BUISSONNETS
MONTANI

Support de cours

Physique

Matu 1 – Matu 2

Berthod Vincent

Module 1. Introduction

1.1 qu'est-ce que la physique

La physique consiste en l'étude des lois qui gouvernent l'interaction entre la matière et l'énergie dans l'univers. Ces interactions déterminent les propriétés de tout ce que nous observons, tant sur les plus petites échelles microscopiques (comme dans les noyaux des atomes) que sur les plus grandes échelles macroscopiques (comme entre les amas de galaxies). Les physiciens tentent de comprendre ces propriétés en formulant des hypothèses basées sur l'expérience, puis en les testant à l'aide de méthodes scientifiques.

L'étude de la physique est généralement divisée en deux disciplines distinctes: la physique classique regroupe la plupart de la physique connue avant 1900, tandis que la physique moderne se penche sur les développements depuis cette époque.

La physique classique sert de fondement à toutes les physiques et comprend l'étude de:

I. la mécanique, qui consiste en l'étude du mouvement des objets;
II. l'électricité et du magnétisme, qui consiste en l'étude du comportement des matières magnétiques et chargées d'électricité; et
III. la thermodynamique, qui consiste en l'étude du transfert de chaleur.

La physique moderne nous procure une nouvelle perspective unique de la nature et comprend des sujets comme:

I. la mécanique quantique, qui consiste en l'étude du comportement des particules microscopiques comme les atomes, les électrons, les noyaux et les quarks;
II. la physique des solides, qui comprend l'étude de la matière à des températures extrêmement basses (p. ex. supraconducteurs) et la nature des matières semi-conductrices; ainsi que
III. l'astrophysique, qui comprend l'étude des corps célestes (étoiles, naines blanches, trous noirs) et la cosmologie (l'étude de l'évolution de l'univers).

1.2 les unités

La physique est une science quantitative. Elle s'occupe essentiellement de mesures. La mesure d'une grandeur est sa comparaison avec une grandeur de même nature choisie comme unité. On distingue les unités dites fondamentales, telles le mètre et la seconde, et les unités dérivées obtenues en composant les premières. Le mètre carré [m^2] et le mètre par secondes [m/s] , par exemple résultent d'un produit et d'un quotient d'unités fondamentales.

Les unités fondamentales du système international d'unité (SI) sont :

Les longueurs se mesurent en mètres $[m]$

Les masses se mesurent en kilogrammes $[kg]$

Le temps se mesure en seconde $[s]$

Les courants électriques se mesurent en ampère $[A]$

Les températures se mesurent en kelvin $[K]$ ou $[°K]$

Unités dérivées SI :

Grandeur	Symboles	Nom et symbole de l'unité		En unités SI : dérivées	de base
Fréquence	ν, f	hertz	Hz		$s^{-1} = \frac{1}{s}$
Force	F	newton	N		$\frac{m \cdot kg}{s^2}$
Pression	p	pascal	Pa	$\frac{N}{m^2}$	$\frac{kg}{m \cdot s^2}$
Energie, travail, quantité de chaleur	E, A, Q	joule	J	$N \cdot m$	$\frac{m^2 \cdot kg}{s^2}$
Puissance	P	watt	W	$\frac{J}{s}$	$\frac{m^2 \cdot kg}{s^3}$
Charge électrique	q, Q	coulomb	C		$s \cdot A$
Tension électrique, potentiel électrique	U, V	volt	V	$\frac{W}{A}$	$\frac{m^2 \cdot kg}{s^3 \cdot A}$
Résistance électrique	R	ohm	Ω	$\frac{V}{A}$	$\frac{m^2 \cdot kg}{s^3 \cdot A^2}$
Capacité électrique	C	farad	F	$\frac{C}{V}$	$\frac{s^4 \cdot A^2}{m^2 \cdot kg}$
Induction magnétique	B	tesla	T		$\frac{kg}{s^2 \cdot A}$

On peut encore utiliser des multiples et sous-multiples de ces unités :

Facteur	Préfixe	Symbole		Facteur	Préfixe	Symbole
10^1	déca	da		10^{-1}	déci	d
10^2	hecto	h		10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k		10^{-3}	milli	m
10^6	méga	M		10^{-6}	micro	µ
10^9	giga	G		10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T		10^{-12}	pico	p

1.3 notation scientifique

La notation (ou écriture) scientifique est une représentation d'un nombre décimal sous la forme d'un produit de 2 autres nombres. Le premier, appelé mantisse, est un nombre décimal compris entre 1 et 10, le 10 étant exclu. En d'autres termes, il n'y a qu'un seul chiffre (non nul) à gauche de la virgule. Le second, appelé exposant, est une puissance de 10.

Exemples :

- 123 423 456 s'écrira $1{,}234\,234\,56 \cdot 10^{8}$
- 0,000 123 s'écrira $1{,}23 \cdot 10^{-4}$
- 451 s'écrira $4{,}51 \cdot 10^{2}$

La notation scientifique permet de connaître immédiatement l'ordre de grandeur du nombre en examinant l'exposant. Elle permet également de simplifier la multiplication et la division, en procédant au calcul avec les mantisses d'une part et les exposants d'autre part.

Cette notation est très utile pour les quantités physiques dont les valeurs sont souvent encadrées avec une marge d'erreur. On se restreint souvent aux chiffres significatifs, par exemple la notation $1{,}2340 \cdot 10^{6}$ signifie que la valeur est comprise entre 1 233 950 et 1 234 050.

Exercice 1

a) La distance parcourue par la lumière en une année est une année-lumière. Sachant que la vitesse de la lumière est égale à $3 \cdot 10^{8}$ [m/s], exprimez l'année-lumière en kilomètres
b) La distance moyenne entre la Terre et le Soleil est appelée unité astronomique (UA) et vaut à peu près $1.5 \cdot 10^{11}$ [m]. Que vaut la vitesse de la lumière en [UA/h] ?

Exercice 2 La masse volumique de l'eau est égale à 1 [g/cm^3]. Que vaut-elle en unités fondamentales SI.

Exercice 3 Un cylindre plein a un rayon de 3 [cm] et un volume de 0.41 litres. Trouvez sa longueur et l'aire de sa surface.

Exercice 4 Exprimez les valeurs suivantes en unités sans préfixe :

a) 6.5 [ns]	b) 12.8 [μm]	c) 20000 [MW]
d) 0.3 [mA]	e) 1.5 [pA]	f) 5 [GJ]

Exercice 5

Selon la deuxième loi de la cinématique de Newton, la force F agissant sur une particule est fonction de sa masse m et de son accélération a, selon la relation F = ma. D'après la loi de la gravitation universelle de Newton, la force d'attraction entre deux points matériels séparés par une distance r est donnée par $F = Gm_1m_2/r^2$. Quelle est la dimension de G (unité de G) ?

Exercice 6

Vérifiez si les équations suivantes sont homogènes en dimensions, sachant que v est la vitesse [m/s], a est l'accélération [m/s^2], x est la position [m] et t le temps en [s] :

a) $x = \frac{v^2}{2a}$ V b) $x = \frac{1}{2}at$ F c) $t = \left(\frac{2x}{a}\right)^{\frac{1}{2}}$ V

Module 2. Les vecteurs

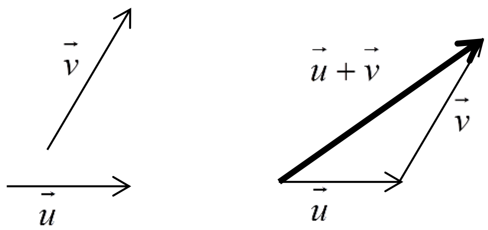
2.1 scalaire et vecteur

Un **scalaire** est une grandeur caractérisée par un nombre. Un **vecteur** est une grandeur caractérisée par un nombre, un sens, une direction. La masse, le temps sont des scalaires. La vitesse, l'accélération, les forces sont des vecteurs.

2.2 addition et soustraction de vecteurs

Addition :

On obtient un représentant du vecteur $\vec{u}+\vec{v}$ en considérant la flèche (ou bipoint) reliant l'origine du vecteur $\vec{u}$ à l'extrémité du vecteur $\vec{v}$ placé de manière à ce que l'origine du vecteur $\vec{v}$ coïncide avec l'extrémité du vecteur $\vec{u}$.

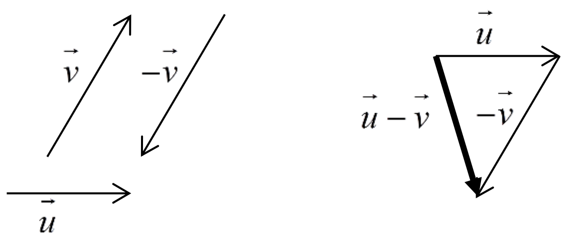


Lorsque plusieurs grandeurs physiques vectorielles de même type agissent sur un objet, on peut en obtenir l'effet cumulé en les additionnant. Par exemple si plusieurs forces agissent sur un objet, alors la somme des forces (notée $\sum \vec{F}$) correspond à l'effet cumulés de toutes ces forces, c'est-à-dire à la force unique qui aurait le même effet. Attention, seules les grandeurs vectorielles de même type peuvent s'additionner, on ne peut par exemple pas additionner un vecteur vitesse avec un vecteur accélération.

Opposé et soustraction :

Le vecteur opposé de $\vec{v}$ est un vecteur de même longueur (norme), de même direction, mais de sens contraire. On le note $-\vec{v}$. Le vecteur $\vec{u}-\vec{v}$ est obtenu en additionnant $\vec{u}$ et l'opposé de $\vec{v}$:

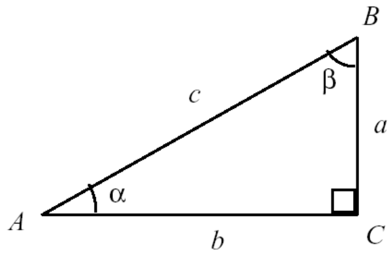
$$\vec{u}-\vec{v}=\vec{u}+\left(-\vec{v}\right)$$



2.3 composantes d'un vecteur, décomposition d'un vecteur sur deux axes

Pour faciliter les calculs, il est souvent très utile de connaître les effets d'une grandeur vectorielle dans une ou plusieurs directions données. En principe ces directions sont perpendiculaires et correspondent aux axes x et y. Soit $\vec{v}$ une grandeur vectorielle. L'effet de $\vec{v}$ dans la direction de l'axe des x est notée v_x et appelée première composante du vecteur $\vec{v}$, alors que l'effet de $\vec{v}$ dans la direction de l'axe des y est notée v_y et appelée deuxième composante du vecteur $\vec{v}$.

- Les composantes d'un vecteur sont des nombres.
- Les axes x et y sont souvent horizontal et vertical, mais ce n'est pas une généralité.
- Si la composante est de même direction que l'axe, elle sera positive, sinon négative.
- Si un vecteur est perpendiculaire à l'axe, sa composante sur cet axe sera nulle.
- Si un vecteur est parallèle à l'axe, la totalité de l'effet de ce vecteur sera dans la direction de cet axe et sa composante sera maximale (en valeur absolue) est égale à la norme de ce vecteur.
- Pour déterminer les composantes d'un vecteur sur les axes on utilise la trigonométrie dans le triangle rectangle :



$\sin\alpha = \dfrac{a}{c}$ « = côté opposé sur hypoténuse »

$\cos\alpha = \dfrac{b}{c}$ « = côté adjacent sur hypoténuse »

$\tan\alpha = \dfrac{a}{b}$ « = côté opposé sur côté adjacent »

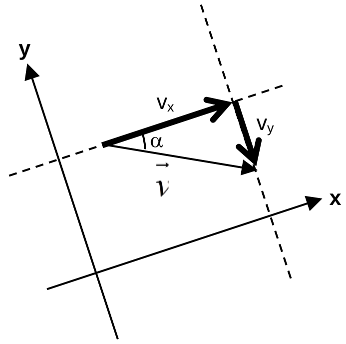
2.4 norme (module) d'un vecteur

La norme d'un vecteur est la valeur numérique correspondant à ce vecteur (on perd la direction est le sens du vecteur si on ne considère que sa norme). La norme du vecteur $\vec{v}$ est notée $\|\vec{v}\|$ (en mathématiques) ou v (en physique). La norme d'un vecteur est aussi appelée module, longueur ou valeur du vecteur. Le théorème de Pythagore nous permet d'écrire la relation suivante :

$$v = \sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2}}$$

Exemple :

Une voiture se déplace à la vitesse de 50 [km/h] dans une direction formant un angle de $\alpha = 20°$ sud avec l'axe des x, comme l'indique le schéma ci-dessous :



La norme de $\vec{v}$ est $v = 50$ [km/h]. Les composantes de $\vec{v}$ sont obtenues à l'aide des droites en pointillés passant par les extrémités de $\vec{v}$ et parallèles aux axes. Les formules de trigonométrie nous donnent :

$$\cos\alpha = \frac{v_x}{v} \Rightarrow v_x = v \cdot \cos\alpha$$

$$\sin\alpha = \frac{v_y}{v} \Rightarrow v_y = v \cdot \sin\alpha$$

En tenant compte de l'orientation de $\vec{v}$ par rapport aux axes, on obtient :

$$v_x = v \cdot \cos\alpha = 50\cos 20 = 46.98$$
$$v_y = -v \cdot \sin\alpha = -50\sin 20 = -17.10$$

Ceci signifie que notre voiture se déplace à la fois à la vitesse de 46.98 [km/h] dans le sens de l'axe des x et de 17.10 [km/h] dans le sens contraire de l'axe des y.

On remarque encore que :

$$\sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2}} = \sqrt{46.98^2 + (-17.10)^2} = \sqrt{2207.1204+292.41} = \sqrt{50} = v$$

2.5 produit scalaire et produit vectoriel

produit scalaire de deux vecteurs :

le **produit scalaire** de deux vecteurs est un nombre réel (scalaire) défini par :

$\vec{u} \cdot \vec{v} = u \cdot v \cdot \cos\alpha$ avec α = angle entre $\vec{u}$ et $\vec{v}$

produit vectoriel de deux vecteurs

le **produit vectoriel** de deux vecteurs est un vecteur défini par :

$\vec{u} \times \vec{v} = \vec{w}$

avec $\vec{w} \perp \vec{u}$ et $\vec{w} \perp \vec{v}$ et $w = u \cdot v \cdot \sin\alpha$, α = angle entre $\vec{u}$ et $\vec{v}$

le sens de $\vec{w}$ est donné par la règle de la main droite

Exercice 1

a) Une personne se déplace de 10 [m] dans une direction faisant un angle de 20° avec l'horizontale. Quelles distances horizontale et verticale a-t-elle parcourue ?
b) Un objet se déplace à une vitesse de 12 [m/s] dans une direction faisant un angle de 60° par rapport à la verticale. Quelle est sa vitesse horizontale ? Quelle est sa vitesse verticale ?
c) Un cheval tire un chariot se trouvant sur un rail rectiligne avec une force de 200 [N] faisant un angle de 18° avec l'horizontale. Quelle est la force utile qu'il exerce dans la direction du rail ? Quelle est la force inutile qu'il exerce dans la direction perpendiculaire au rail ?

Exercice 2

Une personne effectue un déplacement de 4 m dans la direction 40° ouest par rapport au nord, suivi d'un déplacement de 3 m à 20° sud par rapport à l'ouest. Déterminez le module et la direction du déplacement résultant.

Exercice 3

Un insecte parcourt 50 [cm] en ligne droite sur un mur. Si son déplacement horizontal vaut 25 [cm], quel est son déplacement vertical ?

Exercice 4

Un avion vole dans la direction 30° ouest par rapport au nord. Quelle distance franchit-il vers le nord pendant qu'il se déplace de 100 [km] vers l'ouest ?

Exercice 5

Un sous-marin parcourt 40 [km] vers le nord puis 30 [km] vers l'ouest. Quel troisième déplacement produirait un déplacement résultant de 20 [km] à 30° sud par rapport à l'ouest ?

Module 3. Mécanique : cinématique (partie 1)

Cinématique : étude des mouvements

1°) <u>Le mouvement rectiligne</u> :

concerne : un objet se déplaçant sur une droite.

La droite sur laquelle se déplace l'objet est l'axe des x.

Sur cette droite on s'intéresse à 2 positions :

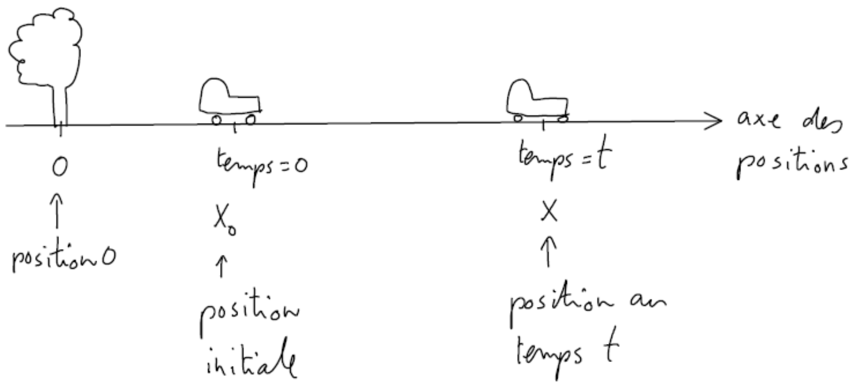
$$\begin{cases} x_0 : \text{position de l'objet au temps } 0 \text{ (position initiale)} \\ x : \text{position de l'objet au temps } t. \end{cases}$$

Remarques : • souvent on pose $x_0 = 0$, c'est-à-dire qu'on place l'origine à la position initiale.

• x et x_0 se mesurent en [m].

• t = temps écoulé depuis le temps 0, il se mesure en [s].

But : calculer la position de l'objet en fonction du temps, ainsi que la vitesse et l'accélération.



a) <u>le mouvement rectiligne uniforme</u> : (MRU)

c'est un mouvement rectiligne, mais l'objet se déplace à vitesse constante.

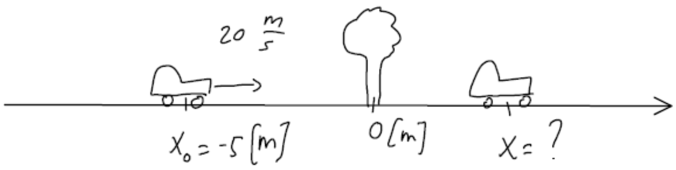
On s'intéresse à deux vitesses :

v_0 : vitesse au temps 0

v : vitesse au temps t

v et v_0 se mesurent en $\left[\frac{m}{s}\right]$

<u>ex:</u> une voiture roule à $20\left[\frac{m}{s}\right]$. Au temps 0, elle se trouve à 5 [m] d'un arbre et s'en approche. A quelle position, par rapport à l'arbre, se trouvera-t-elle après 3, 5 et 10 [s] ?



position après 3 [s] : $x = 20 \cdot 3 + (-5) = 55\,[m]$

position après 5 [s] : $x = 20 \cdot 5 + (-5) = 95\,[m]$

position après 10 [s] : $x = 20 \cdot 10 + (-5) = 195\,[m]$

position après t [s] : $x = 20 \cdot t + (-5)$

formules : $\begin{cases} x = v_0 \cdot t + x_0 \\ v = v_0 \\ a = 0 \end{cases}$

$x(t) = v_0 \cdot t + x_0$

Exemple : au temps 0, une voiture A se trouve 50 [m] derrière une voiture B. Les deux véhicules se déplacent dans le même sens sur une route rectiligne. La voiture A roule à 54 [km/h] et la voiture B à 36 [km/h].

a) Quelle est la distance parcourue par la voiture A en 30 [s]?

b) Quelle est la distance séparant les 2 véhicules après 20 [s]?

c) Quand la voiture A rattrape-t-elle la voiture B.

d) Quand la voiture A se trouve-t-elle 10[m] derrière la voiture B?

e) Quand la voiture A se trouve-t-elle 10[m] devant la voiture B?

a) $x_A = v_{0A} \cdot t + x_{0A}$

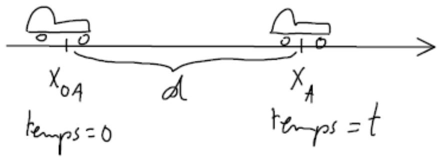
$t = 30\,[s]$

$v_{0A} = 54\left[\frac{km}{h}\right] = 15\left[\frac{m}{s}\right]$

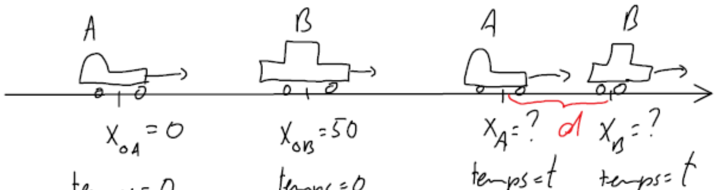
$x_{0A} = 0\,[m]$

$\Rightarrow x_A = 15 \cdot 30 + 0 = 450\,[m]$

$\Rightarrow$ La distance parcourue par le véhicule A est $d = x_A - x_{0A}$
$= 450 - 0$
$= 450\,[m]$



b)



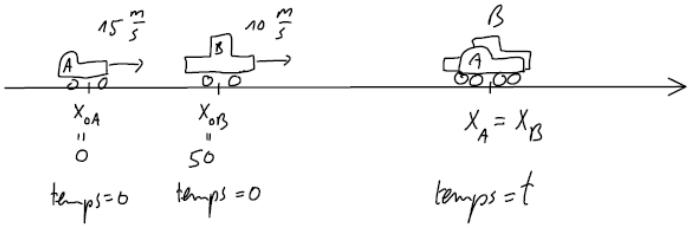
$d = x_B - x_A$ avec $\begin{cases} x_A = v_{0A} \cdot t + x_{0A} = 15 \cdot 20 + 0 = 300\,[m] \\ x_B = v_{0B} \cdot t + x_{0B} = 10 \cdot 20 + 50 = 250\,[m] \end{cases}$

$\hookrightarrow 36\left[\frac{km}{h}\right] \xrightarrow{:3,6} 10\left[\frac{m}{s}\right]$

$\Rightarrow d = 250 - 300 = -50\,[m]$

$\Rightarrow$ Après 20 [s], la voiture A se trouve 50 [m] devant la voiture B.

c)



$$x_A = v_A \cdot t + x_{oA} = 15 \cdot t + 0$$

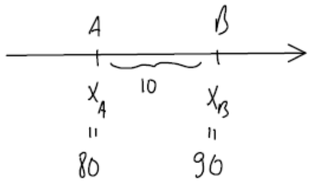
$$x_B = v_B \cdot t + x_{oB} = 10 \cdot t + 50$$

Lorsque A rattrape B on a : $x_A = x_B$

$$\Rightarrow 15t = 10t + 50$$

$$\Rightarrow 5t = 50 \Rightarrow t = 10\,[s]$$

d) $x_A = x_B - 10$



$$\Rightarrow 15t = 10t + 50 - 10$$

$$\Rightarrow 5t = 40$$

$$\Rightarrow t = 8\,[s]$$

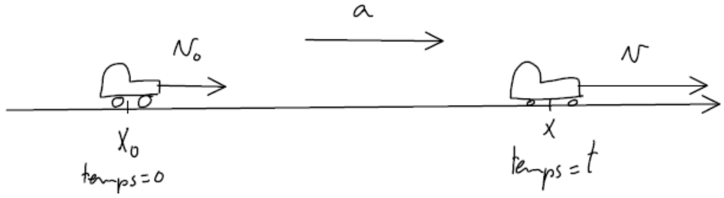
e) $x_A - 10 = x_B$

$$\Rightarrow 15t - 10 = 10t + 50$$

$$\Rightarrow 5t = 60$$

$$\Rightarrow t = 12\,[s]$$

b) <u>Le mouvement rectiligne uniformément accéléré :</u>

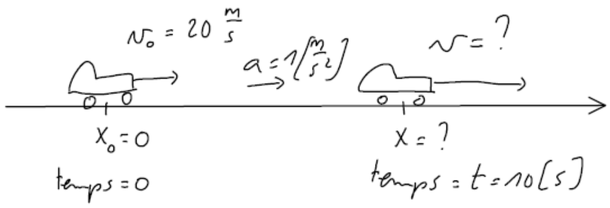


$$a = \frac{\Delta v \nearrow \left[\frac{m}{s}\right]}{\Delta t \searrow [s]} \qquad \left[\frac{\left(\frac{m}{s}\right)}{s}\right] = \left[\frac{m}{s} \cdot \frac{1}{s}\right] = \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

$$\text{MRUA : } \begin{cases} x = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + x_0 \\ v = at + v_0 \\ a = \text{constante} \end{cases}$$

<u>exemples :</u>

1) Une voiture roule à $72 [km/h]$ $\nearrow 20\left[\frac{m}{s}\right]$. Elle accélère de $a = 1\left[\frac{m}{s^2}\right]$. Quelle est sa vitesse après $10 [s]$ et quelle distance a-t-elle parcouru pendant ce temps.



$$\text{MRUA : } \begin{cases} x = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 10^2 + 20 \cdot 10 + 0 = 250 [m] \\ v = at + v_0 = 1 \cdot 10 + 20 = 30\left[\frac{m}{s}\right] \end{cases}$$

distance parcourue $= x - x_0 = 250 - 0 = 250 [m]$

2) Même question, mais après $5 [s]$.

