Gate Bridge* mesure 1,3 km. Calculer l'allongement de la poutre si la température augmente de 15°C .
- La tour Eiffel a une hauteur de 298 m. Lors d'une nuit froide en hiver elle est plus petite que lors d'une chaude journée d'été. Calculer la différence de hauteur pour une variation de température de 30°C .



37. On coupe une petite fente dans un anneau métallique. Si l'anneau est chauffé, la fente devient-elle plus grande ou plus petite ? [Supposer que l'anneau est constitué de 11 blocs - si les blocs sont chauffés individuellement, chacun devient un peu plus grand. Faire un croquis des blocs chauffés.]



38. Une boule métallique passe tout juste à travers un anneau en métal. Lorsque la boule est chauffée, elle se dilate et ne passe plus à travers l'anneau. Est-ce que le fait de chauffer l'anneau permet à la boule de passer de nouveau à travers l'anneau ? Expliquer.

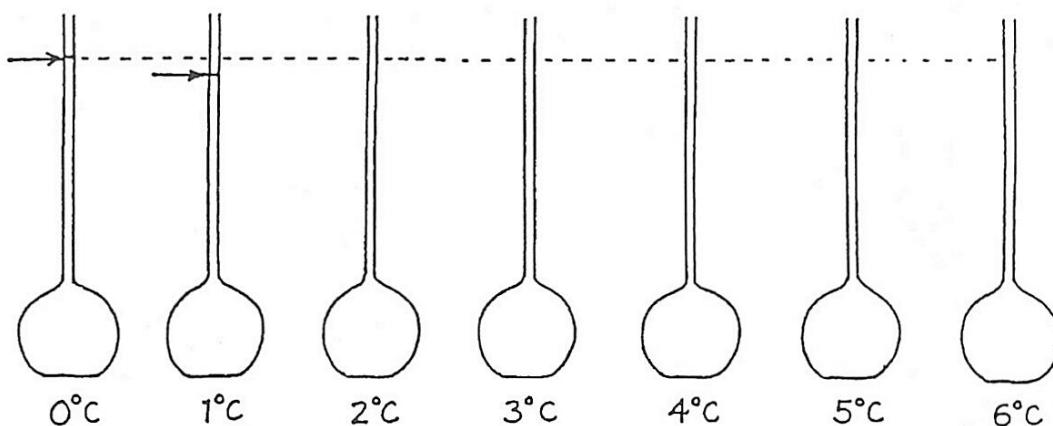


39. Lorsqu'un mécanicien glisse rapidement un anneau de fer très chaud au-dessus d'un cylindre de laiton très froid, on n'arrive plus à les séparer sans les endommager. Expliquer.



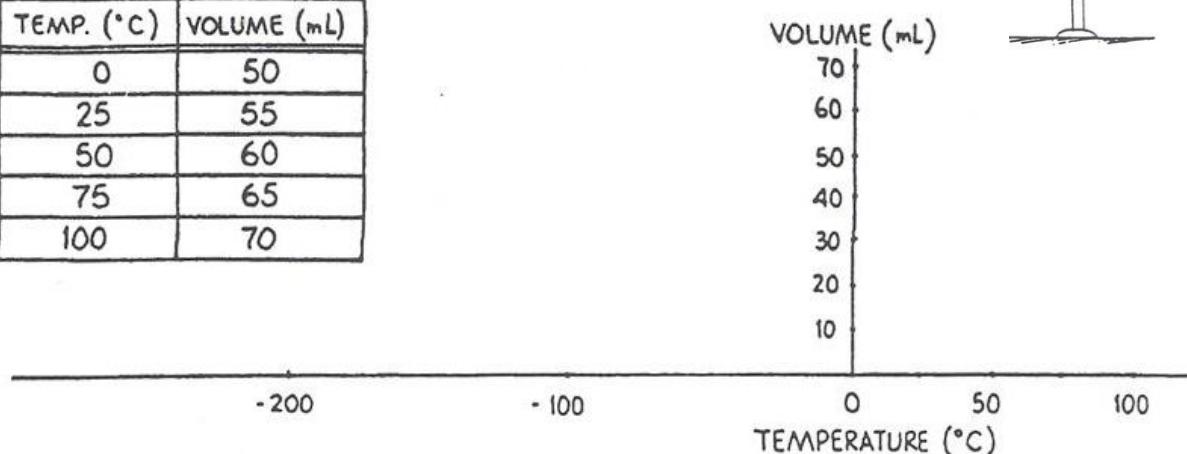
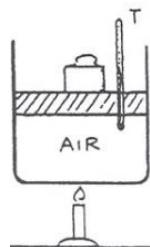
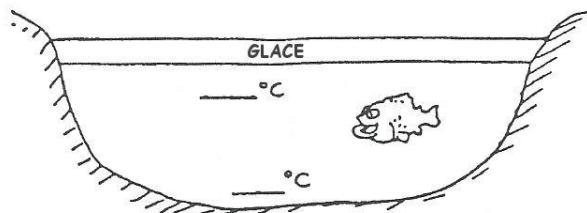
40. Une serrure et sa clé sont faites d'un même matériau ou d'un matériau de coefficient de dilatation identique. Pourquoi ?