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 5^2 + 20 \cdot 5 + 0 = 112{,}5 [m] \rightarrow \text{distance} = x - x_0 = 112{,}5 - 0 = 112{,}5 [m] \\ v = 1 \cdot 5 + 20 = 25 [m] \end{cases}$$

3) En combien de temps parcourt-elle les 50 premiers mètres ?

$$x = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0 \qquad\qquad v = at + v_0$$

$$\Rightarrow 50 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot t^2 + 20 t + 0 \quad \Big| \cdot 2 \qquad\qquad v = 1 \cdot t + 20$$

BUISSONNETS MONTANI

$\Rightarrow 100 = t^2 + 40t$

$\Rightarrow 0 = t^2 + 40t - 100$ → c'est une équation du 2ème degré

Comment résoudre une équation du 2ème degré ?

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad , \ a, b, c \in \mathbb{R}$$

- $\Delta = b^2 - 4ac$
- si $\Delta > 0$ → 2 solutions : $x_{1,2} = \dfrac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$

  si $\Delta = 0$ → 1 solution : $x = \dfrac{-b}{2a}$

  si $\Delta < 0$ → pas de solution

$a = 1 \quad b = 40 \quad c = -100$

$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = 40^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-100) = 1600 + 400 = 2000$

$\Rightarrow t_{1,2} = \dfrac{-40 \pm \sqrt{2000}}{2} = \dfrac{-40 \pm \sqrt{5 \cdot 400}}{2} = \dfrac{-40 \pm 20\sqrt{5}}{2}$

$= -20 \pm 10\sqrt{5} = \begin{cases} 2{,}36 \ [s] \\ \cancel{-42{,}36} \end{cases}$

$\Rightarrow$ il faut 2,36 [s] à la voiture pour parcourir les 50 premiers mètres

4) En combien de temps la voiture parcourt-elle les 50 mètres suivant ?

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} a t^2 + v_0 t + x_0 \\ v = at + v_0 \end{cases} \Rightarrow 100 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot t^2 + 20 \cdot t + 0$$

$\Rightarrow \frac{1}{2} t^2 + 20t - 100 = 0 \quad | \cdot 2$

$\Rightarrow t^2 + 40t - 200 = 0 \qquad ax^2 + bx + c = 0$

$$\Delta = b^2 - 4ac = 40^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-200) = 2400$$

$$\Rightarrow t_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} = \frac{-40 \pm \sqrt{2400}}{2} = \begin{cases} 4{,}49 \, [s] \\ \cancel{-44{,}49} \end{cases}$$

$\Rightarrow$ la voiture met 4,49 [s] pour parcourir les 100 premiers mètres

$\Rightarrow$ elle met donc $4{,}49 - 2{,}36 = 2{,}13$ [s] pour parcourir les 50 mètres suivant.

La vitesse moyenne :

$$\boxed{\text{vitesse moyenne} = \frac{\text{distance totale parcourue}}{\text{temps total}}}$$

si le mouvement est un MRUA on a aussi :

$$\text{vitesse moyenne} = \frac{v_{finale} - v_{initiale}}{2}$$

Exercice A

Une voiture démarre et accélère de 5 m/s^2.

a) Déterminer la fonction indiquant la position de la voiture, depuis le lieu du démarrage, par rapport au temps.
b) Déterminer la fonction indiquant la vitesse de la voiture par rapport au temps.
c) Calculer les positions de la voiture 3, 6 et 9 secondes après le démarrage.
d) Calculer les vitesses de la voiture 3, 6 et 9 secondes après le démarrage.
e) Calculer les distances parcourues par la voiture pendant les 3 premières secondes, entre la 3ème et la 6ème seconde, entre la 6ème et la 9ème seconde.
f) Calculer les variations de vitesses de la voiture pendant les 3 premières secondes, entre la 3ème et la 6ème seconde, entre la 6ème et la 9ème seconde.

La chute libre verticale

Si le mobile ne subit que l'accélération de la gravité (on dit qu'il est en chute libre), les formules deviennent :

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2}gt^2 + v_o t + x_o \\ v = gt + v_o \end{cases}$$

Où g représente l'accélération de la gravité terrestre, qui est de $9.81\ \left[\frac{m}{s^2}\right]$, valeur que l'on arrondit souvent à . $10\ \left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Remarques :

- L'accélération de la gravité est verticale et dirigée vers le bas ; suivant l'orientation de l'axe des x, g peut valoir $+10\ \left[\frac{m}{s^2}\right]$ ou $-10\ \left[\frac{m}{s^2}\right]$.
- Si la chute libre a lieu sur une autre planète que la terre, il faut prendre la valeur g associée à l'astre considéré.

Exercice B

On lance un objet vers le haut à la vitesse de 25 m/s.

a) Déterminer la fonction indiquant la position de l'objet, depuis l'endroit du lancer, par rapport au temps.
b) Déterminer la fonction indiquant la vitesse de l'objet par rapport au temps.
c) Calculer la position de l'objet 1, 2, 3 et 4 secondes après le lancer.
d) Calculer la vitesse de l'objet 1, 2, 3 et 4 secondes après le lancer.
e) Déterminer la hauteur maximale atteinte par l'objet.
f) Calculer les distances parcourues par l'objet pendant la 1ère seconde, entre la 1ère et la 2ème seconde, entre la 2ème et la 3ème seconde et entre la 3ème et la 4ème seconde.
g) Calculer les variations de vitesses de l'objet pendant la 1ère seconde, entre la 1ère et la 2ème seconde, entre la 2ème et la 3ème seconde et entre la 3ème et la 4ème seconde.

Exercice 1

Un touriste monte sur une montagne et redescend par le même chemin. A l'aller, sa vitesse est de 3 km/h. Au retour, elle est de 7 km/h. Calculer sa vitesse moyenne.
Rép. 4.2 km/h

Exercice 2

Une bille qui roule sur un plan incliné a un mouvement uniformément accéléré. Dans un cas particulier, on observe qu'une bille lâchée sans vitesse initiale sur un plan incliné franchit 0.9 m en 3 s. Calculer son accélération et la distance qu'elle franchit pendant la seconde qui suit.
Rép. 0.2 m/s^2 ; 0.7 m

Exercice 3

Une boule est lancée à une vitesse de 4 m/s, horizontalement sur le sol. Elle s'arrête après un parcours de 8 m. On suppose son mouvement uniformément accéléré.

a) Quelle est son accélération ?
b) Quelle est sa vitesse lorsqu'elle est à 2 m de son point d'arrêt ?

Rép. 1 m/s^2 ; 2 m/s

Exercice 4

Deux voitures roulent en sens inverse sur une route où le croisement est impossible. Leurs vitesses sont respectivement 36 et 54 km/h. Les conducteurs s'aperçoivent lorsque leur distance est de 30 m. Ils freinent. Leurs accélérations sont supposées constantes et ont la grandeur de 5 m/s^2. Y a-t-il collision ? Si oui, où et quand ? Et quelle est la vitesse des voitures au moment du choc ?
Rép. Oui ; 10 m ; 20 m ; 2 s ; 0 ; 5 m/s

Exercice 5

On lâche une pierre depuis le haut d'un barrage. Elle met 4 s pour arriver en bas. Quelle est la hauteur du barrage ? Et à quelle vitesse la pierre arrive-t-elle en bas ?
Rép. 80 m ; 40 m/s

Exercice 6

Un objet tombe en chute libre. Sa vitesse initiale est nulle. Calculer les distances qu'il franchit pendant chacune des 5 premières secondes.
Rép. 5 m ; 15 m ; 25 m ; 35 m ; 45 m

Exercice 7

Un corps tombant verticalement passe à la vitesse de 40 m/s devant les yeux d'un observateur.

a) Où est-il et quelle vitesse a-t-il une seconde après ?
b) Où est-il et quelle vitesse a-t-il une seconde avant ?
c) Quand se trouve-t-il à son point culminant ? Où est ce point ?
d) Quand se trouve-t-il 60 m au-dessus de l'observateur ?

Rép. 45 m ; 50 m/s, 35 m ; 30 m/s ; 4 s ; 80 m ; 2 s ; 6 s

Exercice 9

On laisse tomber un objet d'un balcon situé 20 m au-dessus du sol. Au même instant, on lance un objet depuis le sol verticalement, à la vitesse de 16 m/s.

a) Où les deux objets se croisent-ils ?
b) Combien de temps s'écoule-t-il entre leurs arrivées au sol ?

c) A quelle vitesse faudrait-il lancer l'objet depuis le sol pour que le croisement se situe à mi-hauteur entre le sol et le balcon ?

Rép. à 12.2 m du sol ; 1.2 s ; 14.1 m/s

Graphiques position-temps et vitesse-temps :

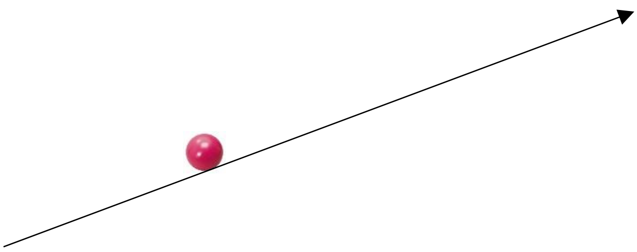
Exercice 1

Calculer la position et la vitesse de l'objet ci-dessous, pendant les 10 premières secondes de son déplacement, sachant que la voiture se déplace à la vitesse constante de 15 m/s et qu'elle se trouve au temps 0 à 30 mètres d'un arbre situé à la position 0. Dessiner les graphiques position-temps et vitesse-temps associés à ce mouvement.

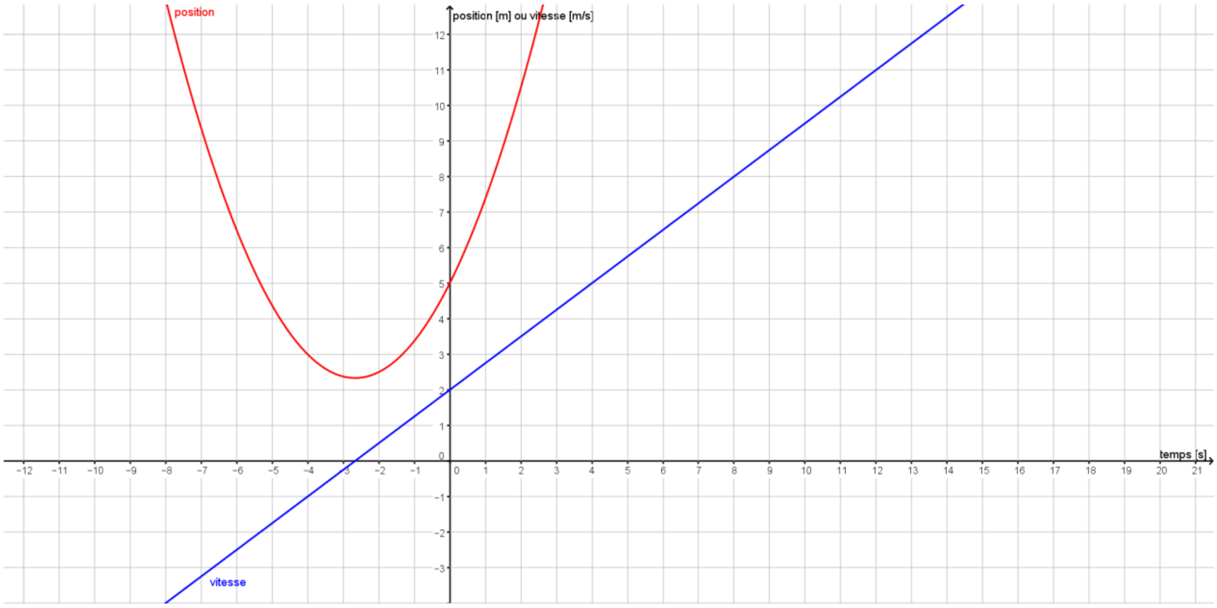
Exercice 2

Une boule, située à la position 0, roule vers le haut à la vitesse de 2 m/s sur une piste inclinée. Elle subit une décélération de 0.5 m/s^2.

a) Calculer la position et la vitesse de cette boule, pendant les 10 premières secondes de son déplacement.
b) Dessiner les graphiques position-temps et vitesse-temps associés à ce mouvement.
c) Faire de même, mais en orientant l'axe des x vers le bas.



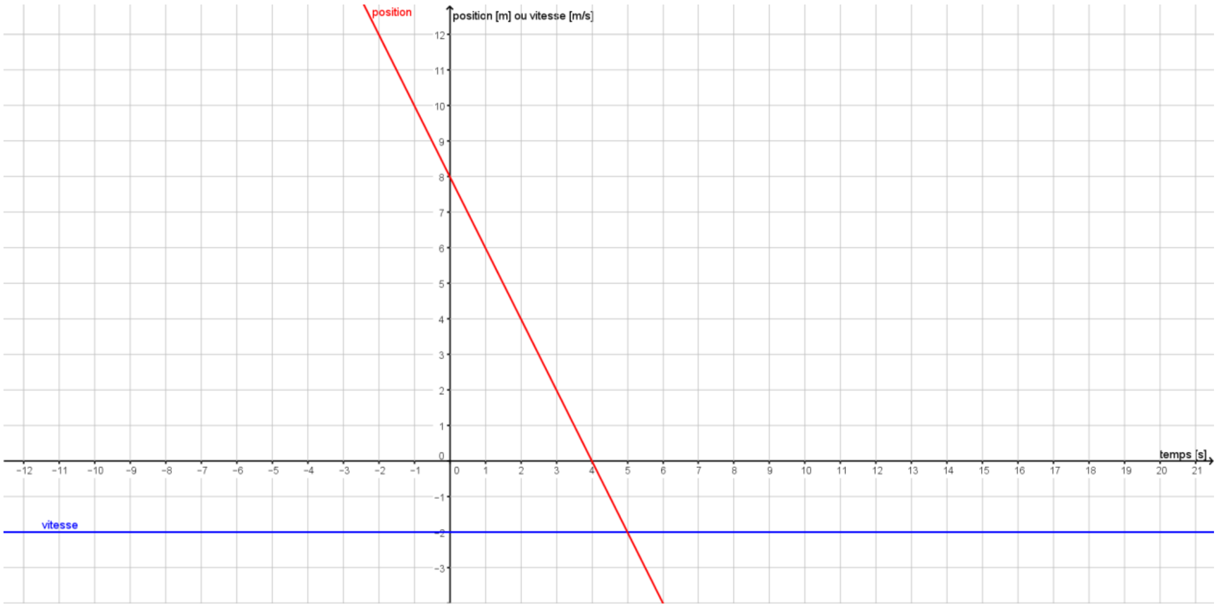
Exercice 3



Le graphique ci-dessus indique la position et la vitesse d'un objet.

a) De quel mouvement s'agit-il ?
b) Déterminer, à partir du graphique, la position, la vitesse et l'accélération de l'objet au temps 0.
c) Calculer la position et la vitesse de l'objet au temps t=2 [s].
d) Quand l'objet change-t-il de sens ? (un calcul est demandé)

Exercice 4



Le graphique ci-dessus indique la position et la vitesse d'un objet.

a) De quel mouvement s'agit-il ?

b) Déterminer, à partir du graphique, la position, la vitesse et l'accélération de l'objet au temps 0.
c) Calculer la position et la vitesse de l'objet au temps t=2 [s].

Module 4. Mécanique : cinématique (partie 2)

mouvement circulaire uniforme, période, vitesse angulaire, accélération

Ces formules sont utilisées pour décrire la trajectoire d'un mobile se déplaçant à vitesse constante sur un cercle. La vitesse est constante en grandeur, mais pas en direction : donc il y a accélération. L'accélération est dirigée vers le centre du cercle décrit par le mobile.

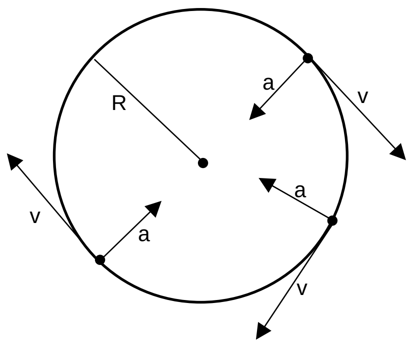
On a :

$$a = \frac{v^2}{R}$$

$$v = \omega R$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = \frac{1}{T}$$



avec

a : accélération (dirigée vers le centre du cercle) en $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

v : vitesse (constante) du mobile sur son cercle en $\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$, la vitesse est tangente au cercle

R : rayon du cercle en $[m]$

ω : vitesse angulaire du mobile en $\left[s^{-1}\right]$ (radians par seconde). C'est la quantité d'angle en radians parcourut par le mobile en 1 seconde.

f : fréquence en $\left[s^{-1}\right]$. C'est le nombre de tours parcourus par le mobile en 1 seconde. On utilise également le symbole nu (ν) pour noter la fréquence.

T : période en [s]. C'est le temps que met le mobile pour faire un tour.

Exercice 1

Un train ayant un mouvement uniforme met 10 s pour parcourir un trajet assimilable à un arc de cercle de 30° et de 480 m de rayon. Calculer sa vitesse en km/h et son accélération.
Rép. 90.5 km/h ; 1.32 m/s^2

Exercice 2

Un pilote d'avion effectue un virage circulaire horizontal avec une accélération centripète de module 5g. Si le module de la vitesse de l'avion est égal à Mach 2 (deux fois la vitesse du son, qui vaut 340 m/s), quel est le rayon du virage ?
Rép : 9.44 km (g=9.8 m/s^2)

Exercice 3

Calculer l'accélération d'un point de la terre, de latitude φ = 47°. La terre sera assimilée à une boule de rayon R = 6370 km, ayant une période de révolution T = 23h56min4s.
Rép. 0.023 m/s^2

Exercice 4

Une station spatiale de forme torique a un rayon extérieur de 1 [km]. Quelle doit être sa période rotation pour qu'une personne située sur le bord extérieur soit soumise à une accélération de g/5 (g=9.8 m/s^2) ?
Rép. 142 [s]

Exercice 5

Dans un pendule conique, une masse suspendue à l'extrémité d'un fil décrit un cercle horizontal. Le module de sa vitesse est de 1.21 [m/s]. Si la longueur du fil est de 1.2 [m] et qu'il fait un angle de 20° avec la verticale, trouvez l'accélération de la masse.
Rép. 3.57 [m/s^2]

Exercice 6

Une particule en mouvement sur une trajectoire circulaire de circonférence de 8 [m] fait 5 tours par seconde. Quelle est son accélération centripète ?
Rép. $1.25 \cdot 10^3$ [m/s^2]

Module 5. Mécanique : dynamique (partie 1)

5.1 Masse

La masse se mesure en [kg]. C'est une grandeur proportionnelle à la quantité de matière composant un objet. Cette grandeur dépend également du type de matière considérée. Attention, il ne faut pas confondre la masse [kg] avec le poids [N] qui est une force. La masse est constante (pour la physique classique) alors que le poids est variable et dépend de la gravité.
La masse est une grandeur scalaire (uniquement caractérisée par sa valeur).
En principe la masse est donnée lors d'un exercice. Si ce n'est pas le cas, on peut la trouver à l'aide de la masse volumique.

<u>Masse volumique</u> :

La masse volumique d'une substance est la masse [kg] contenue dans 1 [m³] de cette substance.
La masse volumique est notée ρ (rho).

On a : $\rho = \frac{m}{V}$ donc $m = \rho \cdot V$ ou $V = \frac{m}{\rho}$

avec

ρ : masse volumique en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$. Cette grandeur dépend de la matière composant l'objet, et de l'état dans lequel se trouve cette matière (solide, liquide ou gaz). On trouve cette valeur dans le formulaire entre les pages 166 à 173, colonnes 2 (état solide), 3 (état liquide) et 4 (état gazeux).

m : masse de l'objet en [kg]

V : volume de l'objet en [m^3]

Quelques exemples :

1) Quelle est la masse d'un cube d'ébène de 5 [cm] de côté ?
2) Quelle masse y a-t-il dans 1 litre d'alcool ?
3) Quel est le volume occupé par 10 [kg] d'or ?
4) Quelle est la masse volumique d'une substance de 300 [g] occupant un volume de 1 [dl] ?

1) cube : $V = 0{,}05^3 = 1{,}25 \cdot 10^{-4}\ [m^3]$

$$\rho_{\text{ébène}} = 1200 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

$$\Rightarrow m = \rho_{\text{ébène}} \cdot V = 1200 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-4} = 0{,}15\ [kg] = 150\ [g]$$

2) $\rho_{alcool} = 790 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$$V = 1\ [\text{litre}] = 1\ [dm^3] = 10^{-3}\ [m^3]$$

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho \cdot V = 790 \cdot 10^{-3} = 0{,}79\ [kg] = 790\ [g]$$

3) $m = 10\ [kg]$

$$\rho_{or} = 19'300 \left[\frac{kg}{m^3}\right] \Rightarrow V = \frac{m}{\rho} = \frac{10}{19300} = 5{,}18 \cdot 10^{-4}\ [m^3] \xrightarrow{\cdot 10^6} = 518\ [cm^3]$$

4) $m = 300\ [g] = 0{,}3\ [kg]$

$$V = 1\ [dl] = 0{,}1\ [l] = 0{,}1\ [dm^3] = 0{,}1 \cdot 10^{-3}\ [m^3]$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0{,}3}{0{,}1 \cdot 10^{-3}} = 3000 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Exercice 1

Un fil de cuivre a une longueur de 250 m et une masse de 30 kg. Quel est son diamètre ?
Rép. 4.14 mm

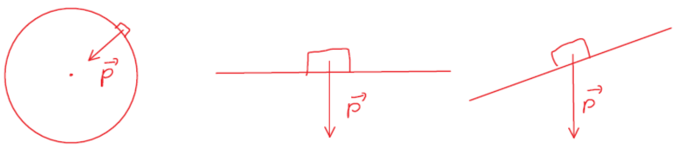
5.2 Forces

Force : toute cause capable de faire varier la vitesse d'un corps

- c'est une grandeur vectorielle caractérisée par
  - grandeur, valeur, module
  - direction
  - sens
- unité : Newton [N] $1\,[N] = 1\left[\frac{kg \cdot m}{s^2}\right]$

<u>Quelques forces :</u>

- le poids : c'est une force exercée par l'astre sur lequel l'objet est posé. Elle est due à la gravité de l'astre et est toujours dirigée vers le centre de l'astre.



$P = m \cdot g$ avec m = masse de l'objet en [kg]

g = gravité en $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ (c'est une accélération)

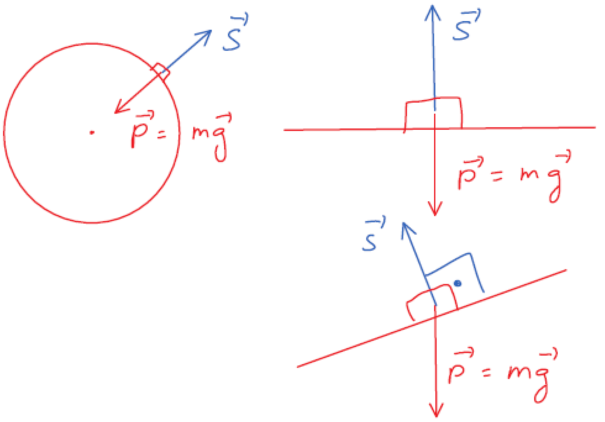
sur terre $g = 9{,}81\left[\frac{m}{s^2}\right] \cong 10\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\boxed{⚠\ P \neq m}$ poids ≠ masse

- la force de soutien : c'est la force de réaction au poids exercé par le sol sur lequel est posé l'objet
  ↓
  ou force normale

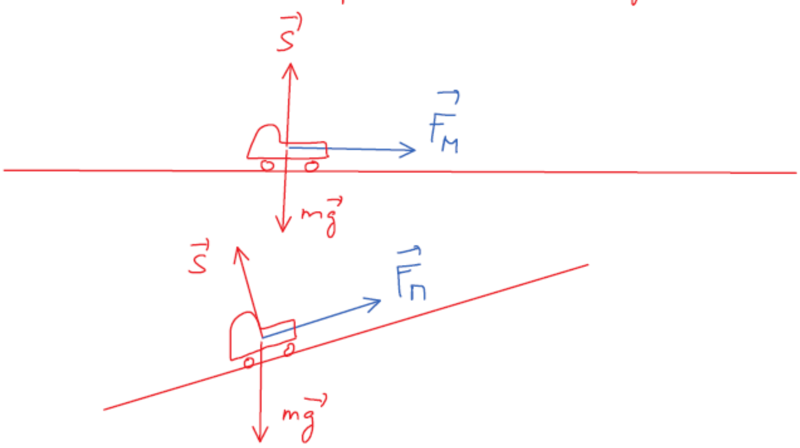
Notation : la force de soutien est notée $\vec{S}$ ou $\vec{F}_N$

La force de soutien est perpendiculaire au sol sur lequel l'objet est posé et est dirigée vers le haut.

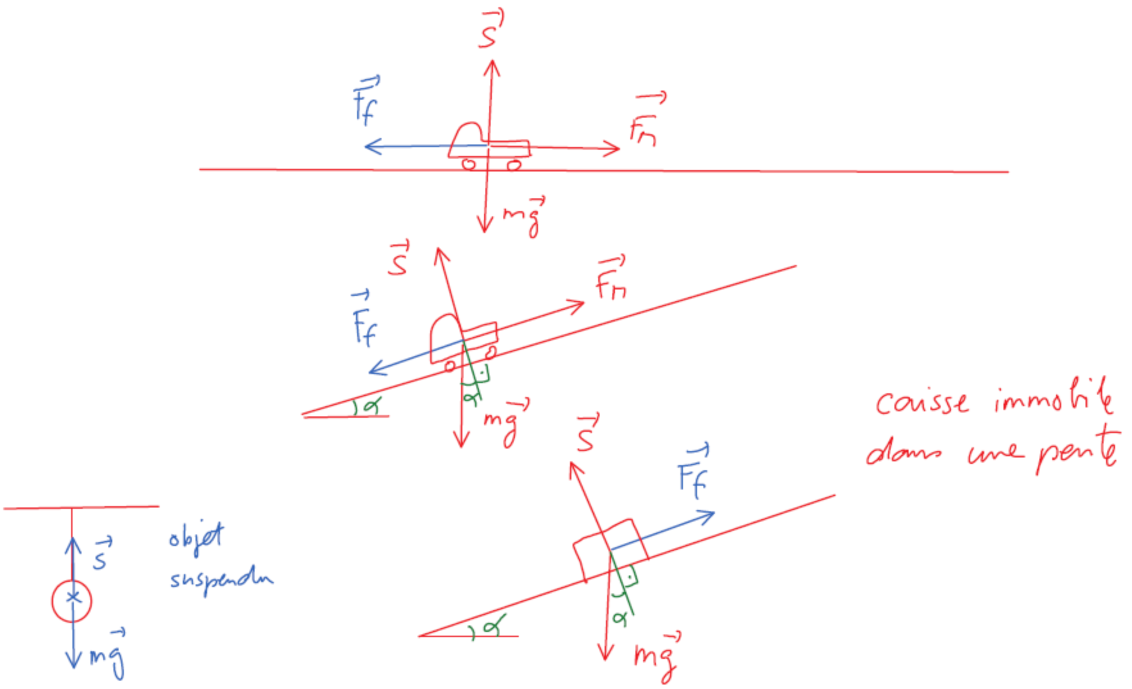


- La force motrice : force exercée par un moteur ou des muscles, ...

Cette force est en principe dirigée dans la direction et le sens de déplacement de l'objet.



- La force de frottement : due au contact entre l'objet et le sol ou l'air. Cette force est opposée au déplacement ou, si l'objet est immobile, dirigée dans le sens qui empêche l'objet de glisser. On la note : $\vec{F_f}$



Il se peut que le frottement soit négligé dans certains exercices.

- Force exercée par un ressort :

$F = kd$

avec

F	:	force exercée par le ressort en [N]
k	:	constante du ressort en [N/m]
d	:	déformation du ressort en [m]

5.3 lois de Newton

Première loi de Newton :

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

avec

$\sum \vec{F}$: somme des forces exercées sur l'objet

m : masse de l'objet en [kg]

$\vec{a}$: accélération que l'objet subit, suite à l'action cumulée de toutes les forces

1ère loi de Newton : → résultante des forces = force unique qui a le même effet que toutes les autres

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

$$\vec{F_1} + \vec{F_2} + \vec{F_3} + \ldots = m \cdot \vec{a}$$

$$\boxed{m\vec{g} + \vec{S} + \vec{F_n} + \vec{F_f} = m \cdot \vec{a}}$$

At terrestre, F soutien, F motrice, F frottement

si l'objet est en équilibre (de translation) on a :

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$

$$\boxed{m\vec{g} + \vec{S} + \vec{F_n} + \vec{F_f} = \vec{0}} \Rightarrow \vec{a} = \vec{0} \quad \text{c'est la condition d'équilibre}$$

→ immobile
→ mru

C'est une équation vectorielle, pour résoudre l'exercice il faut introduire un système d'axes X et Y (avec les axes perpendiculaires et parallèles au maximum de forces) et décomposer chaque force non parallèle ou perpendiculaire aux axes en composantes horizontale (parallèle à l'axe X) et verticale (parallèle à l'axe Y). On décompose ensuite la loi de Newton en :

$$\sum F_x = ma_x \quad \text{et} \quad \sum F_y = ma_y$$

avec

$\sum F_x$: somme des composantes dirigées selon l'axe X des forces exercées sur l'objet

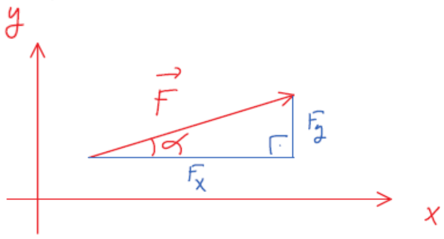
$\sum F_y$: somme des composantes dirigées selon l'axe Y des forces exercées sur l'objet

a_x : composante dirigée selon l'axe X de l'accélération

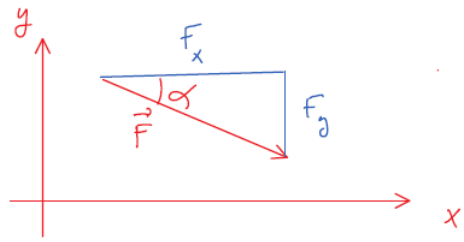
a_y : composante dirigée selon l'axe Y de l'accélération

C'est un système d'équations qu'il faut résoudre

<u>Exemples de décompositions de quelques forces selon les axes X et Y (on parle aussi de composantes de ces forces sur les axes X et Y)</u> :



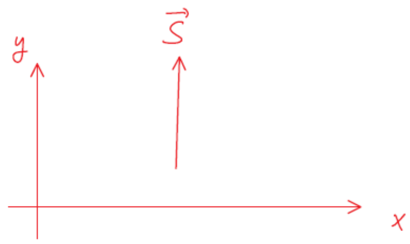
$$\begin{cases} F_x = F \cdot \cos \alpha \\ F_y = F \cdot \sin \alpha \end{cases}$$



$$\begin{cases} F_x = F \cos \alpha \\ F_y = -F \sin \alpha \end{cases}$$

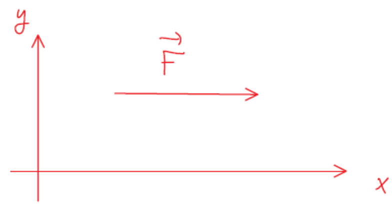
Attention ! Le signe des composantes est important :

- La composante d'une force allant dans le même sens que l'axe est positive, sinon elle est négative.

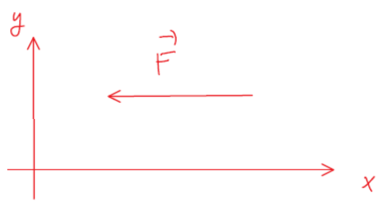


$$\begin{cases} S_x = 0 = S \overbrace{\cos 90}^{=0} \\ S_y = S = S \underbrace{\sin 90}_{=1} \end{cases}$$

Attention ! La composante d'une force, sur un axe dont elle est perpendiculaire, est nulle.



$$\begin{cases} F_x = F = F \cdot \overbrace{\cos 0}^{=1} \\ F_y = 0 = F \cdot \underbrace{\sin 0}_{=0} \end{cases}$$



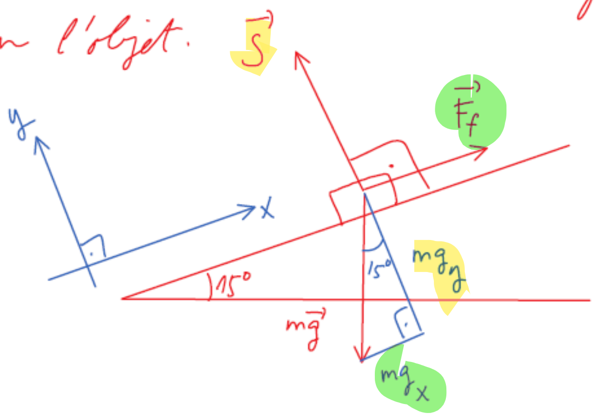
$$\begin{cases} F_x = -F = F \cdot \overbrace{\cos 180}^{=-1} \\ F_y = 0 = F \cdot \underbrace{\sin 180}_{=0} \end{cases}$$

exemple: un objet de 5 [kg] est immobile sur une pente formant un angle de 15° par rapport à la verticale.

1) Faire un schéma indiquant les forces agissant sur l'objet

2) Trouver les forces de soutien et de frottement agissant sur l'objet.

1)



2) $m\vec{g} + \vec{S} + \vec{F_f} = \vec{0}$

Sin ou Cos, faire par l'absurde
angle = 0 => F frottement = 0
=> gravitation = F soutien

sur x: $-mg\sin 15° + 0 + F_f = 0 \Rightarrow F_f = mg\sin 15$

sur y: $-mg\cos 15° + S + 0 = 0 \Rightarrow S = mg\cos 15$

$$\Rightarrow \begin{cases} F_f = 5 \cdot 10 \cdot \sin 15 = 12{,}94\ [N] \\ S = 5 \cdot 10 \cdot \cos 15 = 48{,}29\ [N] \end{cases}$$

Exercice 2 a^2 = b^2 + c^2 -2bc.Cos de l'angle . Théorème d'Al Kashi (a^2 <> a carré)
a = racine carrée de (144 + 25 + 0)

Deux forces perpendiculaires ont pour grandeur 5 et 12 N. Déterminer la grandeur de leur résultante et l'angle qu'elle fait avec la force de 12 N.
Rép. 13 N ; 22.6° ArcCos (12/13) = 22.6°

Exercice 3

Une locomotive de 100 tonnes remorque un wagon de 30 tonnes. Au départ, le convoi a une accélération constante. On observe qu'il met 25 s pour atteindre la vitesse de 36 km/h. La force de frottement sur le wagon étant estimée à 5000 N, calculer la force exercée par le crochet sur le wagon.
Rép. 17000 N Vf = 10m/seconde, Wagon 30 000 kg Temps = 25sec

Fmotrice = Facceleration (ma) + Force frottement (5000 N) Vf = V0 + at => a = Vf - V0 / t => 10/25 = 0.4

Force motrice = 30000 * 0.4 + 5000 = 12000 +5000 = 17000

1 Km/h = 0.27777.. m/sec (1000/3600)

Exercice 4 vf^2=vi^2+2ax vit finale = v initiale + 2*accélération*déplacement.

Un camion de 3 tonnes roule à la vitesse de 72 km/h sur une route horizontale. Quelle force constante faut-il lui appliquer pour l'arrêter sur une distance de 100 m ?
Rép. 6000 N

(vf^2-Vi^2)/2x=a 400-0/200 = 2 F = ma = 3000 . 2 = 6000

Exercice 5 a^2 = b^2 + c^2 -2bc.Cos de l'angle . Théorème d'Al Kashi (a^2 <> a carré)

Un objet de 2 kg est suspendu à une poutre par deux fils perpendiculaires l'un à l'autre. L'un d'eux fait un angle de 30° avec l'horizontale. Calculer les forces de traction des deux fils.
Rép. 10 N ; 17.3 N

Exercice 6

Une planche a 2 m de long. Une de ses extrémités repose sur le sol. L'autre est fixée au bord d'une table de 80 cm de haut. Un petit wagon descend le long de cette planche. Il part de l'extrémité supérieure avec une vitesse initiale nulle.

a) Combien de temps met-il pour arriver au sol ?
b) A quelle vitesse y arrive-t-il ?
Rép. 1 s ; 4 m/s

angle = 24°
a = 10.sin24° (10 = gravité)
x = vi +1/2.a.t^2 (v initiale = 0)
t = (2*2/4)^0.5 racine carrée
T = 1 sec
Vf = Vi + a*t = 0+4*1 = 4m/s

Exercice 7

Une voiture de masse m = 1200 kg monte à vitesse constante une côte d'inclinaison □□= 5.7°. Elle subit une force de frottement F = 300 N.

a) Calculer la force de propulsion.
b) Calculer l'accélération de la voiture si le conducteur débraye.
Rép. 1500 N ; 1.25 m/s^2

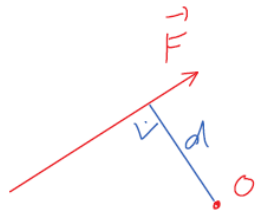
2ème loi de Newton : moments de forces

Un moment de force est une grandeur indiquant l'effet de la force par rapport à une rotation autour d'un point de référence. On définit le moment d'une force par :

$M = F \cdot d$ avec

M	:	moment de la force F en $[Nm]$
F	:	force en $[N]$
d	:	bras de levier en $[m]$, c'est-à-dire la distance mesurée perpendiculairement entre le point de référence et le support de la force F (droite passant par F)

Définition : moment d'une force → permet de mesurer l'efficacité d'une force par rapport à une rotation



$$M_{\vec{F}} = \underset{[N]}{F} \cdot \underset{[m]}{d}$$

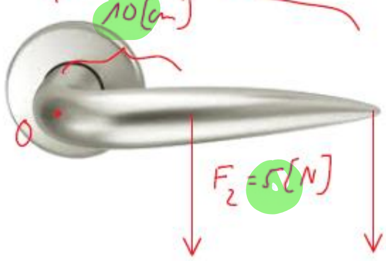
$M_{\vec{F}}$ → $[N \cdot m]$

d ↳ distance entre O et la droite passant par $\vec{F}$

exemple :

20 [cm]

10 [cm]



$M_{F_1} = F_1 \cdot d = 5 \cdot 0{,}2 = 1 [Nm]$

$M_{F_2} = F_2 \cdot d = 5 \cdot 0{,}1 = 0{,}5 [Nm]$

Condition d'équilibre de rotation :

Pour un objet en équilibre de rotation, la somme des moments des forces faisant tourner l'objet dans un sens autour du point de référence est égale à la somme des moments des forces faisant tourner l'objet dans l'autre sens (l'effet des forces qui auraient tendance à faire tourner l'objet dans un sens autour du point de référence est compensé par l'effet des forces qui le feraient tourner dans l'autre sens, puisque l'objet est en équilibre)

2ème loi de Newton :

Si une objet est en équilibre de rotation alors :

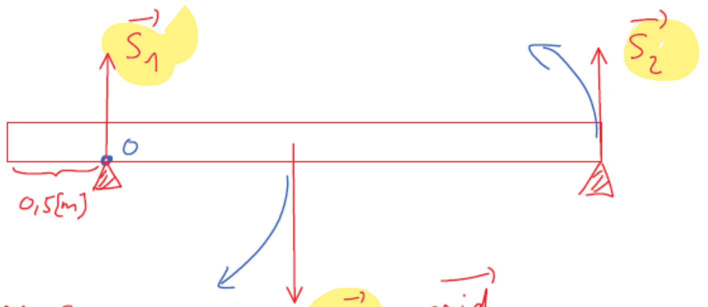
$$M_{\circlearrowright} = M_{\circlearrowleft}$$

somme des moments des forces faisant tourner l'objet dans le sens horaire autour d'un point O

somme des moments des forces faisant tourner l'objet dans le sens anti-horaire autour d'un point O

Remarque : le point de référence peut-être choisi arbitrairement, mais il est préférable de le placer à l'extrémité d'une force inconnue, ce qui nous diminue le nombre d'inconnue dans l'équation.

exemple :



$\vec{mg} = \vec{\text{poids}}$

planche : $m = 20\,[kg]$

$l = 2\,[m]$

Que valent S_1 et S_2

Newton 1 : $\vec{S_1} + \vec{S_2} + \vec{mg} = \vec{0}$

sur y : $S_1 + S_2 - mg = 0 \Rightarrow S_1 + S_2 = mg$

sur x : $0 + 0 + 0 = 0$

Newton 2 : $M_D = M_G$

$$M_{mg} = M_{S_2}$$

$$\Rightarrow mg \cdot 0{,}5 = S_2 \cdot 1{,}5$$

$$\Rightarrow 20 \cdot 10 \cdot 0{,}5 = S_2 \cdot 1{,}5$$

$$\Rightarrow 100 = S_2 \cdot 1{,}5$$

$$\Rightarrow S_2 = \frac{100}{1{,}5} = 66{,}\overline{6}\,[N]$$

Newton $\Rightarrow S_1 + S_2 = 200 \Rightarrow S_1 = 200 - S_2 = 200 - 66{,}\overline{6}$

$$= 133{,}\overline{3}\,[N]$$

Autre exemple :

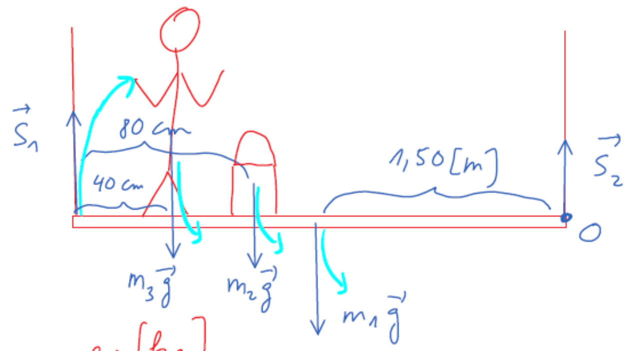


planche : masse = 20 [kg]
longueur = 3 [m]

peintre : masse = 70 [kg]
il se trouve à 40 [cm] du bord gauche de la planche

pot de peinture : 10 [kg] , il se trouve à 80 [cm] du bord gauche

Calculer la force exercée par chacun des câbles de soutènement.

Newton 1: $\vec{S}_1 + \vec{S}_2 + m_1\vec{g} + m_2\vec{g} + m_3\vec{g} = \vec{0}$

sur y : $S_1 + S_2 - m_1 g - m_2 g - m_3 g = 0 \Rightarrow S_1 + S_2 = m_1 g + m_2 g + m_3 g$

$\Rightarrow S_1 + S_2 = 20 \cdot 10 + 10 \cdot 10 + 70 \cdot 10 = 1000\ [N]$ (*)

Newton 2: $M_{\circlearrowright} = M_{\circlearrowleft}$

$\Rightarrow M_{\vec{S}_1} = M_{m_1\vec{g}} + M_{m_2\vec{g}} + M_{m_3\vec{g}}$

$\Rightarrow S_1 \cdot 3 = m_1 \cdot g \cdot 1{,}5 + m_2 g \cdot \underbrace{2{,}2}_{3-0{,}8} + m_3 g \cdot \underbrace{2{,}6}_{3-0{,}4}$

$\Rightarrow S_1 \cdot 3 = 20 \cdot 10 \cdot 1{,}5 + 10 \cdot 10 \cdot 2{,}2 + 70 \cdot 10 \cdot 2{,}6$

$\Rightarrow S_1 = \dfrac{300 + 220 + 1820}{3} = 780\ [N]$

(*) $\Rightarrow S_2 = 1000 - 780 = 220\ [N]$

3ème loi de Newton : action et réaction

Si un corps A exerce une force sur un corps B, alors le corps B exerce une force opposée de même grandeur sur le corps A.

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

Exercice 8

Une barre de fer de 60 kg repose horizontalement sur deux appuis. Elle a une longueur de 3.5 m. Les appuis sont respectivement à 50 cm et à 1 m des extrémités. Calculer les forces qui la soutiennent.
Rép. 225 N ; 375 N

Exercice 9

Une balance est constituée d'une tige dont la masse vaut 200 g et la longueur 50 cm. Cette tige peut tourner autour d'un axe horizontal situé au dixième de sa longueur. A l'extrémité du petit bras est suspendu un plateau de 850 g. Sur le long bras coulisse un contrepoids de 125 g. Ce bras est gradué, et la position du contrepoids qui réalise l'équilibre renseigne sur la masse d'un objet placé dans le plateau.

a) A quelle distance de l'axe faut-il placer la graduation zéro ?
b) Quelle distance y a-t-il entre les graduations 0 et 100 g ?
c) Quelle est la plus grande masse qui peut être mesurée avec cette balance ?
Rép. 2 cm ; 4 cm ; 1.075 kg

Module 6. Mécanique : dynamique (partie 2)

6.1 force de gravitation

Deux astres de masses M et m éloignés d'une distance d exercent l'un sur l'autre une force appelée force de gravitation :

Force de gravitation :

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{d^2}$$

↓

Force avec laquelle 2 masses s'attirent [N]

G = constante universelle de gravitation $= 6,67 \cdot 10^{-11}$

M = masse de l'objet 1 en [kg]

m = masse de l'objet 2 en [kg]

d = distance entre les centres des objets en [m]

Exemple : Quelle est la force de gravitation liant la terre et la lune

$M_{Terre} = 5,97 \cdot 10^{24}$ [kg]

$M_{Lune} = 7,35 \cdot 10^{22}$ [kg]

d = distance terre-lune $= 3,84 \cdot 10^{8}$ [m]

$$F = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \cdot 7,35 \cdot 10^{22}}{(3,84 \cdot 10^{8})^2} = 1,98 \cdot 10^{20} \text{ [N]}$$

Force exercée par la terre sur un objet de masse m posé sur sa surface :

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{d^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} \cdot m}{6'370'000^2}$$

$g = 9,81 \cong 10 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\hookrightarrow d = R_{Terre} = 6370 [km] = 6'370'000 [m]$

$\Rightarrow F = m \cdot 9,81 = mg = \text{poids}$

Remarque : la formule entourée en bleu ci-dessus et reproduite ci-dessous permet de calculer la gravité à une distance d du centre d'un astre de masse M :

$$g = \frac{GM}{d^2}$$

ex : Quelle est la gravité et le poids d'un objet de 70 [kg] à 200 [km] de la surface terrestre ?

a) $g = \frac{GM}{d^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24}}{6'570'000^2} = 9,23 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\hookrightarrow 200 + 6370 = 6'570 [km] = 6'570'000 [m]$

b) $\text{poids} = mg = 70 \cdot 9,23 = 645,7 [N]$

Exercice 1

On a deux boules de plomb dont les diamètres valent respectivement 2 et 16 cm. Il y a entre elles un espace vide de 1 cm. Calculer la force d'attraction exercée par une boule sur l'autre.
Rép. $7.65 \cdot 10^{-9}$ N

Exercice 2

Calculer l'accélération d'un objet qui se trouve au milieu du segment terre-lune.
Rép. $1.07 \cdot 10^{-2}$ m/s^2

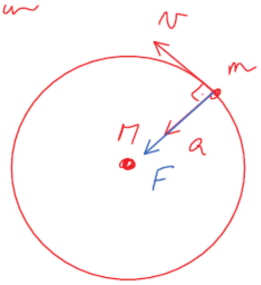
Exercice 3

On imagine une petite planète constituée par une boule de 100 m de rayon faite d'une matière dont la masse volumique est de 4 kg/dm^3.
a) quel serait le poids d'un habitant de cette planète si sa masse était de 60 kg ?
b) quel temps mettrait un objet pour tomber d'une hauteur de 5 m, sa vitesse initiale étant nulle ?
Rép. 0.00672 N ; 299 s

Période de révolution et vitesse d'un satellite en orbite circulaire à une distance R d'un astre de masse M :

Période de révolution : T = durée d'un tour

vitesse du satellite : v



MCU : 1) $a = \frac{v^2}{R} \rightarrow v = \sqrt{aR}$

2) $v = \omega R \rightarrow \omega = \frac{v}{R}$

3) $\omega = 2\pi f \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi}$

4) $f = \frac{1}{T}$

Force de gravitation : 5) $F = \frac{GMm}{R^2}$

Loi de Newton : 6) $F = ma$

$$\frac{GM\cancel{m}}{R^2} = \cancel{m}a \Rightarrow a = \frac{GM}{R^2} \quad 7)$$

$$4) \Rightarrow T = \frac{1}{f} \overset{3)}{\Rightarrow} T = \frac{1}{\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)} = \frac{2\pi}{\omega} \overset{2)}{\Rightarrow} T = \frac{2\pi}{\left(\frac{v}{R}\right)} = 2\pi \cdot \frac{R}{v} = \frac{2\pi R}{v}$$

$$\overset{1)}{\Rightarrow} T = \frac{2\pi R}{\sqrt{aR}}$$

$$\overset{7)}{\Rightarrow} T = \frac{2\pi R}{\sqrt{\frac{GM}{R^{\cancel{2}}}\cancel{R}}} = \frac{2\pi R}{\sqrt{\frac{GM}{R}}} = 2\pi R\sqrt{\frac{R}{GM}} = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}$$

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}}$$

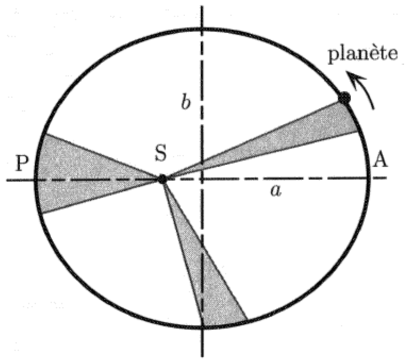
$$1) \Rightarrow v = \sqrt{aR} \overset{7)}{\Rightarrow} v = \sqrt{\frac{GM}{R^2}R} \Rightarrow \boxed{v = \sqrt{\frac{GM}{R}}}$$