41. Le niveau d'eau dans les flacons est indiqué pour 0°C et 1°C . Représenter approximativement les niveaux pour les autres températures.



42. L'eau va-t-elle se dilater ou se contracter si elle est légèrement chauffée à partir des températures suivantes : 0°C ; 4°C ; 6°C .
43. Supposons que de l'eau est utilisée dans un thermomètre à dilatation et que la température vaut 4°C . Lors d'une petite variation de température, pourquoi ce thermomètre ne permet-il pas de déterminer si la température monte ou descend ?
44. Une pièce solide en fer coule dans du fer fondu. Une pièce solide en aluminium coule dans de l'aluminium fondu. Pourquoi une pièce solide d'eau (de la glace) ne coule-t-elle pas dans l'eau liquide ?
45. Pourquoi faut-il absolument éviter que les tuyaux d'eau ne gèlent en hiver ?
46. Quelle était la température au fond du Lac Léman, dont la profondeur vaut 300 m, lors du réveillon de Nouvel An en 1901 ?
47. Indiquer les températures probables de l'eau en haut et au fond d'un lac couvert de glace.
48. Si un lac était refroidi au fond et non pas à la surface, le lac gèlerait-il du fond vers la surface ? Justifier.
49. Une masse d'air est enfermée dans un récipient de sorte que le volume puisse changer à pression constante. L'air est chauffé lentement. Le tableau ci-dessous donne le volume de l'air à différentes températures.
- a. Représenter les mesures dans un graphique $V(T)$.

| TEMP. ($^{\circ}\text{C}$) | VOLUME (mL) |
|------------------------------|-------------|
| 0 | 50 |
| 25 | 55 |
| 50 | 60 |
| 75 | 65 |
| 100 | 70 |

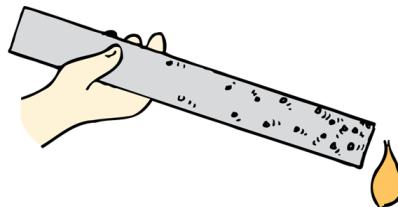


- b. Extrapoler la droite de régression pour déterminer la température à laquelle le volume de l'air deviendrait nul. Combien vaut cette température en $^{\circ}\text{C}$?
- c. Bien que l'air devienne liquide avant d'atteindre cette température, la procédure suggère qu'il y a une limite inférieure de la température. Il s'agit du zéro absolu de l'échelle Kelvin. Des mesures précises ont montré que le zéro absolu (0 K) correspond à _____ $^{\circ}\text{C}$.
- d. Comment se présente le diagramme si l'unité de l'axe de température est le kelvin ?

5 Modes de transferts thermiques

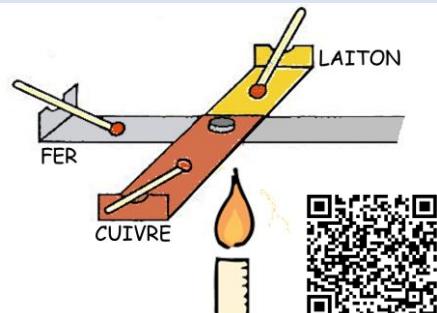
5.1 Conduction

Lorsqu'on chauffe l'extrémité d'une tige métallique, la chaleur se propage rapidement à travers la tige. À l'endroit où la flamme transfert la chaleur à la tige, l'agitation thermique des atomes et des électrons libres augmente. En heurtant les corpuscules voisins, ils leur cèdent une partie de leur énergie cinétique. Ainsi, par collisions successives, l'énergie se propage de proche en proche de la partie chaude vers la partie froide de la tige.



Un transfert thermique par **conduction** se fait à l'intérieur d'un corps (ou entre différents corps en contact), sans transfert global de matière.

La conductivité thermique dépend du matériau. Dans l'expérience illustrée, l'allumette posée sur la lamelle en cuivre s'allume la première, suivie de celle posée sur la lamelle en laiton, et finalement de celle posée sur la lamelle en fer. Une colonne métallique conduit bien mieux la chaleur qu'une colonne d'eau de même dimension, tandis que la colonne d'eau conduit mieux la chaleur qu'une colonne d'air.



Un **conducteur thermique** est une substance qui conduit bien la chaleur.

Un **isolant thermique** est un mauvais conducteur thermique.

Tous les métaux sont d'excellents conducteurs thermiques grâce à leurs électrons libres, qui peuvent rapidement transmettre leur énergie cinétique aux corpuscules voisins. En revanche, le verre et le plastique sont des isolants thermiques car ils ne renferment pas d'électrons libres.

Les liquides et les gaz sont de mauvais conducteurs thermiques (c'est-à-dire de bons isolants thermiques). L'air est un excellent isolant thermique. Les bonnes propriétés isolantes de matériaux poreux tels que la laine, le bois, le liège, le foin, le papier, le polystyrène sont essentiellement dues aux espaces d'air qu'ils renferment.