BUISSONNETS
MONTANI

Exercice 4

Calculer le temps de révolution et la vitesse d'un satellite décrivant une trajectoire circulaire autour de la lune, à une altitude de 100 km au-dessus de sa surface.
Rép. 1.64 km/s ; 1h58min

<u>Lois de Kepler (tirées du formulaire)</u> :

Lois de Kepler		
Grandeur physique **Intitulé de la loi**	**Formule**	**Remarques, figures**
Forme empirique (observationnelle) :		
1. Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers		
2. La vitesse orbitale d'une planète varie de façon que le rayon-vecteur Soleil-planète balaye des aires égales en des temps égaux		 A : aphélie (point le plus éloigné du Soleil) P : périhélie (point le plus proche du Soleil) a : demi-grand axe b : demi-petit axe
3. Les périodes des planètes et leurs demi-grands axes sont dans un rapport sesquilatère Pour deux planètes A et B : 3e loi tirée de la loi de la gravitation universelle (forme déduite) :	$\frac{{a_A}^3}{{T_A}^2} = \frac{{a_B}^3}{{T_B}^2}$ $\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M+m)$	a : demi-grand axe de l'orbite (m) T : période orbitale (s) G : constante universelle de gravitation $(G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \mathrm{N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}})$ M : masse du Soleil (kg) m : masse planétaire (kg)

6.2 force et mouvement circulaire

Un mobile en mouvement circulaire uniforme subit une accélération dirigée vers le centre du cercle. Cette accélération se traduit par une force qui agit sur l'objet : la force centripète. L'objet lui-même subit une force de réaction opposée à la force centripète : c'est la force centrifuge. Ces deux forces sont égales en grandeur :

$$F_{centripète} = F_{centrifuge} = ma = m\frac{v^2}{R}$$

Exercice 5

La cage d'une essoreuse a un diamètre intérieur de 50 cm. Elle tourne à raison de 10 tours par seconde. Un objet ayant une masse de 100 g se trouve dans la machine. Que vaut la force exercée par la cage sur l'objet ? On néglige la pesanteur. Rép. 98.7 N

Exercice 6

Un skieur de 60 kg passe à une vitesse de 60 km/h sur une bosse, puis dans une dépression dont les rayons de courbure mesurent 35 m. Calculer la force de soutien exercée par la neige lorsque le skieur est au sommet de la bosse et lorsqu'il est au fond de la dépression.
Rép. 124 N ; 1076 N

Exercice 7

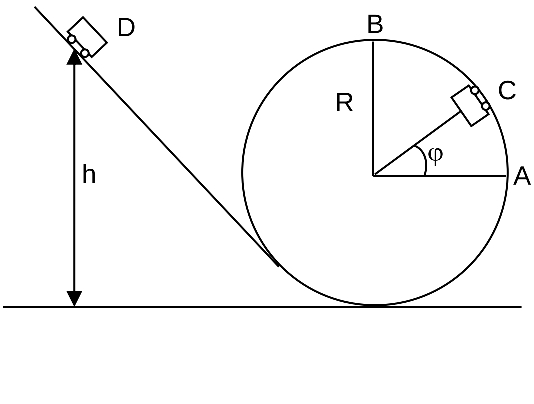
Une voiture roule à une vitesse de grandeur v = 100 km/h. Elle se trouve dans un virage dont le rayon de courbure est R = 400 m. La route est parfaitement verglacée, mais l'angle qu'elle fait avec le plan horizontal est tel que la voiture passe sans encombre. Calculer cet angle.
Rép. 10.9°

Exercice 8

Un wagonnet de masse m roule sans frottement sur la piste en colimaçon représentée ci-contre. Le rayon de la boucle vaut R. Le mobile part avec une vitesse initiale nulle d'un point situé à une hauteur h au-dessus du point le plus bas de la boucle. Lorsque le wagonnet est dans la boucle, on repère sa position à l'aide de l'angle φ indiqué par le dessin. Si la hauteur h est assez grande, le wagonnet suit la piste sans encombre. Si h est trop faible, le mobile quitte la piste entre A et B. Si h est encore plus faible, le wagonnet n'atteint même pas le point A.

a) Calculer la force exercée par la piste sur le wagonnet au point C, en fonction de sa vitesse en ce point.

b) A quelle condition la vitesse en C doit-elle satisfaire pour que le wagonnet parvienne effectivement en ce point ?



Rép. $\frac{mv^2}{R} - mg\sin\varphi$; $v \geq \sqrt{Rg\sin\varphi}$

Exercice 9

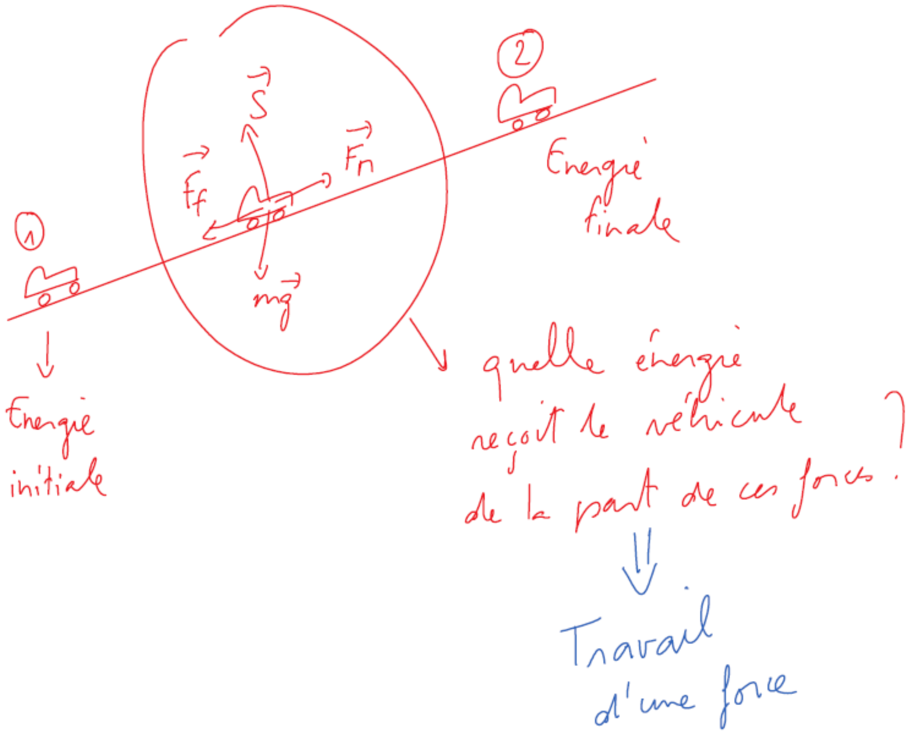
Une route a un rayon de courbure de 60 m. Le bord extérieur est relevé de sorte que la route a une inclinaison de 15° dans le sens transversal. La ligne médiane de la route est un cercle dans un plan horizontal. On admet que les pneus des voitures ont un coefficient de frottement statique de 0.5. Quelle est la vitesse maximale à laquelle une voiture peut rouler sans déraper ?

Rép. 83 km/h

Module 7. Mécanique : dynamique (partie 3)

Travail et énergie

Exemple introductif : un véhicule se déplace d'une position 1 vers une position 2, en subissant les forces indiquées sur le schéma ci-dessous :



L'énergie que chaque force amène ou fait perdre au véhicule est ce qu'on appelle le travail de cette force.

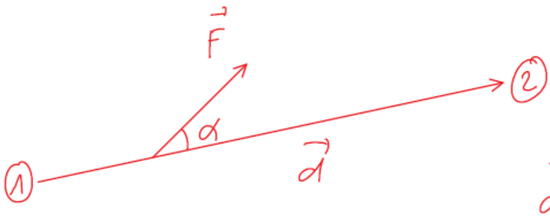
L'énergie se mesure en Joules [J]

$$1\,[J] = 1\,[N \cdot m] = 1\,[N] \cdot 1\,[m]$$

= énergie d'une force de 1[N] exercée sur 1 [m]

par exemple pour soulever une plaque de beurre de 100[g] d'une hauteur de 1[m], il faut exercer une force de $1\,[N]$ = poids = $mg = 0{,}1 \cdot 10 = 1\,[N]$ sur 1[m]

Travail d'une force : c'est l'énergie qu'une force apporte ou enlève à un objet se déplaçant d'une position ① à une position ②.



$\vec{d}$: déplacement de l'objet

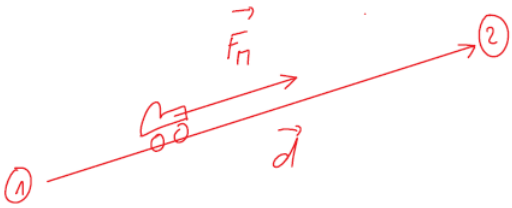
définition générale

$$\boxed{A_{12}(\vec{F}) = F \cdot d \cdot \cos\alpha}$$

A_{12} : travail en [J] de la force $\vec{F}$ entre le point 1 et le point 2
F : force en [N] (constante)
d : distance en [m] séparant le point 1 et le point 2
α : angle entre la force $\vec{F}$ et le vecteur $\vec{d}$ reliant le point 1 au point 2

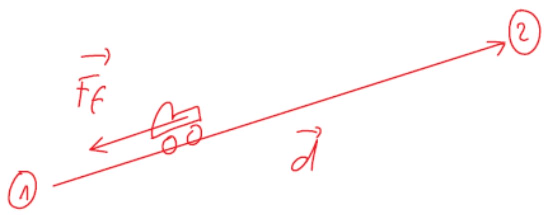
Cas particuliers:

1°) F est une force motrice, dirigée dans le même sens que le déplacement



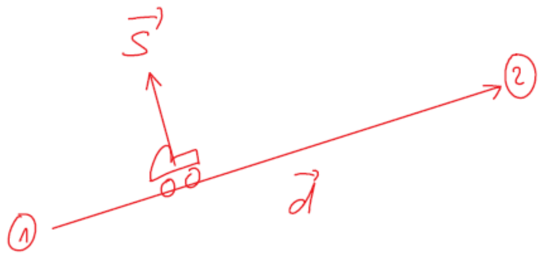
$$A_{12}(\vec{F_M}) = F_M \cdot d \cdot \underbrace{\cos 0°}_{=1} = F_M \cdot d \Rightarrow \boxed{A_{12}(\vec{F_M}) = F_M \cdot d}$$

2°) F est une force de frottement, dirigée dans le sens opposé au déplacement



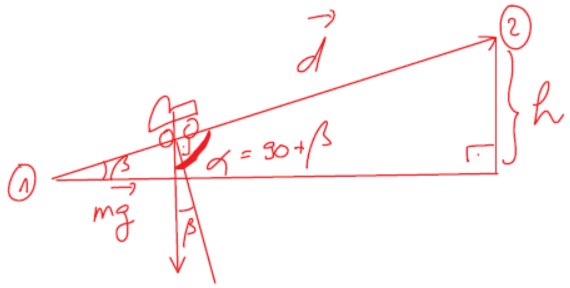
$$A_{12}(\vec{F_f}) = F_f \cdot d \cdot \underbrace{\cos 180°}_{=-1} = -F_f \cdot d \Rightarrow \boxed{A_{12}(\vec{F_f}) = -F_f \cdot d}$$

3°) F est une force de soutien, perpendiculaire au déplacement :



$$A_{12}(\vec{S}) = S \cdot d \cdot \underbrace{\cos 90°}_{=0} = 0 \Rightarrow \boxed{A(\vec{S}) = 0}$$

4°) F est un poids (vertical, dirigé vers le bas)



$\sin\beta = \frac{h}{d}$

$\Downarrow$

$h = d \cdot \sin\beta$

$$A_{12}(m\vec{g}) = mg \cdot d \cdot \cos\alpha = mg \cdot d \cdot \cos(90+\beta)$$
$$= mg \cdot d \cdot (-\sin\beta) \quad \text{(cf. formulaire)}$$
$$= mg \cdot \cancel{d} \cdot \left(-\frac{h}{\cancel{d}}\right)$$
$$= -mgh \quad (h = \text{dénivellation})$$

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{si l'objet monte : } A_{12}(m\vec{g}) = -mgh \\ \text{si l'objet descend : } A_{12}(m\vec{g}) = mgh \end{array}}$$

5°) Travail effectué par un ressort :

Le travail nécessaire pour comprimer un ressort est donné par :

$$A = \frac{1}{2}kd^2$$

avec

A : travail en [J]

k : constante du ressort en $\left[\frac{N}{m}\right]$

d : déformation du ressort en $[m]$

6°) Travail total :

Travail total : $A_{12} = A_{12}(\vec{F}_n + \vec{F}_f + \vec{S} + m\vec{g}) = A_{12}(\vec{F}_n) + A(\vec{F}_f) + A(\vec{S}) + A(m\vec{g})$

Petites questions concernant le calcul du travail d'une force :

1) Une voiture monte une pente inclinée de 8° par rapport à l'horizontale. Elle parcourt 100 [m]. Sa force motrice est de F_M = 1500 [N]. Quel est le travail de la force motrice ?

2) La masse de la voiture est d'une demi-tonne. La voiture descend la route précédente et passe de l'altitude 800 [m] à l'altitude 550 [m]. Quel est le travail du poids ?

3) Lors du déplacement de la question 2, la voiture subit une force de frottement de 750 [N]. Quel est le travail de cette force ?

4) Un parachutiste de 80 [kg] tombe d'une hauteur de 300 [m], en subissant un frottement de 785 [N].

   a) Quel est le travail du poids ?
   b) Quel est le travail de la force de frottement ?

5) Quel est la force motrice agissant sur une voiture, si le travail moteur sur un parcours de 200 [m] est de 300'000 [J] ?

6) Une voiture de 2 tonnes, roulant à 72 [km/h], freine sur une distance de 85 [m] sur une route horizontale.

   a) Quel est le travail du poids ?
   b) Quel est le travail du soutien ?
   c) Que vaut la force de frottement ?
   d) Quel est le travail du frottement ?

Exercice 1

Un funiculaire relie deux stations distantes de 1 km, entre lesquelles il y a une dénivellation de 300 m. Chaque voiture a une masse de 10 tonnes et subit un frottement de 4000 N. Calculer le travail effectué par chacune des forces (poids, frottement, force normale, traction du câble) qui s'exercent sur la voiture montante. Faire de même pour la voiture descendante.
Rép. -30 MJ ; -4 MJ ; 0 MJ ; 34 MJ ; -4 MJ ; 0 MJ ; -26 MJ

Exercice 2

Une tondeuse à gazon est poussée à vitesse constante par une force horizontale de 40 N. La lame a 50 cm de diamètre. Quel est le travail effectué par la personne qui pousse la tondeuse pour tondre une parcelle de gazon de 10 m x 20 m ?
Rép. 16 kJ

Exercice 3

Une skieuse de 60 kg glisse à vitesse constante sur 200 m vers le bas d'une pente inclinée de 25°. Quel est le travail effectué sur la skieuse (a) par la force de gravité ; (b) par la force de frottement qui a un module de 20 N ?
Rép. 49.7 kJ ; -4 kJ

Exercice 4

Quel est le travail nécessaire pour faire monter 15 kg d'eau d'un puits profond de 12 m. On suppose que l'eau a une accélération constante vers le haut de module 0.7 m/s^2.
Rép. 1926 [J]

Module 8. Energies cinétique, potentielle et mécanique

8.1 Energie cinétique

L'énergie cinétique d'un objet est l'énergie que possède un objet de masse m [kg] se déplaçant à une vitesse v [$\frac{m}{s}$].

formule : $E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$

E_{cin} → [J], m → [kg], v → [$\frac{m}{s}$]

8.2 Energie potentielle

L'énergie potentielle d'un objet est due à la position de l'objet.

3 sortes d'énergies potentielles :

- énergie potentielle de pesanteur :

$$E_{pot} = m g h$$

m → [kg] (masse de l'objet); g → gravité [$\frac{m}{s^2}$]; h → hauteur [m] de l'objet, mesurée à partir d'une altitude 0 fixée.

- énergie potentielle de gravité : (satellite)

$$E_{pot} = \frac{-GMm}{d}$$

(0 est placé à l'infini)

Terre

0 → ∞

$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$

M = masse de l'astre central [kg]

m = masse du satellite en [kg]

d = distance entre le centre de l'astre et le centre du satellite [m]

- énergie potentielle élastique (ressort)

$$E_{pot} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot d^2$$

k = constante du ressort $\left[\frac{N}{m}\right]$

$(F = k \cdot d)$

F ↓ Force $[N]$; d ↓ déformation $[m]$

d = déformation $[m]$

8.3 Energie mécanique

L'énergie mécanique d'un objet est la somme des énergies cinétiques et potentielles :

$$E_{méc} = E_{cin} + E_{pot}$$

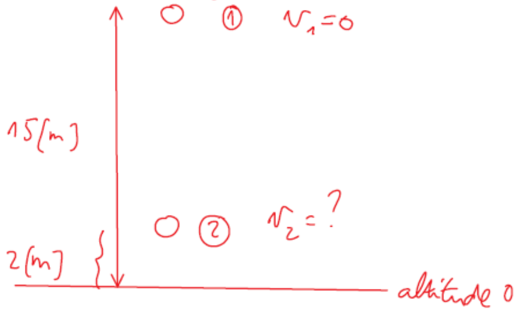
8.4 Théorème 1 : théorème de conservation de l'énergie mécanique

Théorème 1 : Lorsqu'un objet de masse m passe d'une position 1 à une position 2, sans frottement et sans force motrice, son énergie mécanique reste constante :

$$E_{méc\,1} = E_{méc\,2}$$

$$\Rightarrow E_{cin\,1} + E_{pot\,1} = E_{cin\,2} + E_{pot\,2}$$

Exemple 1 : un objet tombe d'une hauteur de 15[m]. Calculer sa vitesse à 2 mètres du sol. On néglige le frottement.



$$E_{méc}\,1 = E_{méc}\,2$$

$$\frac{1}{2}\cancel{m}v_1^2 + \cancel{m}gh_1 = \frac{1}{2}\cancel{m}v_2^2 + \cancel{m}gh_2$$

$$\frac{1}{2}\cdot 0^2 + 10\cdot 15 = \frac{1}{2}\cdot v_2^2 + 10\cdot 2$$

$$150 = \frac{1}{2}v_2^2 + 20 \quad |-20$$

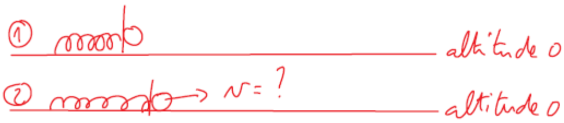
$$130 = \frac{1}{2}v_2^2 \quad |\cdot 2$$

$$260 = v_2^2$$

$$\Rightarrow v_2 = \sqrt{260} = 16,12\left[\frac{m}{s}\right] \cong 58\left[\frac{km}{h}\right]$$

Exemple 2 : On propulse horizontalement une petite boule de masse $m = 3$ grammes à l'aide d'un ressort comprimé de 8[cm] par une force de 2 [N]. A quelle vitesse est expulsée la boule ?

0,003[kg]



$$E_{méc}\,1 = E_{méc}\,2$$

$$E_{cin}\,1 + E_{pot}\,1 = E_{cin}\,2 + E_{pot}\,2$$

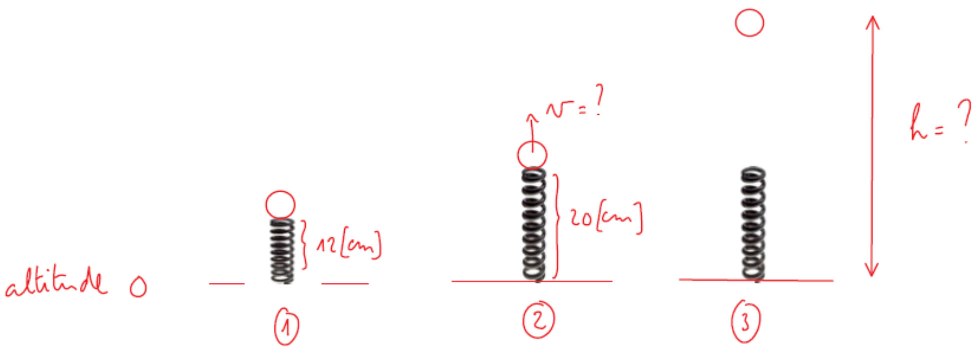
$$\underbrace{\frac{1}{2}\cdot 0,003\cdot 0^2}_{\frac{1}{2}mv_1^2} + \underbrace{0,003\cdot 10\cdot 0}_{mgh_1} + \underbrace{\frac{1}{2}\cdot 25\cdot 0,08^2}_{\frac{1}{2}kd^2} = \underbrace{\frac{1}{2}\cdot 0,003\cdot v^2}_{\frac{1}{2}mv_2^2} + \underbrace{0,003\cdot 10\cdot 0}_{mgh_2} + \underbrace{\frac{1}{2}\cdot 25\cdot 0^2}_{\frac{1}{2}kd^2}$$

Ressort : $F = k\cdot d \Rightarrow k = \frac{F}{d} = \frac{2}{0,08} = 25\left[\frac{N}{m}\right]$

$$0 + 0 + 0,08 = 0,0015v^2 + 0 + 0$$

$$\frac{0,08}{0,0015} = v^2 \Rightarrow v = 7,3\left[\frac{m}{s}\right] \cong 26,3\left[\frac{km}{h}\right]$$

Exemple 3 : On propulse verticalement une petite boule de 3 grammes à l'aide d'un ressort de 20 [cm] comprimé de 8 [cm] par une force $F = 2[N]$. A quelle hauteur monte la boule ?



$$E_{méc\,1} = E_{méc\,2} = E_{méc\,3}$$

$$E_{méc\,1} = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot 0{,}003 \cdot 0^2}_{\frac{1}{2} m v^2} + \underbrace{0{,}003 \cdot 10 \cdot 0{,}12}_{mgh} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot 25 \cdot 0{,}08^2}_{\frac{1}{2} k d^2} = 0 + 0{,}0036 + 0{,}08 = 0{,}0836\,[J]$$

$$E_{méc\,2} = \frac{1}{2} \cdot 0{,}003 \cdot v^2 + 0{,}003 \cdot 10 \cdot 0{,}2 + \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot 0^2 = 0{,}0015\,v^2 + 0{,}006$$

$$E_{méc\,3} = \frac{1}{2} \cdot 0{,}003 \cdot 0^2 + 0{,}003 \cdot 10 \cdot h + \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot 0^2 = 0{,}03\,h$$

$$\Rightarrow \quad 0{,}0836 = 0{,}0015\,v^2 + 0{,}006 = 0{,}03\,h$$

$$\begin{cases} 0{,}0836 = 0{,}03\,h & \rightarrow \quad h = \dfrac{0{,}0836}{0{,}03} = 2{,}78\overline{6}\,[m] \\ 0{,}0836 = 0{,}0015\,v^2 + 0{,}006 \quad \big|\, -0{,}006 & \Rightarrow 0{,}0776 = 0{,}0015\,v^2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow v^2 = \frac{0{,}0776}{0{,}0015} = 51{,}7\overline{3}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{51{,}7\overline{3}} = 7{,}19\,\left[\frac{m}{s}\right]$$

8.5 Théorème 2 : théorème de variation de l'énergie cinétique

Théorème 2 : Lorsqu'un objet de masse m passe d'une position 1, où sa vitesse vaut v_1, à une position 2, où sa vitesse vaut v_2, on a :

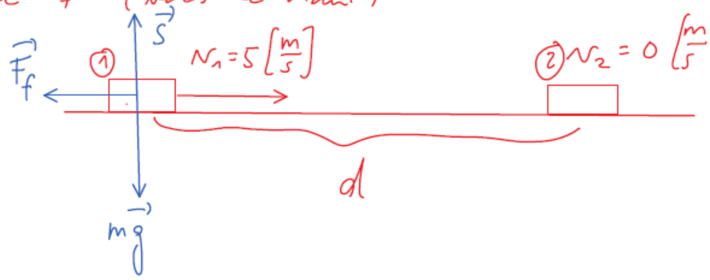
$$\underbrace{A_{1,2}}_{\substack{\text{Travail total des forces agissant}\\ \text{sur l'objet entre les positions 1 et 2}}} = \underbrace{E_{cin\,2}}_{\substack{\text{E cinétique finale}\\ = \frac{1}{2}\cdot m\cdot v_2^2}} - \underbrace{E_{cin\,1}}_{\substack{\text{E cinétique initiale}\\ = \frac{1}{2}\cdot m\cdot v_1^2}}$$

Exemple 4 : On lance un objet horizontalement à la vitesse de $5\left[\frac{m}{s}\right]$.

a) Quelle distance parcourt-il avant de s'arrêter s'il subit une force de frottement de 20 [N] et que sa masse est de 500 [g] ?

b) Même question, mais l'objet est lancé sur une pente inclinée de 7° (vers le haut).