Exemples

- Au toucher, un carrelage paraît plus froid qu'un sol en bois de même température parce que la faïence est un meilleur conducteur thermique que le bois. Le transfert d'énergie de notre corps au carrelage se fait à un taux plus rapide, ce qui procure cette impression de fraîcheur.
- On peut tenir la main à l'intérieur d'un four très chaud pendant plusieurs secondes sans se brûler, mais on se brûle les doigts en touchant les faces métalliques à l'intérieur du four. Comme l'air est un isolant thermique, le transfert thermique de l'air chaud à la main est lent. En revanche, le métal des faces intérieures est un excellent conducteur thermique. Même lors d'un contact très bref, une grande quantité de chaleur est fournie à la main.



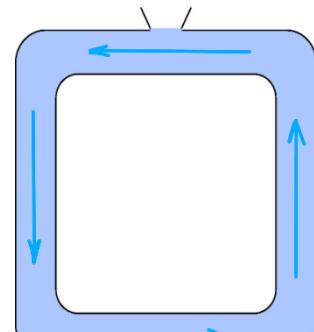
- En hiver, une couverture de lit ne fournit pas de chaleur, mais les espaces d'air entre les plumes ralentissent le transfert thermique de notre corps vers l'air ambiant. Pour se garder chaud en hiver, un oiseau gonfle son plumage. Cette technique lui permet d'augmenter le volume d'air entre la peau et les plumes. Cet espace d'air agit comme un isolant thermique en préservant au maximum l'énergie thermique du corps de l'oiseau.
- Les flocons de neige sont formés de cristaux qui se regroupent en renfermant beaucoup d'air. La neige est donc un bon isolant thermique qui garde le sol chaud en hiver. Les iglus ralentissent le transfert thermique des Inuits vers l'extérieur. Des animaux se protègent contre le froid en trouvant refuge dans des trous dans la neige.
- En hiver, l'isolation d'une maison ne garde pas le froid à l'extérieur, mais garde le chaud à l'intérieur. Or, aucun isolant ne peut totalement empêcher le transfert thermique. En hiver, sans apport de chaleur, même les maisons les mieux isolées refroidissent peu à peu.



5.2 Convection

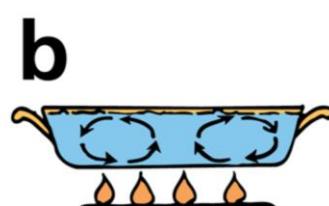
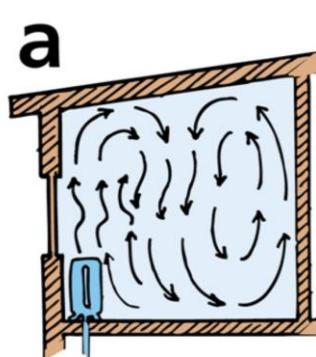
L'eau du tube chauffée par la flamme se dilate. Sa masse volumique diminue et devient plus petite que celle des couches d'eau supérieures. Par conséquent, l'eau chaude monte pour être remplacée par de l'eau plus froide. Le processus recommence et il se crée un courant d'eau, appelé **courant de convection**. L'eau est ainsi remuée pendant qu'elle est chauffée.

Un transfert thermique par **convection** se fait par la circulation d'un fluide (liquide ou gaz) et s'accompagne donc d'un transport de matière. Les courants de fluides sont appelés **courants de convection**.



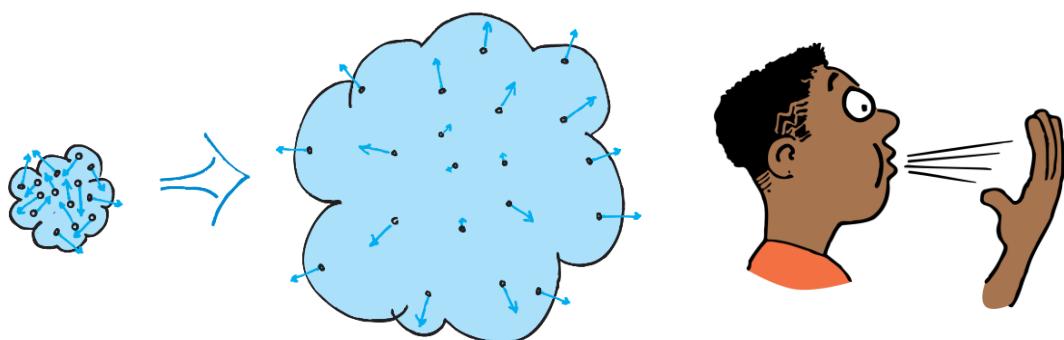
Applications

- Les radiateurs créent des courants de convection dans une chambre : l'air froid chauffe au contact du radiateur et monte, laissant la place à de l'air froid. Voilà pourquoi un radiateur est aussi appelé un **convecteur**.
- Une plaque de cuisson crée des courants de convection dans l'eau d'une casserole. De l'eau chauffée au fond de la casserole monte et est remplacée par de l'eau plus froide. De même, l'eau chauffée dans une chaudière dans la cave d'une maison monte par convection et réchauffe les radiateurs dans les étages supérieurs.