a)



$$A_{12}(\vec{F}_f) + A_{12}(\vec{S}) + A_{12}(m\vec{g}) = E_{cin}\,② - E_{cin}\,①$$

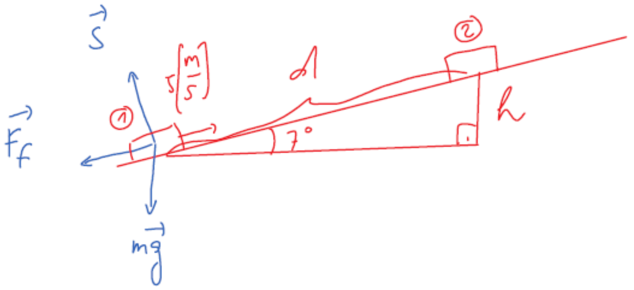
$$-F_f\cdot d + 0 + 0 = \frac{1}{2}\cdot m\cdot 0^2 - \frac{1}{2}m\cdot v_1^2$$

$$-20\cdot d = 0 - \frac{1}{2}\cdot 0{,}5\cdot 5^2$$

$$-20\,d = -\frac{25}{4}$$

$$d = \frac{25/4}{20} = 0{,}3125\ [m] = 31{,}25\ [cm]$$

b)



$\sin 7° = \frac{h}{d}$

$\Rightarrow h = d\cdot\sin 7°$

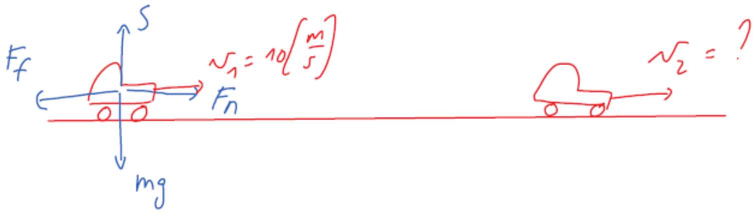
$$A_{12}(\vec{F_f}) + A_{12}(\vec{S}) + A_{12}(m\vec{g}) = E_{cin}② - E_{cin}①$$

$$-F_f\cdot d + 0 - mgh = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$-20\cdot d + 0 - 0{,}5\cdot 10\cdot d\cdot\sin 7° = \underbrace{\frac{1}{2}\cdot 0{,}5\cdot 0^2}_{=0} - \frac{1}{2}\cdot 0{,}5\cdot 5^2$$

$$d = \frac{-6{,}25}{-20-5\cdot\sin 7°} = 0{,}303\,[m] = 30{,}3\,[cm]$$

Exemple 5 : Une voiture de 1200 [kg] roule à 36 [km/h] ($\rightarrow 10\left[\frac{m}{s}\right]$). Elle subit une force de frottement de 500 [N] et sa force motrice est de 1000 [N]. Quelle est la vitesse de la voiture après avoir parcouru 20 [m] ?



$$A(\vec{F_f}) + A(\vec{S}) + A(m\vec{g}) + A(\vec{F_n}) = E_{cin\,2} - E_{cin\,1}$$

$$-F_f\cdot d + 0 + 0 + F_M\cdot d = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$-500\cdot 20 + 1000\cdot 20 = \frac{1}{2}\cdot 1200\cdot v_2^2 - \frac{1}{2}\cdot 1200\cdot 10^2$$

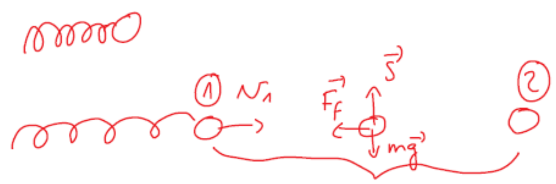
$$-10'000 + 20'000 = 600\,v_2^2 - 60'000$$

$$70'000 = 600\,v_2^2$$

$$\frac{70'000}{600} = v_2^2 \Rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{700}{6}} = 10{,}8\left[\frac{m}{s}\right]$$

Exemple 6 : ressort comprimé de 8[cm] par une force de 20[N] propulse une bille de 3 grammes. Le frottement est négligeable tant que la bille est en contact avec le ressort et il vaut 5[N] dès que la bille n'est plus en contact avec le ressort.

Quelle est la distance parcourue par la bille ?



$d = ?$

$v_1 = 7{,}3\left[\frac{m}{s}\right]$ (cf. exemple ci-dessus)

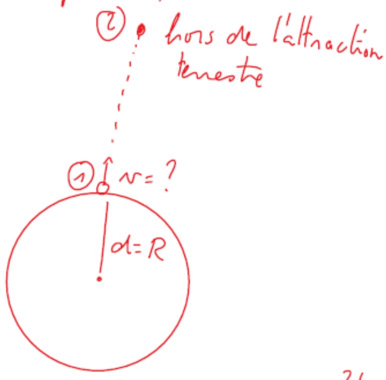
$$A_{12}(\vec{F}_f) + A(\vec{S}) + A(m\vec{g}) = E_{cin ②} - E_{cin ①}$$

$$-F_f \cdot d + 0 + 0 = 0 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

$$-5 \cdot d = -\frac{1}{2} \cdot 0{,}003 \cdot 7{,}3^2$$

$$\Rightarrow d = \frac{\frac{1}{2} \cdot 0{,}003 \cdot 7{,}3^2}{5} = 0{,}016\,[m] = 1{,}6\,[cm]$$

Exemple 7 : A quelle vitesse faut-il envoyer un objet pour qu'il puisse quitter l'attraction terrestre ? (on néglige le frottement)



$M = M_{Terre} = 5{,}97 \cdot 10^{24}$ [kg]

$$E_{méc}(1) = E_{méc}(2)$$

$$E_{cin}(1) + E_{pot}(1) = E_{cin}(2) + E_{pot}(2)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R} = \frac{1}{2}m\,0^2 + \underbrace{\frac{-GMm}{\infty}}_{\to 0}$$

$$\frac{1}{2}\cancel{m}v^2 - \frac{GM\cancel{m}}{R} = 0 \quad \Rightarrow \quad v^2 = \frac{2GM}{R}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}97 \cdot 10^{24}}{6'370'000}} = 11'181 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$= 11{,}181 \left[\frac{km}{s}\right]$$

Formule d'Einstein

Cette formule indique qu'il y a une équivalence entre la masse et l'énergie :

$E = mc^2$ avec

E : énergie maximale théorique en [J] contenue dans un objet de masse m
m : masse de l'objet en $[kg]$

c : vitesse de la lumière dans le vide, $c = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]$

Exercice 1

Un train démarre en côte. Sa masse est de 200 tonnes. L'inclinaison de la voie est de 1.5°. On observe que sur un parcours de 10 m, sa vitesse passe de 4 m/s à 5 m/s. En supposant les frottements négligeables, calculer la force moyenne exercée par les moteurs.
Rép. 142000 N

Exercice 2

La piste d'un toboggan a une longueur de 5 m et une dénivellation de 2 m. Un enfant dont la masse est de 20 kg descend sur ce toboggan et subit une force de frottement dont la grandeur est pratiquement constante et égale à 70 N. La vitesse initiale étant de 0.2 m/s, calculer la vitesse finale.
Rép. 2.24 m/s

Exercice 3

Les stations extrêmes d'un funiculaire sont aux altitudes de 500 et 900 m respectivement. La voie a une pente constante et une longueur de 2 km. Une voiture de 4 tonnes descend à la vitesse de 18 km/h. Soudain, le câble se casse. Quelle vitesse la voiture atteint-elle après avoir parcouru sur la voie une distance de 36 m depuis l'endroit où l'accident a eu lieu. On suppose qu'il n'y a pas de frottements et que les freins de secours ne fonctionnent pas.
Rép. 46.8 km/h

Exercice 4

Lorsqu'il est contracté par deux forces opposées de 10 N chacune, un ressort se raccourcit de 2 cm. On lui fait subir une contraction de 6 cm et on le maintient dans cet état au moyen d'un fil. On le place horizontalement et on l'appuie contre un mur. De l'autre côté, on appuie contre le ressort une bille de 100 g. A quelle vitesse la bille est-elle expulsée lorsqu'on brûle le fil ? On suppose négligeable la masse du ressort.
Rép. 4.24 m/s

8.6 Puissance :

La puissance d'une machine est l'énergie que cette machine utilise en 1 seconde :

<u>Puissance</u> :

(Arbeit) travail — chaleur — (Work) travail

$$P = \frac{\overset{[J]}{\text{Energie}}}{\underset{[s]}{\text{temps}}} = \frac{E}{t} = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t} = \frac{W}{t}$$

$\left[\frac{J}{s}\right]$ = $[W]$

↳ Watt

Remarque : on utilise également le cheval-vapeur (Ch) comme unité de puissance, 1 [Ch] = 736 $[W]$

La puissance peut également se calculer avec :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

avec

P : puissance en Watts $[W]$

$\vec{F}$: force en $[N]$ exercée

$\vec{v}$: vitesse en $\left[\frac{m}{s}\right]$ du mobile sur laquelle s'exerce la force $\vec{F}$

Attention à ne pas confondre les notions d'énergie et de puissance :

Energie : [J]

$1\,[Cal] = 4{,}18\,[J]$

$1\,[kWh] = 1000\,[Wh] = 1000\,[W]\cdot 1\,[h]$

kilo Watt heure

$= 1000\,[W]\cdot 3600\,[s]$

$= 1000\left[\frac{J}{s}\right]\cdot 3600\,[s]$

$= 3'600'000\left[\frac{J}{\cancel{s}}\cdot \cancel{s}\right]$

$= 3'600'000\,[J]$

Puissance : [W]

Exercice 5

Un cyclomotoriste met une minute pour parcourir un tronçon de route dont la longueur vaut 300 m et la dénivellation 30 m. La masse du véhicule avec le conducteur est de 100 kg. Calculer la puissance développée par le moteur, en chevaux.
Rép. 0.67 Ch

Exercice 6

Un train a une masse de 250 tonnes. Il roule à une vitesse constante de 100 km/h. La force de frottement qu'il subit de la part de l'air vaut 20'000 N. Quelle est la puissance développée par la locomotive dans les trois cas suivants ?

a) La voie est horizontale.
b) La voie a une pente de 1% et le train monte.
c) La voie a une pente de 0.5% et le train descend.

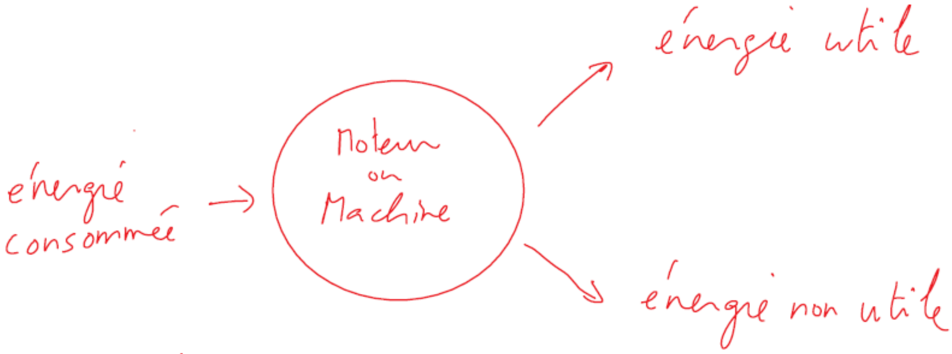
Rép. 0.56 MW ; 1.25 MW ; 0.21 MW

Exercice 7

Un étudiant s'endort à sa table de travail. Il laisse sa lampe allumée toute la nuit, à savoir durant 7 heures. Sur l'ampoule, on peut lire : 60 Watts, 220 Volts. Quelle est la dépense occasionnée par cet incident si le kWh est payé 16 centimes ?
Rép. 6.7 cts

8.7 Rendement :

Lorsqu'une machine transforme l'énergie qui l'alimente (énergie consommée) en l'énergie qu'elle doit fournir (énergie utile), il y a des pertes. Le rendement est le rapport de l'énergie utile et de l'énergie consommée ou de la puissance utile et de la puissance consommée :



eta

$$\text{rendement : } \eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie consommée}} = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance consommée}}$$

avec

η	:	symbole grec (eta) représentant le rendement, pour obtenir un rendement en % il faut multiplier η par 100
Energies	:	énergies consommée et utile en [J]
Puissances	:	puissances consommée et utile en [W]

énergie consommée = énergie utile + énergie non utile

Exercice 8

On suppose que l'énergie électrique fournie par une centrale nucléaire est consacrée à hisser des trains de marchandises jusqu'au tunnel du Gotthard. La dénivellation est de 700 m. On admet que la transformation de l'énergie nucléaire en énergie électrique a un rendement de 20% et que 25% de l'énergie électrique consommée par les locomotives se perd en chaleur. Combien peut-on faire monter de trains de 1000 tonnes avec l'énergie qui apparaît lorsque le combustible de la centrale a diminué sa masse d'un gramme ?
Rép. 1930

8.8 Chocs et quantité de mouvement :

La quantité de mouvement d'un objet est le produit de sa masse par sa vitesse, la quantité de mouvement est un vecteur, elle se mesure en $\left[\frac{kg \cdot m}{s}\right]$:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

avec

$\vec{p}$: quantité de mouvement en $\left[\frac{kg \cdot m}{s}\right]$

m : masse de l'objet en $[kg]$

$\vec{v}$: vitesse de l'objet en $\left[\frac{m}{s}\right]$

Exemples : calculer la quantité de mouvement, par rapport à l'axe des X, d'un objet de masse m, se déplaçant à une vitesse v, dans les cas suivants :

$\left(m = 3\,[kg]\,,\ v = 2\left[\frac{m}{s}\right],\ \alpha = 20°\right)$

1)

$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

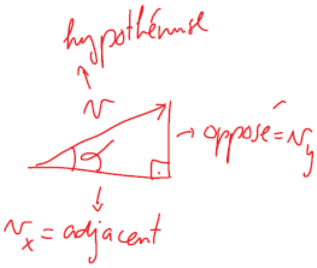
sur x : $p = 3 \cdot 2 = 6 \left[kg \cdot \frac{m}{s}\right]$

2)

$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

sur x : $p = 3 \cdot (-2) = -6 \left[kg \cdot \frac{m}{s}\right]$

3)



$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

sur x : $p = m \cdot v \cdot \cos\alpha = 3 \cdot 2 \cdot \cos 20 = 5{,}64 \left[kg \cdot \frac{m}{s}\right]$

$\cos\alpha = \frac{adj.}{hyp.}$

$\sin\alpha = \frac{opp}{hyp}$

4)

$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

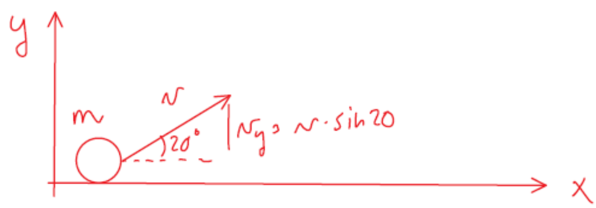
sur x : $p = -m \cdot v \cdot \cos\alpha = -3 \cdot 2 \cdot \cos 20 = -5{,}64 \left[kg \cdot \frac{m}{s}\right]$

5)

$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

sur x : $p = m \cdot v \cdot \underbrace{\cos 90°}_{=0} = 0 \left[kg \cdot \frac{m}{s}\right]$

6)



$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

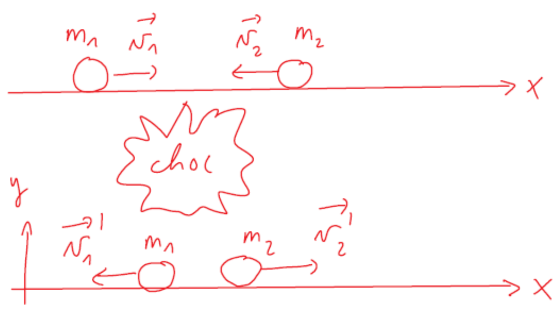
sur y : $p = m \cdot v \cdot \sin 20 = 3 \cdot 2 \cdot \sin 20 = 2{,}05 \left[kg \cdot \frac{m}{s}\right]$

8.9 Conservation de la quantité de mouvement :

<u>Théorème</u> : Lors d'un choc, la quantité de mouvement totale reste constante.

$$\vec{P}_{\text{totale avant le choc}} = \vec{P}_{\text{totale après le choc}}$$

<u>exemple</u> :



$m_1 = 2\,[kg]$

$m_2 = 3\,[kg]$

$v_1 = 5\,\left[\frac{m}{s}\right]$

$v_2 = 2\,\left[\frac{m}{s}\right]$

$v_2' = 1\,\left[\frac{m}{s}\right]$

$v_1' = ?$

$$\vec{P}_{\text{totale avant le choc}} = \vec{P}_{\text{totale après le choc}}$$

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2'$$

<u>sur x</u> : $m_1 v_1 - m_2 v_2 = -m_1 v_1' + m_2 v_2'$

<u>sur y</u> : $0 + 0 = 0 + 0$

$$2 \cdot 5 - 3 \cdot 2 = -2 \cdot v_1' + 3 \cdot 1$$

$$\Rightarrow \quad 4 = -2v_1' + 3$$

$$\Rightarrow \quad 1 = -2v_1'$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{-2} = v_1' \quad \Rightarrow \quad v_1' = -0{,}5\left[\frac{m}{s}\right]$$

$\Rightarrow$ la vitesse de l'objet 1 après le choc est de $0{,}5\left[\frac{m}{s}\right]$ dans le sens contraire de celui du schéma $\Rightarrow$ l'objet 1 continue d'avancer

Choc élastique : Si le choc est élastique alors

$E_{cinétique}$ totale avant le choc = $E_{cinétique}$ totale après le choc

Choc non élastique : $E_{cinétique}$ totale avant le choc > $E_{cinétique}$ totale après le choc

↓

choc mou

(les objets se déforment de façon permanente)

↳ de l'énergie se perd (déformation, chaleur)

- $E_{cinétique}$ totale $= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2$

choc parfaitement mou : les objets restent collés après le choc

Exercice : le choc de l'exemple ci-dessus est-il élastique ?

Exercice 9

Pour déterminer la masse d'un objet, on le lance à une vitesse de 4 m/s contre un objet immobile dont la masse est connue et vaut 0.5 kg. On observe que l'objet incident est rejeté en arrière à une vitesse de 2.48 m/s, tandis que l'objet heurté acquiert une vitesse de 0.54 m/s. Calculer la masse inconnue. Le choc est-il élastique ?
Rép. 0.0417 kg

Exercice 10

Sur un rail à coussin d'air, un glisseur de 400 g arrive à une vitesse de 2 m/s contre un glisseur de 600 g, venant en sens inverse à une vitesse de 1 m/s. Le premier objet est rejeté en arrière à une vitesse de 1.6 m/s. Calculer la vitesse finale du second.
Rép. 1.4 m/s en sens contraire de sa vitesse initiale

Exercice 11

Deux objets se heurtent perpendiculairement et restent collés l'un à l'autre. L'un a une masse double de l'autre. Leurs vitesses initiales ont la même grandeur. Quelle est la vitesse du système final ?
Rép. 74.5 % de la vitesse initiale ; 26.6° avec l'une des vitesses initiales.

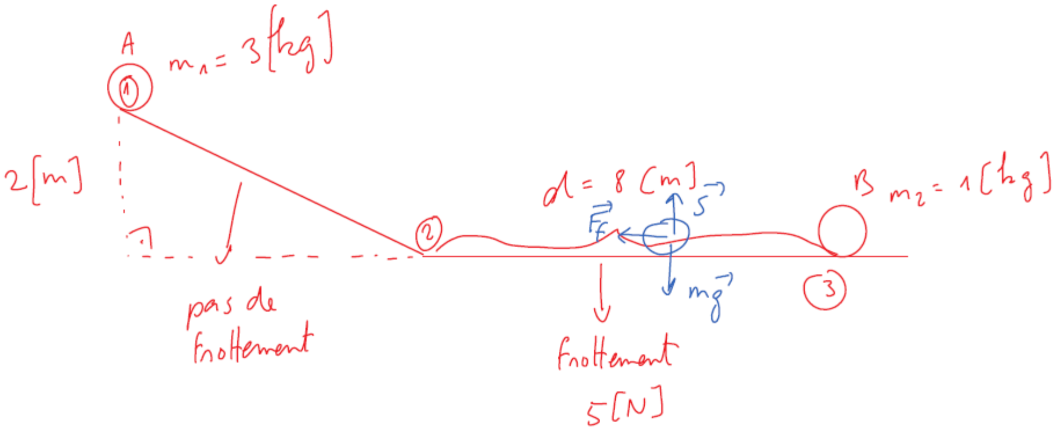
Exercice 12

Une bille de 50 g arrive à une vitesse de 10 m/s sur une seconde bille, identique à la première et immobile. La trajectoire de la bille incidente subit une déviation de 26°. En admettant que le choc est élastique, calculer les grandeurs des vitesses finales des deux mobiles. Déterminer la direction de la vitesse acquise par la seconde bille.
Rép. 9.0 m/s ; 4.4 m/s ; 64°

Exercice 13

Deux billes dont les masses sont 50 g et 100 g sont suspendues à des fils de 50 cm de long. Les fils sont attachés au même point. La grosse bille étant immobile, on écarte la petite de sa position d'équilibre, de manière que son fil de suspension fasse un angle de 30 ° avec la verticale, puis on la lâche. Elle effectue un choc central et élastique contre l'autre bille. Calculer les angles maximaux formés par les fils avec la verticale lors de leur première oscillation après le choc.
Rép. 9.9° ; 19.9°

Exercice supplémentaire mêlant énergie et chocs :



On lâche la boule A, à quelle vitesse partira la boule B après le choc si il est élastique.

de ① à ② : quelle est la vitesse de la boule A au point ② ?

$$E_{méc\,①} = E_{méc\,②}$$

$$\frac{1}{2}\cdot 3\cdot 0^2 + 3\cdot 10\cdot 2 = \frac{1}{2}\cdot 3\cdot v_2^{\,2} + 3\cdot 10\cdot 0$$

$$\Rightarrow \quad 60 = \frac{3}{2} v_2^{\,2} \quad \Rightarrow \quad v_2^{\,2} = 40 \quad \Rightarrow \quad v_2 = \sqrt{40} = 6{,}32 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$\frac{60}{\left(\frac{3}{2}\right)} = 60\cdot\frac{2}{3}$$

de ② à ③ : quelle est la vitesse de la boule A au point ③

$$E_{cin\,③} - E_{cin\,②} = A_{23}(\vec{S}) + A_{23}(m\vec{g}) + \overbrace{A_{23}(\vec{F_F})}^{-F_F\cdot d}$$

$$\frac{1}{2}\cdot 3\cdot v_3^{\,2} - \frac{1}{2}\cdot 3\cdot \underbrace{40}_{(\sqrt{40})^2} = 0 + m\cdot g\cdot 0 - 5\cdot 8$$

$$\frac{3}{2} v_3^{\,2} - 60 = -40$$

$$\frac{3}{2} v_3^2 = 20 \Rightarrow v_3^2 = 20 \cdot \frac{2}{3} = \frac{40}{3} = 13,\overline{3} \Rightarrow v_3 = 3,65 \left[\frac{m}{s}\right]$$

choc entre les boules A et B au point (3)

↳ élastique

$v_3 = 3,65 \frac{m}{s}$

3[kg] (A) → (B) 1[kg]

choc

v_4 ← (A) (B) → v_5

$P_{totale\ avant} = P_{totale\ après}$: $3 \cdot 3,65 + 0 = -3v_4 + 1 \cdot v_5$

$E_{cin\ totale\ avant} = E_{cin\ totale\ après}$: $\cancel{\frac{1}{2}} \cdot 3 \cdot 3,65^2 + 0 = \cancel{\frac{1}{2}} \cdot 3 \cdot v_4^2 + \cancel{\frac{1}{2}} \cdot 1 \cdot v_5^2$

(choc élastique)

$$\Rightarrow \begin{cases} 10,95 = -3v_4 + v_5 & \rightarrow v_5 = 10,95 + 3v_4 \\ 39,9675 = 3v_4^2 + v_5^2 \end{cases}$$

$$39,9675 = 3v_4^2 + (10,95 + 3v_4)^2$$

$$\Rightarrow 39,9675 = 3v_4^2 + 119,9025 + 65,7 v_4 + 9v_4^2$$

$$\Rightarrow 0 = 12v_4^2 + 65,7v_4 + 79,935$$

$$\Delta = (65,7)^2 - 4 \cdot 12 \cdot 79,935 = 479,61$$

$$\Rightarrow v_4 = \frac{-65,7 \pm \sqrt{479,61}}{24} = \frac{-65,7 \pm 21,9}{24}$$

$$= \begin{cases} -1,825 \\ -3,65 \end{cases}$$

$$\Rightarrow v_5 = 10{,}95 + 3v_4 = \begin{cases} 10{,}95 + 3\cdot(-1{,}825) = 5{,}475 \\ 10{,}95 + 3(-3{,}65) = 0 \text{ (impossible car choc)} \end{cases}$$

$\Rightarrow$ après le choc, la boule A se déplace à $1{,}825 \left[\frac{m}{s}\right]$ vers la droite et la boule B se déplace à $5{,}475 \left[\frac{m}{s}\right]$ vers la droite.