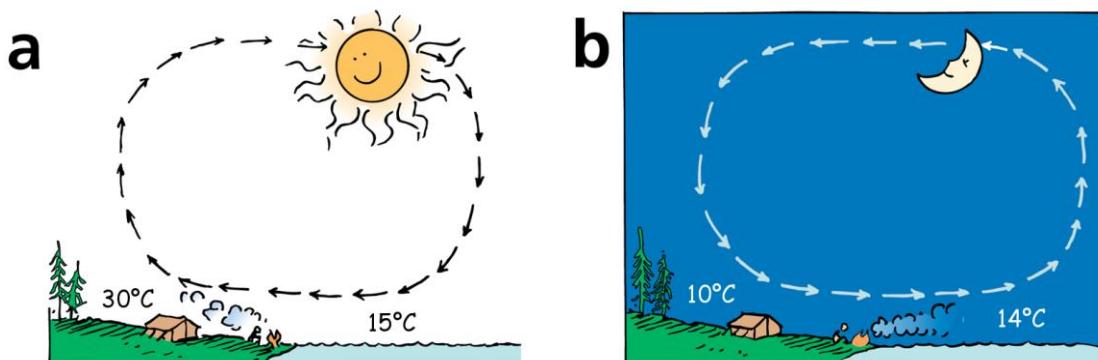
Phénomènes naturels

- Le Soleil est à l'origine de courants de convection qui remuent l'atmosphère et créent des vents. Certaines régions absorbent la chaleur du Soleil plus rapidement que d'autres, ce qui provoque un réchauffement inégal de l'air proche de la surface. Ainsi, la température du sable, des champs de blé ou des rochers augmente plus rapidement que la température des prairies, des forêts et des nappes d'eau. L'air chaud qui monte est remplacé par de l'air frais. Les planeurs utilisent ces **courants thermiques** ascendants pour monter en altitude en décrivant des spirales étroites.
- Les courants de convection dans l'atmosphère influencent la température de l'air. L'air chaud ascendant se refroidit en se dilatant⁹. En effet, Les molécules de l'air en expansion entrent plus souvent en collision avec des molécules qui reculent qu'avec des molécules qui s'approchent. Leur énergie cinétique a tendance à diminuer lors des collisions et, par conséquent, l'air qui se dilate se refroidit¹⁰.



La température de l'air est plus faible en haute altitude (sauf pour des cas particuliers appelés inversions). Voilà pourquoi il fait plus froid au sommet des montagnes que dans les vallées.

- À la mer, il y a toujours une agréable brise. En voici l'explication :
 - Lors d'une journée estivale, le Soleil rayonne sur la terre ferme et sur la mer. La terre se réchauffe davantage que l'eau. L'air au-dessus de la surface de la terre monte et est remplacé par de l'air frais venant de la mer. C'est la **brise de mer**.
 - Pendant la nuit, le phénomène inverse a lieu : la terre chaude cède la chaleur beaucoup plus vite que l'eau. C'est la température de l'eau qui est alors plus élevée. L'air au-dessus de la mer monte, laissant place à de l'air plus frais venant de la Terre. C'est la **brise de Terre**.



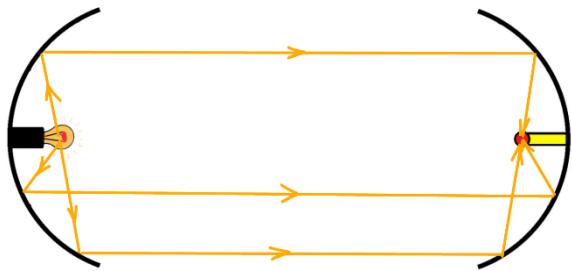
⁹ Que devient cette énergie ? L'air en expansion effectue un travail en repoussant l'air ambiant

¹⁰ En baillant, l'air expiré est chaud. Lorsque tu souffles dans ta soupe bouillante, l'air soufflé est bien plus frais car l'air se dilate en quittant ta bouche. Au contraire, en comprimant l'air avec une pompe de vélo, on remarque que l'air devient chaud.

5.3 Rayonnement

Comment le Soleil chauffe-t-il l'atmosphère et la surface de la Terre ? Il ne peut s'agir ni d'un transfert thermique par conduction, ni par convection, car il n'y a pas de matière dans l'espace entre la Terre et le Soleil.

En allumant une ampoule électrique qui se trouve au foyer d'un miroir parabolique, les rayons lumineux émis par l'ampoule et réfléchis par le miroir se propagent parallèlement vers le second miroir parabolique placé en face du premier. Ils y sont réfléchis et convergent sur la tête de l'allumette placée dans son foyer. L'énergie thermique est transférée de l'ampoule à la tête de l'allumette par rayonnement électromagnétique.

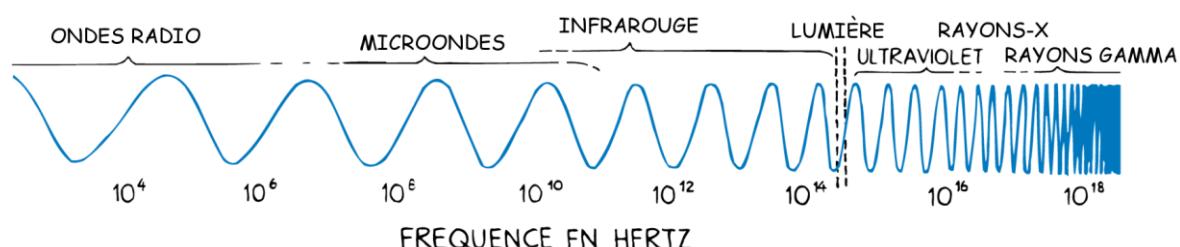


Un transfert thermique par **rayonnement** se fait sous forme d'ondes électromagnétiques.