Exercices tirés d'anciens examens de maturité :

Exercice 1

Un objet tombe d'un hélicoptère dont l'altitude est de 200 m. Que vaut sa vitesse lorsqu'il atteint le sol. On négligera la résistance de l'air et étudiera les deux situations suivantes :

a) l'hélicoptère est immobile,

b) l'hélicoptère se déplace horizontalement à la vitesse de 180 km/h.

Exercice 2

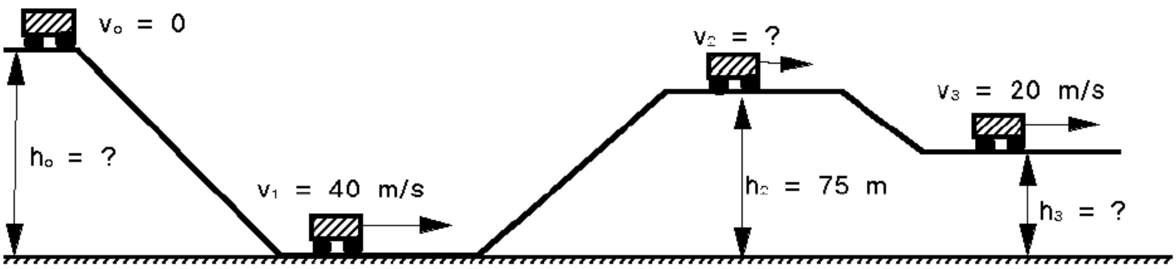
Lors d'une rencontre internationale d'athlétisme, le 100 m plat est généralement parcouru en 10 s. Admettons que l'on ne connaisse pas ou que l'on ait oublié la hauteur généralement atteinte par les sauteurs à la perche. Peut-on l'estimer en première approximation grâce à un calcul d'énergie ?

Exercice 3

Un marteau-pilon de 500 kg est soulevé à 3 m au-dessus du sol. En tombant, il enfonce un pieu de 5 cm dans le sol. Quelle est la force, supposée constante, résistant à la pénétration du pieu dans le sol ?

Exercice 4

Un wagonnet est lâché, avec une vitesse initiale nulle, depuis le premier sommet d'une succession de collines (voir figure). On néglige les frottements. Trouver les indications manquantes dans la figure.



Exercice 5

Deux masses identiques m entrent en collision lors d'un **choc central parfaitement mou.**
Calculer dans chaque cas (1 et 2) la variation d'énergie cinétique du système

cas 1 **cas 2**

Exercice 6

Quel travail faut-il effectuer pour comprimer un ressort de 7 [cm] sachant qu'une force de 20 [N] le comprime de 4 [cm] ?

Exercice 7

La puissance d'une voiture de course est de 300 [kW], cela signifie que la consommation d'énergie en 1 minute pour cette voiture est de

a) $1.8 \cdot 10^7$ [W]
b) $1.8 \cdot 10^4$ [J]
c) 5 [kWh]
d) 300000 [J]
e) $7.524 \cdot 10^7$ [Cal]

Module 9. Mécanique : statique des fluides

9.1 pression

La pression d'une force exercée sur une surface est donnée par :

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

avec

P : pression en Pascal $[Pa]$
F : force en [N]
S : surface en $\left[m^2\right]$

ex : Quelle est la pression exercée par un éléphant sur le sol ?

$m = 6$ (tonnes)

diamètre patte = 40 [cm] ⇒ surface d'une patte $= \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0{,}2^2 = 0{,}2513\ [m^2]$

⇒ surface des 4 pattes $= 4 \cdot 0{,}2513 = 1{,}0053\ [m^2]$

$$\Rightarrow P = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{6000 \cdot 10}{1{,}0053} = 59'683\ [Pa]$$

Exercice 1

Les chenilles d'un bulldozer reposent sur le sol sur une longueur de 6 m chacune. Quelle doit être leur largeur si l'engin a une masse de 18 tonnes et que la pression sur le sol ne doit pas dépasser 5 [N/cm^2] ?
Rép. 30 cm

Exercice 2

Une patineuse a une masse de 50 kg. Les lames de ses patins ont une largeur de 2 mm. Quelle est la pression exercée sur la glace lorsqu'elle se tient sur un pied, si la lame est en contact avec la glace sur une longueur de 20 cm ?
Rép. 1'250'000 [Pa]

Exercice 3

La pression au centre d'une tornade est de 0.4 atm. Si la tornade passe rapidement au-dessus d'une maison, quel est le module de la force de pression exercée sur une vitre dont les dimensions sont de 1.2 m sur 1.4 m ? On suppose que la maison est étanche à l'air et que la pression à l'intérieur est de 1 atm.
Rép. $1.02 \cdot 10^5$ N

9.2 principe de Pascal

Dans un fluide, 2 points situés à la même altitude subissent la même pression :

$P_A = P_B$ avec A et B étant 2 points situés à la même altitude

Par contre pour des points situés à des altitudes différentes on a :

$$P_B - P_A = \rho g h$$

avec

P_A : pression en $[Pa]$ en A (point le plus haut)

P_B : pression en $[Pa]$ en B (point le plus bas)

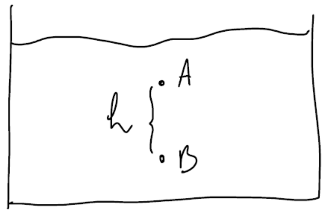
ρ : masse volumique en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ du fluide (gaz ou liquide) considéré

g : accélération de la pesanteur en $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

h : dénivellation entre le point A et le point B en $[m]$

Remarque : la pression peut également se mesurer en atmosphère $[atm]$ ou en millimètre de mercure $[mmHg]$ avec 1 $[atm]$ = 760 $[mmHg]$ = $1.01325 \cdot 10^5$ $[Pa]$

Principe de Pascal :



pression en B [Pa]

pression en A [Pa]

$$\Delta P = P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot h$$

h → différence d'altitude [m] entre A et B

ΔP → variation de pression [Pa]

ρ → masse volumique du fluide

g → gravité : $g = 9{,}81 \cong 10 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

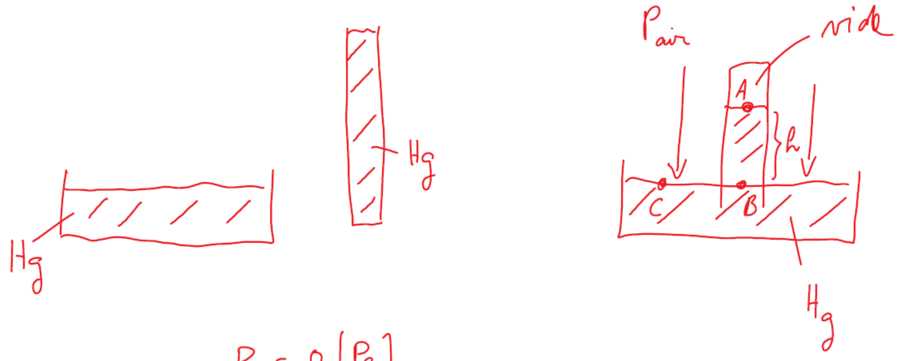
$$\Rightarrow \quad P_B = P_A + \rho \cdot g \cdot h$$

La pression normale est de $101'300 \, [Pa]$

$= 1{,}013 \cdot 10^5 \, [Pa]$

BUISSONNETS MONTANI

Baromètre à mercure :



$P_A = 0\ [Pa]$

$P_B = P_C = 1\ [atm] = 101'300\ [Pa]$

↳ principe de Pascal

principe de Pascal : $P_B - P_A = \underbrace{\rho_{Hg}}_{13'590\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]} \cdot g \cdot h \Rightarrow h = \dfrac{P_B - P_A}{\rho_{Hg} \cdot g} = \dfrac{101'300 - 0}{13'590 \cdot 9{,}81}$

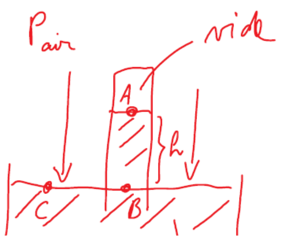
$\Rightarrow h = 0{,}76\ [m]$
$= 76\ [cm]$
$= 760\ [mm]$

$\Rightarrow$ nouvelle unité de mesure de pression : la hauteur de mercure

$76\ [cm\,Hg] = 760\ [mm\,Hg] = 1\ [atm] = 101'300\ [Pa]$

Autres unités de pression : $1\ [bar] = 10^5\ [Pa]$
$1\ [torr] = 1\ [mm\,Hg] = 1{,}33 \cdot 10^2\ [Pa]$

Question : quelle hauteur d'eau équilibre $1\ [atm]$?

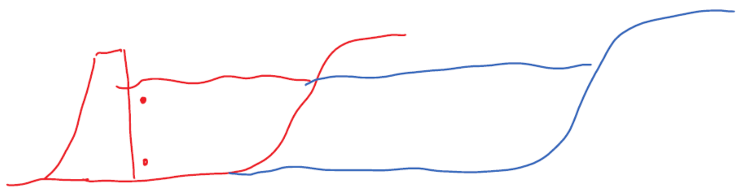


$\overset{P_C = 1[atm]}{P_B} - \overset{0}{P_A} = \underbrace{\rho}_{eau} \cdot g \cdot h$

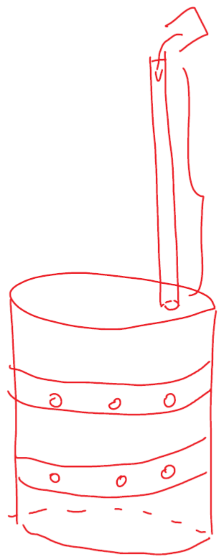
$\Rightarrow \; 101360 - 0 = 998 \cdot 10 \cdot h$

$\Rightarrow \; h = \dfrac{101'300}{9980} = 10{,}15 \; [m]$

barrage :



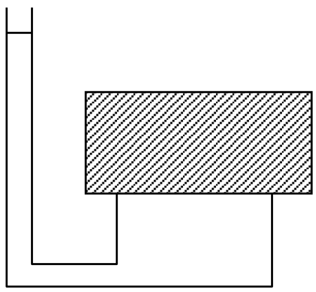
tonneau de Pascal :



Exercice 4

Au pied d'une colline, un baromètre indique une pression de 75.4 cmHg. Calculer la pression au sommet de la colline, situé 200 m plus haut.
Rép. 73.5 cmHg

Exercice 5



Le bloc de pierre représenté ci-contre a une masse de 120 kg. Sa base, horizontale, ferme un tuyau dont le diamètre est de 20 cm. Ce tuyau communique avec un petit tuyau vertical d'un diamètre de 2 cm. Le système contient de l'eau. Initialement, dans chaque branche du tube, l'eau atteint la même hauteur. Quelle quantité faut-il en ajouter dans le petit tuyau pour que le bloc soit soulevé ?
Rép. 1.2 dm^3

Exercice 6

Dans une maison à six étages, le réseau de distribution d'eau est équipé de robinets dont l'orifice a un diamètre intérieur de 1.2 cm. Au sixième étage, si l'on veut retenir l'eau en appliquant son pouce contre l'ouverture d'un robinet, on doit exercer une force de 30 N. Quelle force doit-on exercer si l'on veut faire cela au rez-de-chaussée ? La hauteur d'un étage est de 3 m.
Rép. 50.31 N

Exercice 7

Un cycliste de 50 kg roule sur une bicyclette de 10 kg. Le poids est également réparti sur les roues. Chaque pneu est en contact avec le sol sur une surface de 10 cm^2. Calculer la pression de gonflage des pneus.
Rép. 3 atm au-dessus de la pression atmosphérique

9.3 poussée d'Archimède

Force ou poussée d'Archimède :

Tout corps plongé dans un fluide subit une force ascendante égale au poids du fluide déplacé (par le corps).

$$F_A = \rho_{fluide} \cdot g \cdot V_{immergé}$$

g : $9{,}81 \cong 10 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

F_A : Force d'Archimède $[N]$

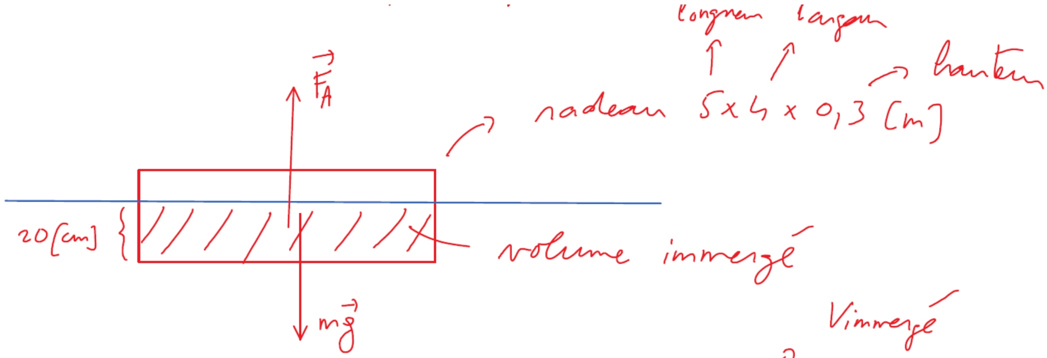
ρ_{fluide} : masse volumique $[kg/m^3]$

$V_{immergé}$: volume immergé $[m^3]$

Remarques :

Si la force d'Archimède est plus grande que le poids de l'objet, il monte.
Si la force d'Archimède est plus petite que le poids de l'objet, il coule.
Si la force d'Archimède est égale au poids de l'objet, il reste entre deux eaux.

Quelle est la force d'Archimède subie par un radeau, et de quelle matière est-il constitué ?



- $$F_A = \rho_{eau} \cdot g \cdot V_{immergé} = 998 \cdot 10 \cdot (\underbrace{5 \cdot 4 \cdot 0{,}2}_{V_{immergé}})$$
$$= 9980 \cdot 4$$
$$= 39'920 \text{ [N]}$$

- quelle est la masse volumique du radeau ?

$$\underset{\text{radeau}}{\rho} = \frac{m \to ?}{V \to o.k.}$$

le radeau flotte $\Rightarrow$ Newton: $\sum \vec{F} = \vec{0}$

$$\Rightarrow \vec{F}_A + m\vec{g} = \vec{0}$$

$g \uparrow$

$$\Rightarrow F_A - mg = 0 \quad \Rightarrow F_A = mg$$

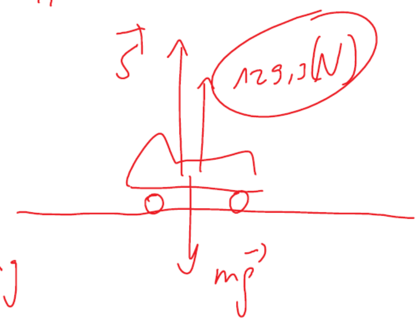
$$\Rightarrow m = \frac{F_A}{g} = \frac{39'920}{10} = 3992 \text{ [kg]}$$

$$\rho_{radeau} = \frac{m}{V_{Total}} = \frac{3992}{5 \cdot 4 \cdot 0{,}3} = 665{,}\bar{3} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

le radeau est en bois de chêne

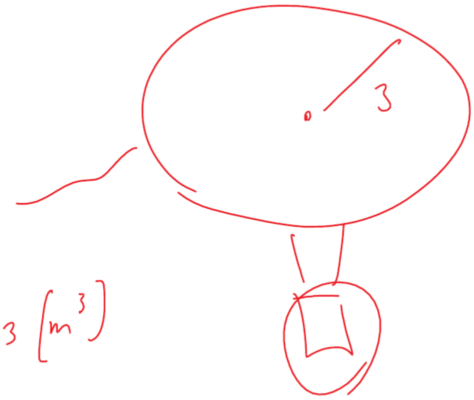
Quelle est la force d'Archimède subie par une voiture ?

$F_A = \rho_{air} \cdot g \cdot V_{voiture} = 1{,}293 \cdot 10 \cdot 10 = 129{,}3\ (N)$



$1000 \cdot 10 = 10'000 = mg$

Quelle est la force d'Archimède subie par un ballon de 3 [m] de rayon ?



$V = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3$

$= \frac{4}{3}\pi \cdot 3^3 \cong 113\ [m^3]$

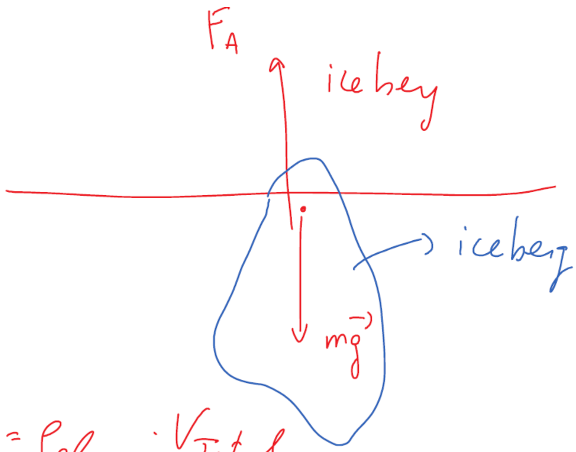
$F_A = \rho_{air} \cdot g \cdot V_{imm} = 1{,}293 \cdot 10 \cdot 113 = 1462{,}3\ (N)$

L'iceberg

masse iceberg

Newton: $F_A = mg$

$$\Rightarrow \rho_{eau} \cdot g \cdot V_{immergé} = mg$$



$$\rho_{glace} = \frac{m_{glace}}{V_{Total}} \Rightarrow m_{glace} = \rho_{glace} \cdot V_{Total}$$

$$\rho_{eau} \cdot \cancel{g} \cdot V_{immergé} = \rho_{glace} \cdot V_{Total} \cdot \cancel{g}$$

$$\Rightarrow V_{immergé} = \frac{\rho_{glace} \cdot V_{Total}}{\rho_{eau}} = \frac{\rho_{glace}}{\rho_{eau}} \cdot V_{Total}$$

$$\Rightarrow V_{immergé} = \frac{917}{998} \cdot V_{Total} = 0,92 \cdot V_{Total}$$

⇒ le volume immergé représente le 92% du volume total

Exercice 8

Une plaque de liège flotte sur de l'eau. Elle a une épaisseur de 1 cm et une aire de base de 100 cm^2. La masse volumique du liège est de 250 kg/m^3. Un objet de 60 g repose sur cette plaque de liège, la laissant horizontale. Calculer la hauteur immergée.
Rép. 0.85 cm

Exercice 9

Un ballon est retenu au sol par une corde. Il est gonflé à l'hydrogène (masse volumique : 0.09 kg/m^3). L'enveloppe est une sphère de 4 m de rayon. Elle a une masse de 50 kg et soutient une nacelle de 200 kg. Calculer la force avec laquelle est tendue la corde si le ballon se trouve dans de l'air dont la masse volumique vaut 1.35 kg/m^3.
Rép. 880 N

Exercice 10

Une péniche a un tirant d'eau (hauteur de la partie immergée) de 3 m en mer. On suppose que sa section transversale horizontale est rectangulaire. De combien varie le tirant d'eau lorsque la péniche arrive dans un lac d'eau douce ? La masse volumique de l'eau de mer est de 1025 kg/m^3.
Rép. 7.5 cm

Exercice 11

Une force verticale de module 10 N est nécessaire pour tout juste immerger dans de l'eau un corps homogène dont le poids a un module de 30 N. Quelle est la masse volumique du corps ?
Rép. 750 kg/m^3

<u>Exercices tirés d'anciens examens de maturité</u> :

QCM

a) (été 2007)

Un corps flottant dans l'huile déplace :

- ❒ son propre volume d'huile
- ❒ son propre poids d'huile
- ❒ sa propre surface d'huile
- ❒ sa propre hauteur d'huile

b) (projet 209)

Un corps plongé dans un fluide subit une poussée dirigée vers le haut:

- ☐ **égale au poids de l'objet ;**
- ☐ **égale au poids du fluide déplacé ;**
- ☐ **égale à la masse du fluide déplacé.**

Exercice 1 *(été 2008)*

Pour déterminer la masse volumique d'une pièce métallique de forme compliquée on mesure sa masse dans l'air sur une balance de laboratoire et on lit 1.5 kg. On fixe ensuite la pièce à l'aide d'une ficelle de masse négligeable à un dynamomètre puis on l'immerge dans un bain d'huile d'arachide pour obtenir un résultat indiqué de 10 N.

3.2.1 Indiquer dans un schéma toutes les forces agissant sur la pièce métallique dans l'huile.

3.2.2 Calculer la masse volumique de la pièce métallique (prendre $g = 10$ N/kg).

Exercice 2 *(hiver 2008)*

Un ouvrier souhaite élever une masse de 1100 kg sur une hauteur de 90 cm à l'aide d'un cric hydraulique, qui consiste en deux pistons de sections respectives de 25 cm^2 et 3200 cm^2 et communiquant par un liquide incompressible.

3.2.1 Quelle force doit-il appliquer sur le premier piston?

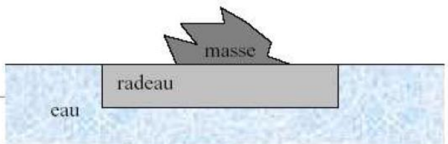
3.2.2 En admettant un rendement de l'installation de 70%, calculer le travail nécessaire que doit fournir l'ouvrier pour soulever la masse.

Exercice 3 *(automne 2006)*

Un radeau en bois ($\rho_{bois} = 600$ kg/m^3, plein, a une surface (horizontale) de 8 m^2 et une hauteur (verticale) de 50 cm.

2.2.1 Calculer la hauteur immergée du radeau lorsqu'il flotte dans de l'eau (supposée pure) à 20°C.

2.2.2 Calculer la masse qu'il faut déposer sur ce radeau pour qu'il soit immergé exactement comme sur la figure.



Exercice 4 (printemps 2005)

3.1 Trois étudiants de 75 kg chacun aimeraient traverser un petit lac d'eau douce avec un radeau qu'ils doivent construire. Pour ceci ils ont à disposition des poutres en bois d'épicéa (460 kg/m^3) de dimensions 0.25 m * 0.25 m * 3.5 m.

3.1.1 Ils mettent une poutre à l'eau. Faire un dessin et indiquer les forces qui agissent sur la poutre. (1 point)

3.1.2 Calculer la hauteur immergée de la poutre seule. (2 points)

3.1.3 Pour que les trois étudiants puissent traverser le lac sans avoir les pieds dans l'eau, ils doivent mettre plusieurs poutres les unes à côté des autres. Faire un petit schéma avec les forces et calculer le nombre entier minimum n de poutres nécessaires. (2.5 points)

Arrivés de l'autre côté du lac, les étudiants sortent leur radeau de l'eau en le tirant vers le haut d'un plan incliné de 15°. On admet une force de frottement constante de 400 N :

3.1.4 Faire un dessin avec toutes les forces. (Les forces doivent être orientées correctement (sens et direction) sur le dessin.) (2 points)

3.1.5 Calculer la force minimale nécessaire pour tirer le radeau vers le haut de ce plan incliné. (2 points)

Module 10. Chaleur (thermodynamique) : partie 1

10.1 température

10.1.1 notion de température

la température est une grandeur proportionnelle à l'agitation interne des particules composant un corps, c'est-à-dire à leur vitesse moyenne ou autrement dit à l'énergie cinétique moyenne de ces particules :

$$\overline{\frac{1}{2}mv^2} = \frac{3}{2}kT$$

avec

$\overline{\frac{1}{2}mv^2}$: énergie cinétique moyenne en [J]

k : constante de Boltzmann, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$

T : Température en $[°K]$

10.1.2 échelles Celsius et Kelvin

On utilise principalement deux unités pour mesurer la température :

Le degré Celsius $[°C]$ basé sur les différents états de l'eau à une pression normale : 0 $[°C]$ correspond à la température à laquelle l'eau passe de l'état solide (glace) à l'état liquide (eau) sous une pression de 1 $[atm]$. 100 $[°C]$ correspond à la température à laquelle l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur) sous une pression de 1 $[atm]$.

Le degré Kelvin $[°K]$ est basé sur l'aspect microscopique de la température. 0 $[°K]$ correspond à l'état pour lequel les particules composant un objet sont immobiles.

La relation entre le degré Kelvin et le degré Celsius est :

0 [°K] = -273.15 [°C]
Une augmentation de 1 $[°K]$ correspond à une augmentation de 1 $[°C]$.

Exercice 1

Déterminer :

a) L'énergie cinétique moyenne de translation des molécules dans l'air à 300 [K]
b) La vitesse quadratique moyenne des molécules de O_2 et de N_2 à cette température.

Rép. $6.21 \cdot 10^{-21}$ [J] ; 483 [m/s] ; 517 [m/s]

Exercice 2

Quelle est la vitesse quadratique moyenne des molécules d'hydrogène à 27 [°C] ?
Rép. 1920 [m/s]

Exercice 3

La température à l'intérieur du Soleil est d'environ $2 \cdot 10^{7}$ [K].

Déterminer :

a) L'énergie cinétique moyenne des protons
b) Leur vitesse quadratique moyenne

Rép. $4.14 \cdot 10^{-16}$ [J] ; $7.04 \cdot 10^{5}$ [m/s]

Exercice 4

La hauteur de la colonne de mercure dans un thermomètre est de 10 cm à 0°C et de 25 cm à 100 °C.

Déterminer :
a) La température qui correspond à 15 cm
b) La hauteur de la colonne à 70 °C

Module 11. Chaleur (thermodynamique) : partie 2

11.1 dilatation

11.1.1 dilatation des solides

Dilatation des solides :

Si on chauffe une tige en fer, elle se dilate.

Question : de combien se dilate-t-elle sachant qu'on la chauffe de ΔT degrés ?

Réponse : formule de la dilatation linéique

$$\boxed{L_2 = L_1 (1 + \alpha \cdot \Delta T)}$$

avec L_1 = longueur initiale de la tige
L_2 = longueur finale de la tige
} unité : la même pour les deux

α = coefficient de dilatation linéique (cf. formulaire)

ΔT = variation de température en [°C] ou en [K]

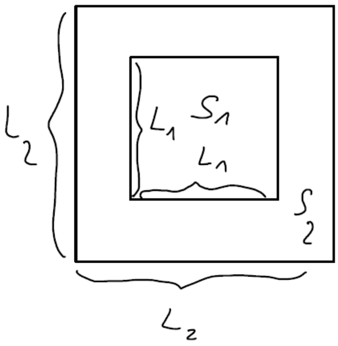
$\Delta T = T_{finale} - T_{initiale}$

$$L_2 = L_1 + L_1 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$L_2 - L_1 = L_1 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\boxed{\underbrace{\Delta L}_{\text{variation de longueur}} = L_1 \cdot \alpha \cdot \Delta T} \qquad \boxed{L_2 = L_1 + \Delta L}$$

Dilatation surfacique :



$$L_2 = L_1 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\Rightarrow S_2 = (L_2)^2 = \left[L_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)\right]^2 = (L_1)^2 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)^2$$

$$\Rightarrow S_2 = S_1 \cdot (1 + 2\alpha \cdot \Delta T + \alpha^2 \cdot \Delta T^2) \rightarrow \text{négligeable}$$

$$\alpha \cong 10^{-6}$$

$$\alpha^2 \cong (10^{-6})^2 = 10^{-12} = 0{,}000000000001$$

$$\Rightarrow \boxed{S_2 = S_1 \cdot (1 + 2\alpha \cdot \Delta T)} \Rightarrow S_2 = S_1 + S_1 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T$$

$$\Rightarrow S_2 - S_1 = S_1 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} \Delta S = S_1 \cdot 2\alpha \cdot \Delta T \\ S_2 = S_1 + \Delta S \end{array}}$$

Dilatation volumique :

$$\boxed{V_2 = V_1 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta T)} \Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} \Delta V = V_1 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T \\ V_2 = V_1 + \Delta V \end{array}}$$

Exercice 1

Un fil de fer a une longueur de 3 km à la température de 40 °C. Quelle est sa longueur à -30 °C ?
Rép. 2997.70 m

Exercice 2

Un fil de cuivre a une longueur de 1 km à la température de 20 °C. Quelle doit être sa température pour qu'il s'allonge de 10 cm ?
Rép. 25.9 °C

Exercice 3

Une tige de cuivre a une longueur de 1 m à la température de 20 °C. On veut fixer bout à bout deux tiges, l'une de fer, l'autre de plomb, de manière que la tige composée ait à toute température la même longueur que la tige de cuivre. Quelles doivent être les longueurs des tiges de fer et de plomb ?
Rép. 0.67 m et 0.33 m

11.1.2 dilatation des liquides

Dilatation des liquides :

$$\boxed{V_2 = V_1 (1 + \gamma \cdot \Delta T)}$$

γ = coefficient de dilatation volumique du liquide (cf. colonne 6)

$$\boxed{\begin{array}{l} \Delta V = V_1 \cdot \gamma \cdot \Delta T \\ V_2 = V_1 + \Delta V \end{array}}$$

Exercice 4

Quel est le volume d'huile qui, passant de 20 à 100 °C, subit un accroissement de 1 cm^3 ?
Rép. 17.4 cm^3

Exercice 5

Un thermomètre est constitué d'une capsule de verre soudée à un tube très fin. Le volume intérieur de la capsule est de 60 mm^3. La section intérieure du tube est de 0.01 mm^2. La capsule est remplie de mercure qui, à 20 °C, arrive au bas du tube. De combien le mercure s'élève-t-il dans le tube lorsque la température monte jusqu'à 100 °C ?
a) On néglige la dilatation du verre.
b) On tient compte de celle-ci.
Rép. 86 mm ; 74 mm

11.1.3 dilatation des gaz

Modèle d'un gaz parfait :

La théorie cinétique des gaz s'appuie sur le modèle d'un gaz parfait. Ce modèle repose sur les hypothèses qui suivent :

1. Un volume de gaz contient un très grand nombre de molécules de masse identique animées de vitesses aléatoires. A l'équilibre, le gaz remplit tout le volume de façon homogène.
2. Les molécules n'ayant pas de structure interne, leur énergie cinétique est uniquement une énergie de translation.
3. Les molécules n'interagissent pas, sauf durant de brèves collisions élastiques entre elles ou avec les parois du récipient contenant le gaz. Cela signifie que les forces de répulsion intenses qui s'exercent sont uniquement de courte portée. La durée de chaque collision est beaucoup plus courte que l'intervalle de temps séparant les collisions, de sorte que l'énergie potentielle associée à ces forces est négligeable.
4. La distance moyenne entre les molécules est très supérieure à leur diamètre. Cela signifie qu'elles occupent une fraction négligeable du volume du contenant.

Ces hypothèses sont valables dans la pratique pour les gaz réels maintenus à une faible pression et dont la température est très supérieure au point de liquéfaction.

La pression d'un gaz résulte des chocs des molécules contre les parois du récipient où il se trouve, ou contre les objets avec lesquels il est en contact. Si le volume mis à la disposition d'un gaz est fixe, une élévation de température – qui correspond à une augmentation de l'énergie cinétique moyenne des molécules – a pour conséquence que les chocs sur les parois sont plus fréquents et plus violents : la pression augmente. Par contre, lors d'une élévation de température à pression constante, les chocs devenant plus violents, il faut qu'ils se raréfient. Cela ne peut se faire que si le parcours des molécules devient en moyenne plus grand : le gaz augmente de volume.
Lorsqu'on refroidit un gaz à pression constante, son volume diminue. Les molécules se resserrent progressivement. Finalement, les forces de cohésion se manifestent et, pour ainsi dire, entassent les molécules les unes contre les autres : le gaz se liquéfie.

Loi des gaz parfaits : $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

P = pression du gaz en [Pa]

V = volume du gaz en [m^3]

n = nombre de moles du gaz en [mol]

1 mole d'eau = $6{,}02 \cdot 10^{23}$ molécules d'H_2O

1 mole de Fer = $6{,}02 \cdot 10^{23}$ atomes de Fer

exemple : combien y a-t-il de moles dans 1 [kg] d'eau ?

mole	1	n
g	18	1000

1 mole de H_2O = $6{,}02 \cdot 10^{23}$ molécules de H_2O = 18 [g]

n moles = . . . = 1000 [g]

$$n = \frac{1 \cdot 1000}{18} = 55{,}\bar{5}\ [\text{mol}]$$

R : constante des gaz parfaits = $8{,}31 \left[\frac{J}{K \cdot mol}\right]$

T = température en Kelvin

$\boxed{PV = nRT} \Rightarrow nR = \frac{PV}{T} \Rightarrow \frac{PV}{T}$ est constant si n est constant

$\Rightarrow \boxed{\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}}$

Si on veut comparer deux états d'une même quantité de gaz on utilise la variante suivante de cette loi :

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

P_1 et P_2	:	pressions du gaz aux états 1 et 2, mesurées dans la même unité
V_1 et V_2	:	volumes du gaz aux états 1 et 2, mesurés dans la même unité
T_1 et T_2	:	températures du gaz aux états 1 et 2 en $[K]$

Un processus se déroulant à pression constante est dit isobare. Dans ce cas la loi des gaz parfaits devient :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \qquad \text{(loi de Gay-Lussac)}$$

Un processus se déroulant à volume constant est dit isochore. Dans ce cas la loi des gaz parfaits devient :

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \qquad \text{(loi de Charles)}$$

Un processus se déroulant à température constante est dit isotherme. Dans ce cas la loi des gaz parfaits devient :

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \qquad \text{(loi de Boyle-Mariotte)}$$

Exercice 6

A pression constante, on fait passer de 10 à 100 °C la température d'un gaz dont le volume initial est de 0.5 dm^3. Quel est le volume final ?
Rép. 0.659 dm^3

Exercice 7

Un gaz à 20 °C a une pression de 60 cmHg. On double son volume et on élève sa température de 50 °C. Quelle est sa nouvelle pression ?
Rép. 35.1 cmHg

Exercice 8

Le volume d'un gaz parfait est de 25 cm^3 et sa température de -100 °C. On élève la température à 200 °C et on double la pression. Calculer le volume final.
Rép. 34.2 cm^3

Exercice 9

Quel volume faut-il donner à 3 g de tétrachlorure de carbone (Formule : CCl_4) pour que ce gaz ait, à la température de 120 °C, la pression de 10 cmHg ?
Rép. 4.77 dm^3

Exercice 10

Calculer la masse d'un litre d'azote à la pression normale et à la température de 50 °C.
Rép. 1.058 g

Exercice 11

Une pompe à vélo a une section intérieure de 4 cm^2. Le piston se trouvant à 25 cm de l'orifice, on bouche ce dernier puis on presse sur le piston avec une force de 50 N. A quelle distance de l'orifice vient-il se placer ? La température est supposée constante. La pression atmosphérique est de 72 cmHg.
Rép. 10.98 cm

Module 12. Chaleur (thermodynamique) : partie 3

Définition de la chaleur :

La chaleur est un transfert d'énergie entre deux corps résultant de leur différence de température.

Les formes d'énergies que peut posséder un objet :

$E_{mécanique}$

- E_{cin} = énergie cinétique → énergie due à la vitesse et à la masse de l'objet

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

- E_{pot} = énergie potentielle → énergie due à la position de l'objet

  $= mgh$ avec h = altitude de l'objet en [m], par rapport à une altitude 0.

  autres formes : $E_{pot} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot d^2$ (ressort comprimé)

  $E_{pot} = \frac{-GMm}{d}$ (énergie potentielle d'un satellite)

- Q = chaleur

- énergie de déformation

- énergie nucléaire, $E = mc^2$ ou $E = \Delta m \cdot c^2$ avec $c = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s}\right]$ ↓ vitesse de la lumière

Toutes ces formes d'énergie peuvent se transformer entre elles.

12.1 capacité thermique, chaleur spécifique (massive), chaleur latente

L'apport de chaleur à un corps peut soit augmenter sa température (sans changement d'état du corps), soit provoquer un changement d'état du corps (sans augmenter la température du corps) :

1° Augmentation de température sans changement d'état :

1) $Q = mc\Delta T$ = énergie ou la chaleur nécessaire pour augmenter (ou diminuer) de ΔT [°C] ou [K] la température d'un corps de masse m [kg].

avec c = chaleur massique du corps $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

↳ cf. formulaire p. 115-119 (colonnes 14-15-16)

ex. $c_{glace} = 2060 \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ → il faut 2060 [J] pour élever de 1 [°C] ou 1 [K] la température de 1 [kg] de glace

$c_{eau} = 4180 \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ → il faut 4180 [J] pour élever de 1 [°C] ou 1 [K] la température de 1 [kg] d'eau.

La formule $Q = mc\Delta T$ peut être utilisée lorsque l'objet ne change pas d'état lors de sa variation de température.

autre variante de la formule $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$

→ $Q = C \cdot \Delta T$

↳ capacité thermique $\left[\frac{J}{K}\right]$

$C = m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2 + \dots$

Exemples :

i) Quelle énergie faut-il pour chauffer 3 litres d'eau de 20 à 50°C ?

$$Q = m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T = 3 \cdot 4180 \cdot 30 = 376'200 \; [J]$$

$$\rho_{eau} = \frac{m_{eau}}{V_{eau}} \Longrightarrow \rho_{eau} \cdot V_{eau} = 998 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cong 3 \; [kg]$$

ii) Quelle chaleur faut-il pour chauffer 3 litres de glace de -50 à -20°C ?

$$Q = m_{glace}^{*} \cdot c_{glace} \cdot \Delta T = 2{,}75 \cdot 2060 \cdot 30 = 169'950 \; [J]$$

$$* = \rho_{glace} \cdot V_{glace} = 917 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 2{,}75 \; [kg]$$

iii) Quelle masse de fer peut-on chauffer de 20°C à 100°C avec 0,3 [MJ] ?

$$Q = mc\Delta T$$

$$\Longrightarrow m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{0{,}3 \cdot 10^{6}}{440 \cdot 8} = 8{,}52 \; [kg]$$

iv) Quelle est la température finale de 200 [g] d'or à 20°C recevant une chaleur de 20 [kJ] ?

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

$$\Longrightarrow \Delta T = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{20'000}{0{,}2 \cdot 130} = 769{,}2 \; [°C]$$

$$\Longrightarrow T_{finale} = 769{,}2 + 20 = 789{,}2°C < T_{fusion} \; (1064°C)$$

v) Quelle énergie faut-il enlever à 5 [kg] de cuivre solide pour en abaisser la température de 50°C ?

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 5 \cdot 390 \cdot 50 = 97'500 \; [J]$$

vi) Quelle énergie faut-il pour chauffer 2 litres d'eau à 20°C, contenu dans 1 casserole en fer de 500 [g], jusqu'à 40°C ?

$$Q = (m \cdot c \cdot \Delta T)_{eau} + (m \cdot c \cdot \Delta T)_{fer} = 2 \cdot 4180 \cdot 50 + 0{,}5 \cdot 440 \cdot 50 = 429'000 \; [J]$$

vii) On veut chauffer 3 [L] d'eau à 20°C contenus dans 1 calorimètre de capacité thermique égale à 1000 $\left[\frac{J}{K}\right]$, jusqu'à 50°C. Quelle énergie faut-il ?

$$Q (m \cdot c \cdot \Delta T)_{eau} + (C \cdot \Delta T)_{calorimètre}$$

$$= 3 \cdot 4180 \cdot 30 + 1000 \cdot 30 = 406'200 \; [J]$$

2° Changement d'état sans augmentation de température :

2) $Q = L \cdot m$ = chaleur ou énergie nécessaire pour faire changer d'état un objet de masse m (l'objet est à la température du changement d'état)

L : chaleur latente $\left[\frac{J}{kg}\right]$

$L_{glace-eau} = 3{,}3 \cdot 10^5 = 330'000 \left[\frac{J}{kg}\right] = L_{fusion}$

$L_{eau-vapeur} = 23 \cdot 10^5 = 2'300'000 \left[\frac{J}{kg}\right] = L_{vaporisation}$

Mélange de corps à différentes températures et température d'équilibre :

2 kg eau 40°C | 2 kg eau 20°C

Temp. d'équilibre = $T_{éq}$ = 30°C

2 kg eau 40°C | 5 kg eau 20°C

$T_{éq} \neq 30°C$

2kg eau
40°C

2kg fer
20°C

$T_{éq} \neq 30\,°C$

Règle : $\boxed{\text{Chaleur gagnée par le ou les corps froids}} = \boxed{\text{Chaleur perdue par le ou les corps chauds}}$

ex.

2 kg eau
40°C

5 kg eau
20°C

$T_{éq} = \,? = x$

$$Q_{gagnée} = Q_{perdue}$$

$$(m\,c \cdot \Delta T)_{\text{eau froide}} = (m \cdot c \cdot \Delta T)_{\text{eau chaude}}$$

$$5 \cdot \cancel{4180} \cdot (x - 20) = 2 \cdot \cancel{4180} \cdot (40 - x)$$

$$5x - 100 = 80 - 2x$$

$$7x = 180$$

$$x = \frac{180}{7} = 25{,}7\,°C$$

Exercice 1

Une petite boule de plomb tombe sur le sol d'une hauteur de 40 m. Si toute la chaleur développée par le choc est prise par la boule, quelle est l'élévation de température qu'elle subit ?
Rép. 3 K

Exercice 2

Quelle est l'élévation de température subie par une pièce de fer qui arrive à une vitesse de 200 m/s contre un mur ? On suppose que la moitié de la chaleur apparue est communiquée à la pièce.
Rép. 22 K

Exercice 3

Un obus arrive contre un blindage et y perd toute sa vitesse. Sous l'effet du choc, sa température passe de 20 °C à 800 °C. Il s'agit d'un obus d'acier massif. En admettant que 60% de la chaleur dégagée par le choc soit perdue, calculer la vitesse de l'obus.
Rép. $1.34 \cdot 10^3$ m/s

Exercice 4

Quelle quantité d'eau pourrait-on chauffer de 20 à 100 °C avec la chaleur dégagée par une lampe de 40 W qui fonctionne durant 1 heure ? On suppose que toute l'énergie consommée par la lampe est transformée en chaleur.
Rép. 0.429 kg

Exercice 5

Quel est le prix d'une kilocalorie si le prix d'un kWh est de 8 centimes ?
Rép. $9.32 \cdot 10^{-3}$ centime

Exercice 6

Une casserole d'aluminium ayant une masse de 500 g contient 2 litres d'eau. Un corps de chauffe de 1500 W plonge dans cette eau. Combien faut-il de temps pour élever la température de 15 à 98 °C ?
Rép. 8 min 9 s

Exercice 7

Pour chauffer 1 litre d'eau de 0 à 100 °C, on consomme une certaine quantité d'énergie électrique. Si cette énergie était consommée par le moteur d'une locomotive de 100 tonnes, initialement immobile, à quelle vitesse le véhicule serait-il amené ?
Rép. 10.4 km/h

Exercice 8

On met en contact 10 g d'eau à 50 °C et 60 g de fer à 20 °C. Quelle est la température d'équilibre ?
Rép. 38 °C

Exercice 9

Une casserole d'aluminium a une masse de 1.5 kg et contient 2 litres d'eau à 60 °C. Quelle masse d'eau à 10 °C faut-il ajouter dans la casserole pour qu'elle contienne de l'eau à 50 °C ?
Rép. 580 g

Exercice 10

Un vase de Dewar (bouteille Thermos) contient 120 g d'eau à 21 °C. Si on y verse 50 g d'eau à 36 °C, l'équilibre s'établit à 25 °C. Déterminer la capacité thermique du récipient.
Rép. 18 cal/K

Exercice 11

Un verre a une masse de 80 g. Il contient une cuillère d'argent de 40 g. Le tout est à la température de 20 °C. On verse dans le verre 1 décilitre de thé à 90 °C. Quelle est la température d'équilibre du système ?
Rép. 79 °C

Exercice 12

On met en contact 20 g de cuivre à 120 °C, 30 g de plomb à 50 °C et 15 g d'aluminium à -40 °C. Quelle est la température d'équilibre du système ?
Rép. 22 °C

Exercice 13

Dans une casserole de fer dont la masse vaut 1 kg, il y a 500 g de glace (ou de neige). Le système a une température initiale de -10 °C. On met la casserole sur une plaque chauffante dont la puissance est de 1800 W, jusqu'à ce que la glace ait été transformée en vapeur. En supposant les pertes de chaleur négligeables, calculer les quantités de chaleur dégagées par la plaque pour les diverses étapes du processus. Calculer aussi les durées de ces étapes.

Rép.	échauffement :	$1.5 \cdot 10^4$ J ; 8.3 s
	fusion :	$17 \cdot 10^4$ J ; 94 s
	échauffement :	$26 \cdot 10^4$ J ; 144 s
	vaporisation :	$113 \cdot 10^4$ J ; 627 s

Exercice 14

On place un bloc de glace de masse m, à 0 °C, dans un récipient de cuivre dont la masse est de 1 kg et la température de 100 °C. Quel est l'état final du système dans les deux cas suivants :
a) m = 20 g ; rép. 68 °C
b) m = 200 g ; rép. 0 °C, 85 g de glace, 115 g d'eau

Exercice 15

Dans un récipient d'aluminium ayant une masse de 200 g et contenant un demi-litre d'eau à 20 °C, on place 40 g de glace à -10 °C. Quelles sont les caractéristiques de l'état d'équilibre ?
Rép. eau à 12.8 °C

Exercice 16

Un verre vide a une masse de 60 g et une température de 20 °C. On y verse 1 décilitre de thé à 90 °C. Pour refroidir ce breuvage, on y met un petit cube de glace de 3 cm de côté. Cette glace sort d'un congélateur où règne une température de -10 °C. Calculer la température d'équilibre du système, en admettant que 1000 calories sont perdues dans l'atmosphère.
Rép. 45 °C

Exercice 17

Un verre a une masse de 50 g et contient 1.5 décilitre d'eau à 20 °C. Quelle masse de vapeur d'eau à 100 °C faut-il faire arriver dans ce verre pour élever sa température jusqu'à 60 °C ?
Rép. 11 g

12.2 modes de transfert de la chaleur

La chaleur se transmet par conduction, convection ou rayonnement

a) Conduction

Une source de chaleur en contact avec un objet solide va transmettre son énergie aux molécules de l'objet à l'endroit du contact. Ceci va augmenter l'énergie de vibration de ces molécules. Par collision ces molécules vont transmettre cette énergie aux molécules voisines, qui vont à leur tour augmenter leur énergie de vibration et continuer la transmission plus loin. La chaleur se transmet ainsi dans tout le corps solide.

b) Convection

Une source de chaleur en contact avec un liquide ou un gaz va transmettre son énergie aux molécules du fluide à l'endroit du contact. Les liaisons moléculaires étant faible, la partie du fluide chauffée (composée de molécules plus agitées, occupant donc une place plus grande), moins dense et donc plus légère, va remonter dans le fluide et être remplacée par du fluide plus froid, plus dense et donc plus lourd. Ce fluide est à son tour chauffé et remontera donc, et ainsi de suite. Ce mouvement de fluide chaud vers le haut remplacé par du fluide froid est appelé convection, et permet de chauffer l'ensemble du fluide.

c) Rayonnement

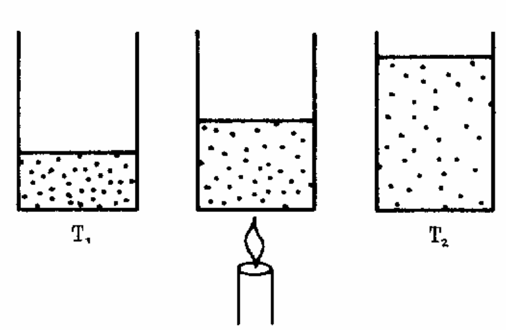
L'énergie d'une source chaude (comme le soleil par exemple) est contenu dans les rayon solaire (ondes électromagnétiques) et peut se propager dans le vide (la conduction et la convection sont bien sûr impossible dans le vide). Lorsqu'un rayon heurte un objet, il transmet son énergie à cet objet.

12.3 Caléfaction

La caléfaction (du latin calefacere : chauffer) est un phénomène d'isolation thermique d'un liquide par rapport à une surface chauffante ayant atteint une température seuil T_s supérieure à la température d'ébullition du liquide T_e. Ce phénomène est dû à la formation d'une couche de vapeur entre la surface chauffante et le liquide, rendant le transfert de chaleur beaucoup plus lent. Quand la température de la surface diminue (mais reste comprise entre T_e et T_s) il se produit une ébullition brutale (cause de nombreuses explosions de chaudières aux premiers temps de la machine à vapeur). La caléfaction est couramment observée quand une goutte d'eau tombe sur une poêle très chaude. La goutte semble rouler sur la surface et ne se vaporise pas immédiatement.

12.4 premier principe de la thermodynamique

Illustration à l'aide d'un exemple particulier :



Un gaz est enfermé dans un cylindre muni d'un piston. A l'aide d'une flamme, on le fait passer d'une température T_1 à une température T_2. Le gaz subit ainsi une dilatation à pression constante. Soient p la pression du gaz, S la section du cylindre et Δh le déplacement du piston. Le gaz exerce sur ce dernier une force

$F = pS$

Lors du déplacement du piston, le gaz effectue un travail

$\Delta A = F\Delta h = pS\Delta h$

$S\Delta h$ est l'accroissement de volume. Désignons-le par ΔV. On a alors :

$\Delta A = p\Delta V$

Le travail effectué par le gaz peut donner lieu à un accroissement de l'énergie potentielle du piston. De façon plus générale, il est une mesure de l'énergie mécanique transmise par le gaz au milieu extérieur.
Quelles sont les autres énergies intervenant dans ce processus ? De l'énergie mécanique désordonnée a passé des particules de la flamme à celles du gaz. En d'autres termes, la flamme a transmis de la chaleur au gaz. Cette énergie a servi d'une part à accroître l'énergie des molécules du gaz et d'autre part à fournir de l'énergie mécanique à l'extérieur sous forme de travail. Si on admet que l'énergie se conserve, on peut écrire :

chaleur communiquée au gaz = accroissement de l'énergie des particules du gaz + travail fourni par le gaz à l'extérieur.

Cet exemple particulier conduit aux considérations générales suivantes :

Définition : On appelle énergie interne d'un corps la somme des énergies de ses particules.