5.3.1 Emission

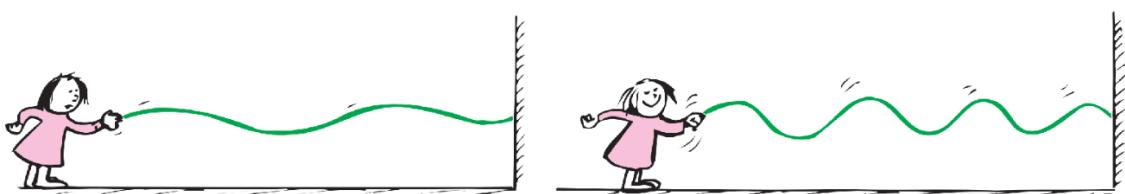
Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet continuellement du rayonnement électromagnétique. Le pic de fréquence du rayonnement émis est proportionnel à la température absolue du corps : $f_{\max} \sim T$

Le spectre du rayonnement électromagnétique s'étend sur un domaine de fréquences très large :



Puisque la température d'un corps est une mesure pour l'agitation thermique de ses corpuscules, il s'en suit que :

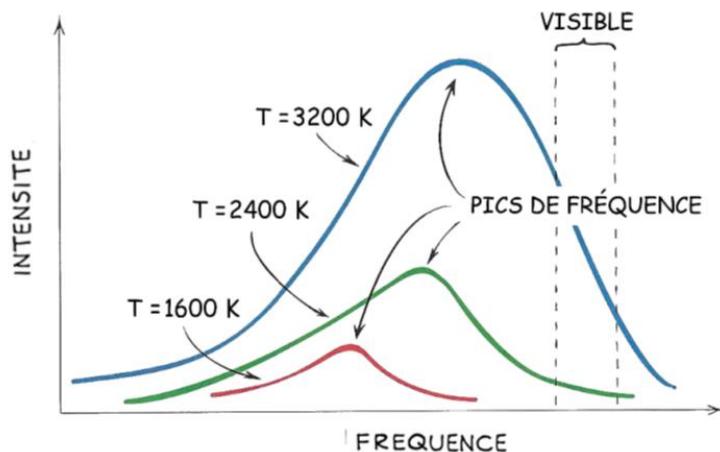
- Un corps froid émet un rayonnement de grande longueur d'onde (de petite fréquence).
- Un corps chaud émet un rayonnement de petite longueur d'onde (de grande fréquence).



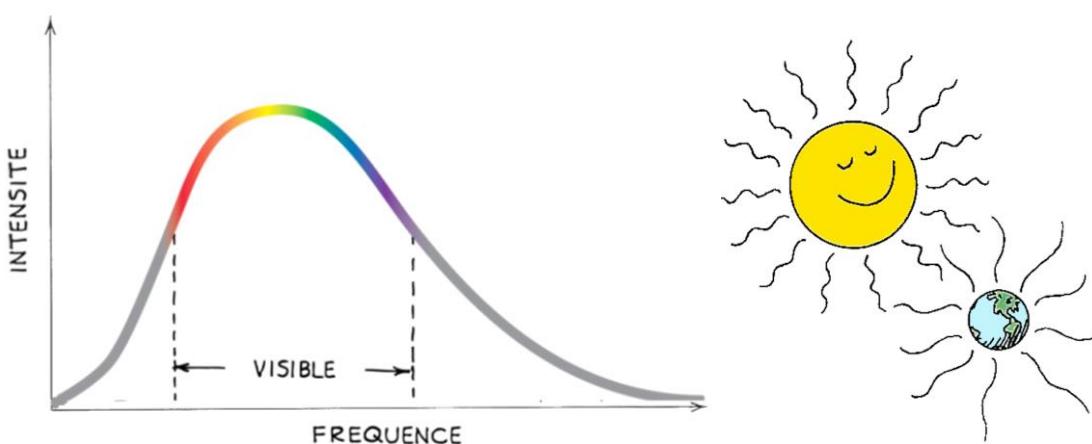
La plupart des objets qui nous entourent émettent un rayonnement infrarouge, de grande longueur d'onde. C'est le **rayonnement thermique**. Les ondes infrarouges sont absorbées par notre peau, créant une sensation de chaleur. Un thermomètre infrarouge mesure le rayonnement thermique émis par un corps et le convertit en température. La plupart des thermomètres infrarouges peuvent mesurer des températures entre -30°C et 200°C.

Les êtres humains, dont la peau a une température de 300 K, émettent également un rayonnement infrarouge. Des corps très chauds rayonnent de l'énergie dans le domaine visible.

- À 500°C, un corps commence à émettre de la lumière rouge sombre. C'est la fréquence minimale que nous pouvons voir.
- Des corps de température plus élevée émettent également de la lumière jaune de fréquence plus élevée.
- À environ 1500°C, toutes les fréquences du spectre de lumière visible sont émises et le corps est incandescent.



Le rayonnement émis par les étoiles est appelé **rayonnement stellaire**. La source de l'énergie rayonnée par les étoiles est la fusion thermonucléaire qui a lieu dans leur noyau. Une étoile bleue est plus chaude en surface qu'une étoile jaune, qui est plus chaude qu'une étoile rouge. Puisque la fréquence de la lumière bleue est presque deux fois plus grande que celle de la lumière rouge, la température de surface d'une étoile bleue est presque deux fois plus grande que celle d'une étoile rouge. La surface du Soleil a une température d'environ 5500°C. La lumière blanche du Soleil est composée de toutes les couleurs. L'intensité dans les différentes fréquences n'est cependant pas uniforme. La lumière du Soleil est la plus intense dans la partie jaune-vert du spectre. C'est pourquoi les yeux des êtres humains sont les plus sensibles à ces deux couleurs.



En comparaison, la Terre est froide et elle émet des fréquences dans l'infrarouge. Le rayonnement émis par la Terre est appelé **rayonnement terrestre**. Une bonne partie de l'énergie thermique de la Terre est générée par désintégration radioactive de noyaux atomiques à l'intérieur de la Terre. La Terre et le Soleil « brillent » tous les deux – le Soleil à des fréquences visibles et la Terre à des fréquences infrarouges.

5.3.2 Absorption

Tous les corps, chauds ou froids, émettent de l'énergie par rayonnement. Or, ils ne refroidissent pas en permanence parce qu'ils en absorbent en même temps. Si la surface d'un corps absorbe plus d'énergie qu'elle n'en émet, c'est un net absorbeur et sa température augmente. Si le corps émet plus d'énergie qu'il n'en absorbe, c'est un net émetteur et sa température baisse.

De bons émetteurs d'énergie rayonnée sont également de bons absorbeurs.

De mauvais émetteurs d'énergie rayonnée sont également de mauvais absorbeurs.

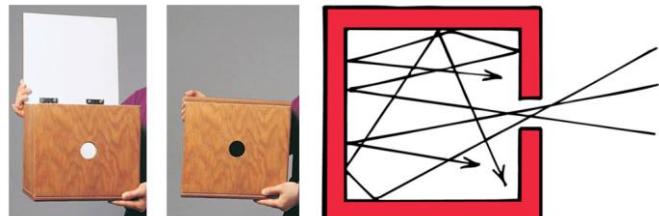
On peut le vérifier avec une paire de récipients métalliques de même taille et forme, l'un avec une surface réfléchissante et l'autre avec une surface mat et noircie. En remplissant les récipients d'une même quantité d'eau chaude, on peut mesurer que l'eau dans le récipient noir refroidit plus rapidement car la surface mat émet plus de rayonnement infrarouge. La même expérience peut être faite à l'envers : on remplit les récipients d'eau glacée et on les éclaire avec une lumière infrarouge intense. L'eau dans le récipient noir se réchauffe plus rapidement car la surface mat absorbe plus de rayonnement infrarouge.¹¹



Lors d'une journée ensoleillée, la surface de la Terre est un net absorbeur. Pendant la nuit, elle est un net émetteur. Lors d'une nuit étoilée, l'environnement de la surface terrestre est la profondeur glaciale de l'espace et le refroidissement est plus rapide que lors d'une nuit nuageuse. C'est la raison pour laquelle les records de températures minimales sont atteints lors de nuits étoilées.

5.3.3 Réflexion

L'absorption et la réflexion sont des processus opposés. Un bon absorbeur d'énergie rayonnée en réfléchit très peu, notamment dans le domaine de la lumière visible. Des ouvertures (fenêtres ouvertes d'une maison éloignée, pupille, ouverture d'un long tuyau, ...) paraissent noires parce que tout rayonnement qui y entre est réfléchi de nombreuses fois par les parois intérieures. L'énergie rayonnée est partiellement absorbée à chaque réflexion et très peu ou aucune n'en ressort. Un absorbeur parfait ne réfléchit aucune énergie rayonnée et paraît parfaitement noir.¹²



De bons réflecteurs sont de mauvais absorbeurs. Tous les corps avec une surface brillante réfléchissent la plupart de l'énergie rayonnée incidente, et sont donc de mauvais absorbeurs d'énergie rayonnée.

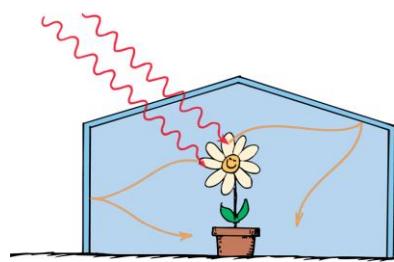
- En été, des habits clairs réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire.
- La neige fraîche est un bon réflecteur et ne fond donc pas rapidement dans la lumière du Soleil. Lorsque la neige est sale, elle absorbe plus d'énergie solaire et fond plus rapidement.
- Les panneaux solaires sont recouverts d'une surface anti réfléchissante pour absorber un maximum d'énergie solaire.
- La façade des maisons dans les pays chauds est souvent blanche.

¹¹ L'absorption dans le domaine visible du spectre dépend surtout de la couleur, tandis que l'absorption dans le domaine de l'infrarouge dépend plus de la texture de la surface. Une surface mat émet et absorbe mieux dans l'infrarouge qu'une surface polie, quelle que soit sa couleur.