Toutes les formes d'énergie possibles – cinétique de translation, cinétique de rotation, potentielle, et même intra-atomique ou nucléaire – sont prises en considération dans l'énergie interne. L'énergie interne est notée U et son accroissement ΔU .

L'énergie mécanique désordonnée communiquée aux particules d'un corps est la chaleur reçue par ce corps. On la note $Q^{\swarrow}$.

Toutes les fois qu'un corps subit des variations de volume, il effectue un travail. Et par ce travail, il échange de l'énergie mécanique avec le milieu extérieur. Ce travail est noté $A^{\nearrow}$.
Le principe de conservation de l'énergie permet de postuler le premier principe de la thermodynamique :

$$Q^{\swarrow} = \Delta U + A^{\nearrow}$$

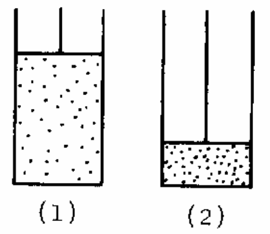
avec

$Q^{\swarrow}$	:	quantité de chaleur reçue pas le système (ou par un corps)
ΔU	:	variation de l'énergie interne
$A^{\nearrow}$	:	travail mécanique fourni par le système (ou par un corps)

Si la chaleur reçue par le système est négative, cela signifie que le système a fourni de la chaleur. Si l'énergie interne subit un accroissement négatif, c'est qu'elle diminue. Et si le travail effectué est négatif, c'est que le volume du corps diminue.
Si un corps subit des transformations dans lesquelles il n'échange pas de chaleur avec le milieu extérieur, on dit qu'il subit un processus adiabatique. On a alors $Q^{\swarrow} = 0$.

L'énergie interne d'un corps n'est pas toujours une fonction univoque de la température. Il en est ainsi parce qu'elle est la somme de toutes les énergies portées par les particules, tandis que la température est en relation avec leur énergie cinétique moyenne de translation. Dans certains cas, l'apport de chaleur à un corps n'augmente pas l'énergie cinétique des molécules, mais leur énergie potentielle. Lorsqu'il en est ainsi, l'énergie interne augmente et la température reste constante. C'est ce qui se passe lorsqu'un solide se liquéfie. Les molécules se libèrent petit à petit du corps solide pour constituer le liquide.

Compression adiabatique d’un gaz :



Si on comprime un gaz en prenant soin qu’il ne reçoive aucune chaleur de l’extérieur, on a :

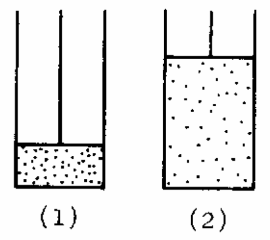
$$Q^{\swarrow} = 0$$

D’après le premier principe, on a alors :

$$\Delta U + A^{\nearrow} = 0$$

Les deux termes ΔU et $A^{\nearrow}$ doivent être opposés. Le travail effectué par le gaz étant négatif, l’énergie interne subit un accroissement positif. La température du gaz s’élève. On voit donc que s’il n’y a pas d’échange de chaleur avec l’extérieur, un gaz s’échauffe lorsqu’on le comprime.

Détente adiabatique avec travail extérieur :



Considérons le processus inverse. Supposons qu’un gaz subisse une expansion en exerçant une force sur une paroi qu’il déplace. C’est ce qui se passe par exemple lorsqu’un gaz chasse un piston dans un moteur à explosion ou dans une machine à vapeur. Bien qu’il n’y ait pas de paroi matérielle, c’est aussi ce qui se passe lorsqu’un gaz se détend dans l’atmosphère. Il doit effectuer un travail pour repousser l’air ambiant. Si le système n’échange pas de chaleur avec l’extérieur, on a :

$$Q^{\swarrow} = 0$$

D’où

$$\Delta U + A^{\nearrow} = 0$$

Le travail fourni par le gaz est positif. Il en résulte une diminution correspondante de l’énergie interne. La détente du gaz dans de telles conditions produit donc un abaissement de température.

12.5 Deuxième principe de la thermodynamique

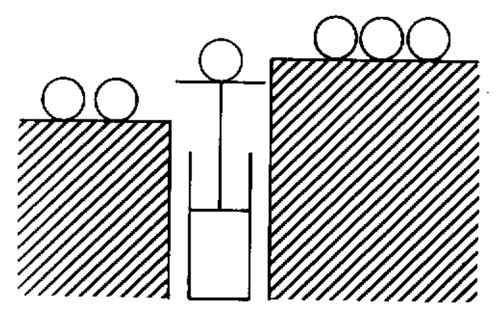
Le premier principe nous apprend qu’un système peut fournir du travail s’il reçoit de la chaleur ou si son énergie interne diminue. Cela suggère l’idée de construire des machines qui fournissent du travail de façon continue. De telles machines doivent avoir un fonctionnement cyclique. On entend par là qu'après le déroulement d'un certain processus appelé cycle, la machine doit se retrouver dans son état initial et être apte à effectuer un nouveau cycle. Dans un processus cyclique, l'état final étant identique à l'état initial, l'énergie interne a la même valeur dans ces deux états. Sa variation totale est donc nulle.

$$\Delta U = 0$$

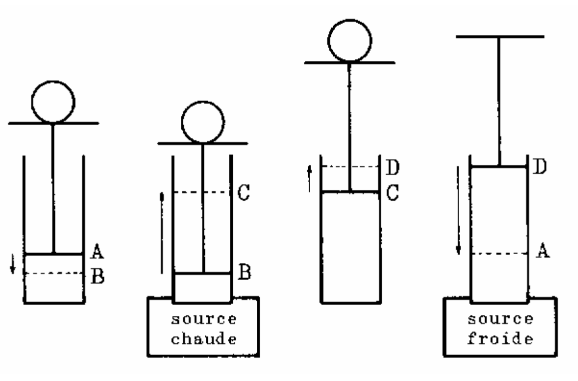
D'après le premier principe on a :

$$Q^{\swarrow} = A^{\nearrow} \qquad (1)$$

Si on veut que la machine fournisse du travail, $A^{\nearrow}$ doit être positif. $Q^{\swarrow}$ doit l'être aussi, ce qui signifie que la machine doit recevoir de la chaleur. Tout système fonctionnant ainsi est appelé machine thermique. Une machine thermique est un système qui, fonctionnant de façon cyclique, reçoit de la chaleur et produit du travail. D'après la dernière égalité, le travail fourni par la machine est égal à la chaleur totale reçue. Ce résultat n'est qu'une expression particulière de la loi générale de conservation de l'énergie. On ne peut obtenir du travail d'une machine sans lui fournir une quantité d'énergie équivalente.



Voici un exemple schématique de machine thermique. On veut élever des objets d'une certaine hauteur. On se sert pour cela d'un cylindre vertical dans lequel coulisse un piston. Celui-ci est lié rigidement à un plateau sur lequel on place les objets à élever. Le cylindre contient un gaz, de l'air par exemple, qui peut être mis en contact thermique avec des réservoirs de chaleur, l'un chaud, l'autre froid, et qui sont maintenus à température constante. Ces réservoirs sont appelés source chaude et source froide. La machine fonctionne selon le cycle suivant.



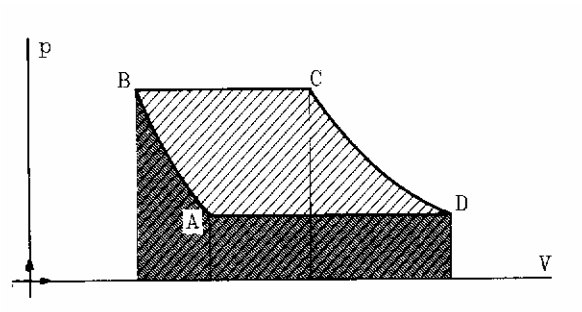
1er temps : On place un des objets à élever sur le plateau. Le gaz subit une compression brusque, adiabatique.

2ème temps : On met le gaz en contact avec la source chaude. Il reçoit de la chaleur et sa température s'élève. Il se dilate à pression constante. Le système fournit du travail utile qui apparaît sous forme d'accroissement de l'énergie potentielle de l'objet qu'on élève.

3ème temps : On ôte l'objet du plateau. Le gaz subit une détente brusque, adiabatique.

4ème temps : On met le gaz en contact avec la source froide. Le gaz se refroidit. Il se contracte à pression constante. Le plateau redescend jusqu'un niveau initial où on peut le charger à nouveau et recommencer le cycle.

Dans un diagramme pression-volume, le processus cyclique est représenté par une courbe fermée ABCD. Pour chacun des quatre tronçons, le travail effectué par la machine est représenté par l'aire de la surface comprise entre le tronçon, l'axe des volumes et des parallèles à l'axe des pressions. Ces travaux sont positifs lorsque le volume augmente (tronçons BC et CD), négatifs lorsqu'il décroît (tronçons AB et DA). Le travail total effectué dans un cycle est égal à la somme de ces quatre travaux. En tenant compte des signes, on voit qu'il est représenté par l'aire de la surface limitée par la courbe fermée ABCD.



Cet exemple met en évidence une caractéristique commune à toutes les machines thermiques : le système reçoit de la chaleur à la source chaude et fournit de la chaleur à la source froide. Désignons ces deux chaleurs par $Q_c^{\swarrow}$ et $Q_f^{\nearrow}$, ces quantités étant définies positives. La chaleur totale reçue par le système dans un cycle est :

$$\Delta U = Q_c^{\swarrow} - Q_f^{\nearrow}$$

Et d'après l'équation (1) on a :

$$Q_c^{\swarrow} - Q_f^{\nearrow} = \Delta A$$

$$Q_c^{\swarrow} = \Delta A + Q_f^{\nearrow}$$

La chaleur reçue par la machine à la source chaude se partage en deux parties : l'une est transformée en travail, l'autre est transmise à la sourde froide. Il est évident que l'on a intérêt à réduire autant que possible le terme $Q_f^{\nearrow}$. Il serait même souhaitable qu'il soit nul et que toute la chaleur reçue à la source chaude soit transformée en travail. Si on pouvait réaliser une telle machine, on pourrait supprimer la source froide. On pourrait prendre comme source chaude un réservoir qui ne coûte rien, l'eau d'un lac par exemple. La chaleur prise au lac n'entraînerait qu'un abaissement de température négligeable de celui-ci et serait transformée intégralement en travail. On pourrait produire autant de travail que l'on veut sans prendre la peine de chauffer quoi que ce soit et d'acheter du combustible. En fait, la nature s'oppose à la réalisation de machines thermiques de cette sorte et la physique à dû postuler :

<u>Deuxième principe de la thermodynamique</u> :

Il est impossible de réaliser un processus cyclique fournissant du travail à partir d'une seule source de chaleur.

Une des plus connues des machines thermiques est la machine à vapeur. Le foyer est la source chaude, l'air ambiant la source froide.

Le premier principe pose l'équivalence de la chaleur et de l'énergie mécanique. Le second principe amène une restriction dans les possibilités de transformation d'une de ces formes d'énergie à l'autre. Transformer de l'énergie mécanique en chaleur est toujours possible. C'est ce que font par exemple les frottements. Transformer de la chaleur en énergie mécanique n'est possible que dans une certaine mesure. Une partie de la chaleur prise à la source chaude est nécessairement perdue à la source froide. La chaleur se présente ainsi comme une énergie de moindre qualité que l'énergie mécanique. On dit parfois que c'est de l'énergie dégradée.

On peut établir que le rendement maximal d'une machine thermique est :

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

où T_f est la température de la source froide et T_c la température de la source chaude, en Kelvin.

12.6 Combustible en tant que source d'énergie

Un combustible est une matière qui, en présence d'oxygène et d'énergie, peut se combiner à l'oxygène (qui sert de comburant) dans une réaction chimique générant de la chaleur : la combustion.

La plupart des matériaux d'origine organique sont des combustibles. Par exemple, le bois (16 000 kilojoules par kilo), le charbon, le pétrole (42 000 kilojoules par kilo pour l'essence) sont des combustibles. Le pouvoir énergétique des combustibles se mesure en principe en Joules par kilogramme [$J \cdot kg^{-1}$]. Cela signifie par exemple que la combustion d'un kilo de bois libère 16 millions de Joules.

On distingue:

Les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz...), issus de matières organiques préhistoriques fossilisées. Leur combustion rejette dans l'atmosphère du dioxyde de carbone (CO2) qui provient de la combinaison d'atomes de carbone issus du sous-sol et d'oxygène atmosphérique. Ces rejets de CO2 participent à l'effet de serre et aux changements climatiques actuels.
Les biocombustibles (biocarburants liquides, copeaux ou granulés de bois, céréales et autres aspects de la biomasse), issus de plantes vivantes. Leur combustion présente un bilan CO2 beaucoup plus faible (pour autant qu'on replante ce qui a été coupé) puisqu'elle rejette le CO2 atmosphérique qu'ils ont accumulé au cours de leur croissance par photosynthèse. C'est donc une énergie renouvelable, mais pas non polluante.
On parle aussi de combustible nucléaire pour désigner les matières utilisées pour produire de l'énergie par fission dans les centrales nucléaires, bien qu'il ne s'agisse pas d'une réaction de combustion.

Exercice 18

Un gaz est enfermé dans un cylindre vertical par un piston de masse 2 kg et de rayon 1 cm. Lorsqu'on ajoute 5 J de chaleur, le piston s'élève de 2.4 cm. La pression atmosphérique est égale à 10^5 [Pa]. (g=9.81 m/s^2)

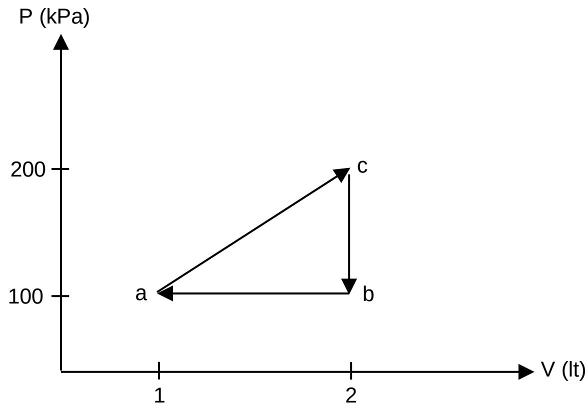
Déterminer

a) le travail effectué par le gaz
b) la variation de son énergie interne.

Rép. 1.22 J ; 3.78 J

Exercice 19

Lorsqu'un gaz est soumis à un processus représenté par la ligne droite de a à c, le système reçoit 180 J de chaleur.



a) déterminer le travail effectué de a à c
b) Si U_a = 100 J, trouve U_c
c) Quel est le travail effectué par le gaz lorsqu'il revient à a en passant par b ?
d) Quelle est la chaleur transmise au cours du processus cba ?

Rép. 150 J ; 130 J ; -100 J ; -130 J

Exercice 20

Un moteur thermique dont le rendement est égal à 25% effectue 200 J de travail par cycle. Trouver :

a) la chaleur absorbée au réservoir chaud
b) la chaleur cédée au réservoir froid

Rép. 800 J ; 600 J

Exercice 21

Un moteur thermique utilise comme réservoirs thermiques l'eau d'un geyser à 90 °C et l'atmosphère à 10 °C. Quel est son rendement maximal possible ?

Exercice 22

En chauffant des serres à l'aide de la géothermie, on réalise une économie équivalente à 4000 tonnes de charbon par an. Comparer l'énergie utilisée à celle produite par la consommation de charbon et de bois à Genève, soit $1.5 \cdot 10^{14}$ J.
(1 kg de charbon fournit une énergie de 32 MJ)

Exercice 23

Le contenu calorifique d'une tonne d'ordures est d'environ 2300 kWh. On arrive à en extraire 350 kWh.

a) Calculer le rendement de la combustion d'une tonne d'ordures
b) Quelle quantité de pétrole l'Electricité de France économise-t-elle en brûlant les 2 millions de tonnes d'ordures que produit Paris chaque année ? (1 kg de pétrole brûlé fournit une énergie électrique de 3 kWh).

Rép. 15.2 % ; $233 \cdot 10^{6}$ kg

Exercice 24

Comparer le besoin en énergie pour le déplacement d'une personne de Lausanne à Berne. Longueur du trajet : 100 km

<u>à pied</u>

- poids d'une personne : 80 kg
- Vitesse moyenne : 5 km/h
- Puissance moyenne durant l'effort : 300 W
- Pouvoir calorifique de la graisse : 37 MJ/kg

<u>à vélo</u>

- – Vitesse moyenne : 20 km/h
- – Puissance moyenne durant l'effort : 800 W
- – Pouvoir calorifique de la graisse : 37 MJ/kg

<u>en voiture</u>

- – vitesse moyenne : 80 km/h
- – consommation : 8 litres/100 km
- – pouvoir calorifique de l'essence : 44 MJ/kg
- – densité essence : 0.75 kg/lt

<u>en train</u>

- – vitesse moyenne : 100 km/h
- – consommation en énergie : 0.06 kWh/km

Exercices tirés d'anciens examens de maturité :

QCM

a) (été 2008)

Un inventeur prétend avoir trouvé un liquide (différent du mercure) qui a le même coefficient de dilatation volumique que le verre. Il vous propose d'utiliser ce fluide, coloré en rouge, pour fabriquer un thermomètre extrêmement précis.

- ❒ Vous acceptez sa proposition car la couleur rouge donne un bon contraste
- ❒ Vous refusez sa proposition car un thermomètre doit fonctionner avec du mercure
- ❒ Vous acceptez car les coefficients de dilatation sont les mêmes
- ❒ Vous refusez car les coefficients de dilatation sont les mêmes
- ❒ aucune des réponses ci-dessus

b) (été 2008)

De l'eau, dans un récipient ouvert, bout sur un réchaud à gaz. Si on augmente le feu, il résulte que:

- ❒ la température de l'eau augmente
- ❒ à durée égale, la quantité d'eau vaporisée augmente
- ❒ la température de la vapeur d'eau augmente
- ❒ rien ne change
- ❒ aucune des réponses ci-dessus

c) (hiver 2008)

L'eau a une chaleur massique plus grande que celle de l'alcool. A masse égale, pour augmenter leur température d'un degré Kelvin, il faut

- ❒ fournir plus d'énergie pour l'eau que pour l'alcool
- ❒ fournir moins d'énergie pour l'eau que pour l'alcool
- ❒ fournir autant d'énergie pour l'eau que pour l'alcool
- ❒ connaître la masse de ces liquides pour déterminer l'énergie à fournir

d) (été-automne 2007)

Deux corps sont à la même température si :

- ❒ ils contiennent tous les deux la même quantité de chaleur
- ❒ l'énergie cinétique totale des particules de l'un est égale à l'énergie cinétique totale des particules de l'autre
- ❒ ils perdent de la chaleur à la même vitesse
- ❒ aucun transfert de chaleur de l'un à l'autre ne se produit lorsqu'on les met en contact

Exercice 1 *(été 2008)*

Une pompe à vide moderne peut atteindre un pression de 10^{-15} atm dans une enceinte de volume 1 cm^3 à la température de 273 K.

2.3.1 Calculer le nombre de mole de gaz restant dans cette enceinte après avoir fait le « vide ».

2.3.2 Calculer le nombre de molécules restantes.

2.3.3 Calculer le volume moyen à disposition pour chacune de ces molécules.

Exercice 2 *(printemps 2007)*

3.2 Dans une expérience pour mesurer la chaleur latente de fusion de l'eau, on chauffe au moyen d'un thermoplongeur un mélange de 207 g de glace fondante et 293 g d'eau à 0°C.

3.2.1 Quelle doit être la puissance de chauffage P du thermoplongeur, sachant que si les pertes étaient nulles, la température du mélange après 6 minutes serait de 19°C ?

(4 points)

3.2.2 "Lorsqu'on réalise l'expérience, on mesure un temps de chauffage de 6 minutes 30 s. Expliquer la différence de temps par rapport à la valeur théorique de 6 minutes.

(1 point)

Exercice 3 *(automne 2006)*

2.1 **(5 points)**

Les 4 pneus d'une voiture sont gonflés à la pression de 2,5 bars.
La surface de contact d'***un*** pneu avec le sol est de 180 cm^2.

2.1.1 Calculer la masse globale de ce véhicule.
N.B. : On supposera que la masse de la voiture est répartie en parts égales sur les 4 roues.

2.1.2 Calculer le nombre de moles d'air contenues dans un pneu de cette voiture, sachant que le volume de ce pneu est de 26 litres et que la température est de 7°C.

2.1.3 Au soleil, la température du pneu (et donc de l'air qu'il contient) monte à 57°C.
Que vaut alors la pression de l'air dans le pneu ?
Considérer que ni la masse d'air enfermée, ni le volume du pneu n'ont varié : V_{pneu} = 26 litres.

Exercice 4 *(printemps 2004)*

La surface du lac de Joux est de 9,5 km^2. Au début de l'hiver, la température de l'eau est de 10 °C.

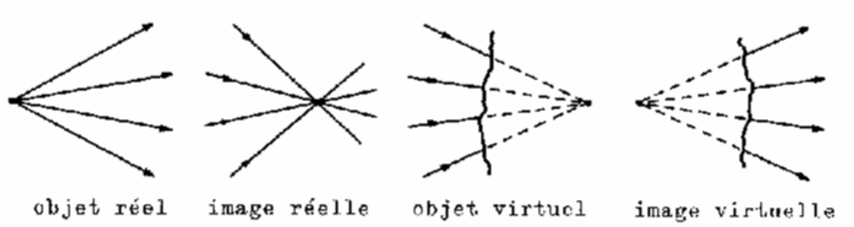
a) Au cours de ce même hiver, il se forme une couche uniforme de glace de 10 cm d'épaisseur, sur toute la surface du lac. Quelle quantité d'énergie est mise en jeu dans cette couche pour obtenir la glace?

b) Quelle est la cause de ce transfert d'énergie: le Soleil, le lac, les rives du lac, l'air ambiant ? Indiquer la bonne réponse et justifier. **(5 points)**

Module 13. La lumière : partie 1

Principe de Fermat : Pour passer d'un point à un autre, la lumière suit toujours le trajet qui prend le moins de temps.

Un point d'où partent des rayons lumineux est un objet réel, un point où convergent des rayons lumineux est une image réelle, un point où iraient converger des rayons lumineux s'il n'y avait pas d'obstacle est un objet virtuel, un point d'où semblent provenir des rayons lumineux est une image virtuelle.



13.1 propagation rectiligne de la lumière

Selon le principe de Fermat, dans un milieu homogène, le trajet le plus bref entre deux points est la ligne droite.

Exercice 1

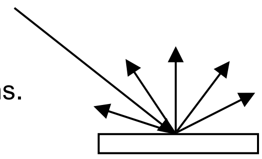
Observé depuis la terre, le soleil apparaît sous un angle de 0.533°. On laisse passer les rayons solaires à travers un très petit trou. Quel est le diamètre de la tache lumineuse que font ces rayons s'ils tombent à peu près perpendiculairement sur un écran situé à 2 m du trou ? (Rép. 19 mm)

Exercice 2

Une boule de 20 cm de diamètre est posée sur un pieu vertical de 20 cm de haut. Les rayons du soleil, qu'on suppose parallèles, ont à ce moment une inclinaison de 50° et projettent l'ombre de ces objets sur le sol. L'ombre a la forme d'une ellipse posée sur un bâton. Calculer les axes de l'ellipse et la longueur du bâton.
Rép. 26.1 cm ; 20 cm ; 12.1 cm

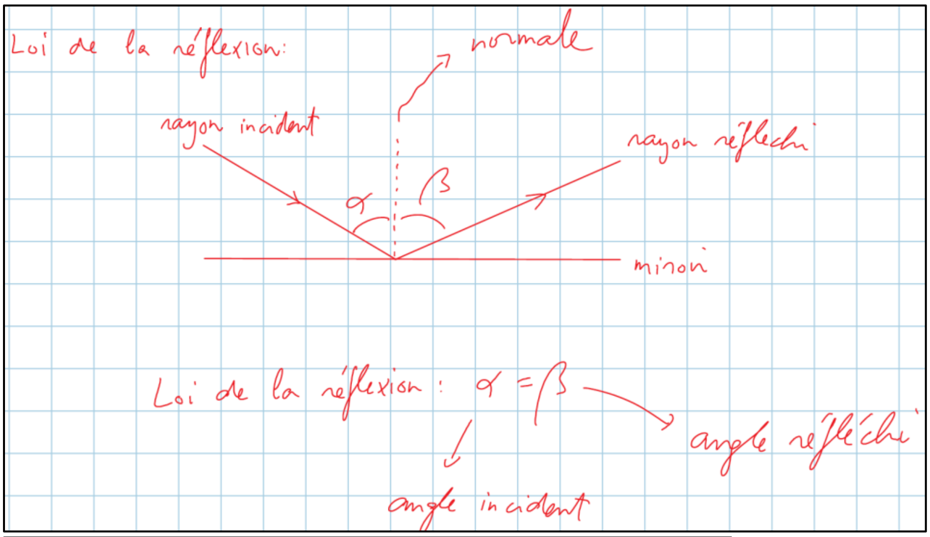
13.2 diffusion