¹² Sur les photos avec flash, les pupilles peuvent être rouges. La lumière très intense du flash est réfléchie sur la rétine rouge de l'œil et ressort à travers la pupille.

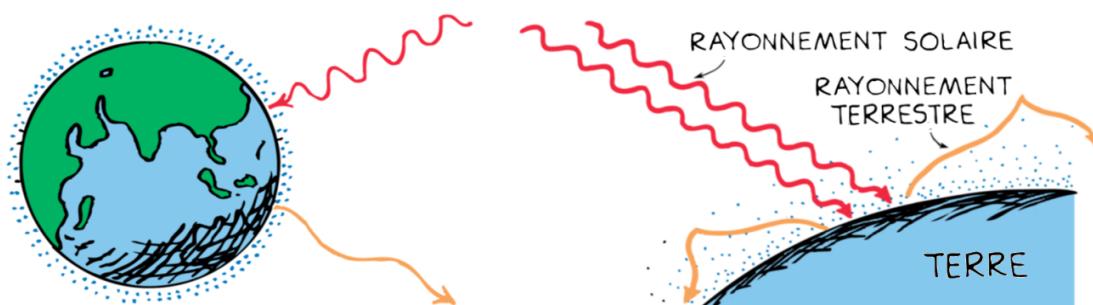
5.3.4 Phénomène naturel : L'effet de serre

La transparence du verre dépend de la longueur d'onde du rayonnement. Ainsi, le verre est transparent pour la lumière visible (courte longueur d'onde), mais absorbe les ondes infrarouges (grande longueur d'onde). Les ondes du rayonnement solaire traversent donc le verre d'une serre (ou d'une voiture). De la chaleur est transférée à l'intérieur de la serre où, mise à part un peu de réflexion, elle est absorbée et chauffe l'intérieur. L'intérieur émet lui aussi du rayonnement, mais puisqu'il est moins chaud que la surface du soleil, les longueurs d'onde sont plus grandes, dans le domaine de l'infrarouge. Le vitrage de la serre bloque le passage d'une partie de ce rayonnement. La plupart de l'énergie rayonnée reste donc piégée à l'intérieur de la serre, ce qui fait augmenter la température.



Le même phénomène a lieu dans l'atmosphère de la Terre. L'air est transparent au rayonnement infrarouge et au rayonnement visible. Mais un excès de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , vapeur d'eau) fait augmenter le taux d'absorption des ondes infrarouges. La température de la surface de la Terre dépend de l'équilibre entre le rayonnement solaire incident et le rayonnement terrestre émis.

- La surface de la Terre absorbe l'énergie solaire et réémet une partie de cette énergie à une longueur d'onde plus grande.
- Les gaz à effet de serre absorbent et réémettent le rayonnement terrestre vers la Terre.
- Le rayonnement infrarouge qui ne peut pas s'échapper de l'atmosphère réchauffe la Terre.



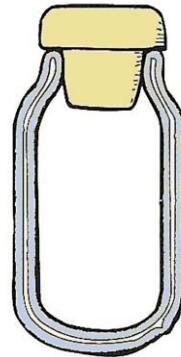
Sans l'effet de serre naturel, la température moyenne sur la Terre ne serait que de -18°C . Cependant, la concentration croissante de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère fait augmenter la température moyenne sur Terre de plus en plus vite.

En moyenne, sur une période de quelques années, le rayonnement solaire qui frappe la Terre équilibre exactement le rayonnement terrestre que la Terre émet vers l'espace. Cet équilibre résulte en une température moyenne de la Terre – une température qui permet la vie telle que nous la connaissons. Sur une période de décennies, la température moyenne de la Terre peut être altérée – par des causes naturelles mais également par l'activité humaine. Des substances qui proviennent de la combustion de carburants change le taux d'absorption et de réflexion du rayonnement solaire. Sauf si la source d'énergie est le Soleil, le vent ou l'eau, une consommation accrue d'énergie sur la Terre augmente l'énergie thermique de l'atmosphère. Ces activités peuvent changer l'équilibre de rayonnement et changer la température moyenne sur Terre. Bien que la vapeur d'eau soit le principal gaz à effet de serre, le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère augmente rapidement. De plus, l'échauffement dû au dioxyde de carbone peut produire plus de vapeur d'eau. La cause du réchauffement inquiétant de notre planète est donc l'émission croissante de ces deux gaz à effet de serre.

5.4 Isolation thermique

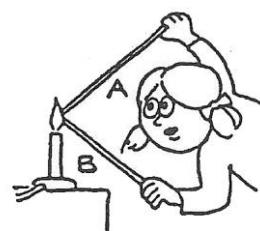
Si on veut qu'un système n'échange aucune énergie thermique avec son environnement, il faut l'isoler thermiquement. Cela veut dire qu'il faut éviter tout transfert thermique sous forme de conduction, de convection et de rayonnement. On entoure le système de **parois adiabatiques**. En pratique, une paroi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

- Une bouteille isotherme réduit le transfert de chaleur entre l'environnement et le contenu de la bouteille. Une telle bouteille est constituée de doubles parois réfléchissantes séparées par de l'air ou un vide.
 - a. Le vide entre la double paroi, ainsi que le bouchon en plastique ou en verre limitent le transfert thermique par conduction.
 - b. Le vide n'est pas un fluide, donc il n'y a pas de transfert thermique par convection.
 - c. Le transfert thermique par rayonnement entre l'intérieur de la bouteille et l'environnement est réduit par les parois réfléchissantes.
- L'air enfermé dans les fenêtres à double ou triple vitrage limite le transfert thermique par conduction entre l'intérieur et l'extérieur d'une maison. Une partie du rayonnement solaire est également réfléchie aux surfaces des vitres.



■ As-tu compris ?

50. Un transfert thermique dans un corps qui se fait sans déplacement de matière est appelé...
 - A. convection
 - B. conduction
 - C. rayonnement
51. Un transfert thermique qui se fait par un déplacement de fluide est appelé...
 - A. convection
 - B. conduction
 - C. rayonnement
52. Quelle forme de transfert thermique ne requiert pas de milieu matériel ?
53. Les extrémités de deux tiges métalliques identiques A et B sont placées dans une flamme. Les affirmations suivantes sont-elles vraies ou fausses ?
 - a. La chaleur se propage uniquement le long de la tige A.
 - b. La chaleur se propage uniquement le long de la tige B.
 - c. La chaleur se propage de la même manière le long de A et de B.
 - d. L'idée que la « chaleur monte » s'applique au transfert de chaleur par convection, et non par conduction.
54. Si tu tiens une extrémité d'un clou métallique contre de la glace, l'extrémité dans ta main refroidit rapidement. L'explication correcte est que...
 - A. le froid circule de la glace à travers le clou vers ta main.
 - B. la chaleur circule de ta main à travers le clou vers la glace.
55. À mains nues, tu peux retirer une poêle par son manche en bois d'un four très chaud. Pourquoi serait-il une mauvaise idée de faire de même avec un manche en fer ?

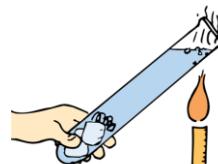


56. Si on touche les plaques métalliques d'un four chaud, on subit de graves brûlures. En revanche, on peut tenir la main pendant un instant dans l'air à l'intérieur du four sans se brûler. Pourquoi ?

57. Nous ressentons l'air à 20°C comme agréablement chaud. Cependant, l'eau à 20°C dans une piscine nous paraît fraîche. Pourquoi ?

58. Pourquoi les substances telles que le bois, la fourrure, les plumes et la neige sont-ils de bons isolants thermiques ?

59. L'expérience illustrée ci-contre prouve que l'eau n'est pas un bon conducteur thermique. Expliquer pourquoi.



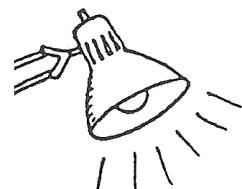
60. Lorsqu'on approche les doigts latéralement d'une flamme, on ne se brûle pas. En revanche, si on place la main directement au-dessus de la flamme, on se brûle. Pourquoi ?



61. Pourquoi l'isolation du toit d'une maison est-elle en général plus épaisse que l'isolation des murs ?

62. Des oiseaux et des planeurs peuvent parfois rester dans l'air pendant des heures sans dépenser d'énergie. De quel phénomène physique se servent-ils ?

63. Pourquoi il y a des trous dans la partie supérieure d'une lampe de bureau ?



64. Comment la vitesse des molécules d'air est-elle influencée lorsque l'air est comprimé par l'action d'une pompe ? Qu'est-ce qui se passe avec la température de l'air ?

65. Dans les stations de ski, les canons à neige propulsent un mélange d'air comprimé et d'eau à travers une buse de pulvérisation. Bien que la température initiale du mélange puisse être supérieure à la température de solidification de l'eau, des cristaux de neige se forment lorsque le mélange est éjecté. Expliquer pourquoi.

66. Quelle est le rôle d'une cellule photovoltaïque ?

67. Quelle relation existe-t-il entre le pic de fréquence du rayonnement émis par un corps et sa température (en K) ?

68. Donner une différence fondamentale entre les ondes du rayonnement solaire et celles du rayonnement terrestre.

69. Tous les objets émettent du rayonnement. Pourquoi ne peut-on pas tous les voir dans le noir ?

70. Pourquoi la pupille d'un œil est-elle noire ?

71. Puisque tous les objets émettent de l'énergie par rayonnement à leur environnement, pourquoi leurs températures ne chutent-elles pas continuellement ?

72. Qu'arrive-t-il à la température d'un corps qui émet plus d'énergie rayonnée qu'il en absorbe ?

73. Si la composition de la haute atmosphère était modifiée de sorte qu'une plus grande quantité de rayonnement terrestre puisse s'échapper, quelle en serait la conséquence sur le climat ?

74. Une bouteille isotherme limite le transfert thermique...

- A. par conduction
- B. par convection
- C. par rayonnement

Crédits photos et illustrations

© aappp / Shutterstock.com (609001889) – **page titre** (*locomotive*)

© Ekaterina_Minaeva / Shutterstock.com (224458264) – **p.5** (*étiquetage alimentaire*)

© Kichigin / Shutterstock.com (106196360) – **p.11** (*flocon de neige*)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT, auteur de toutes les autres illustrations de ce cours. Elles ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson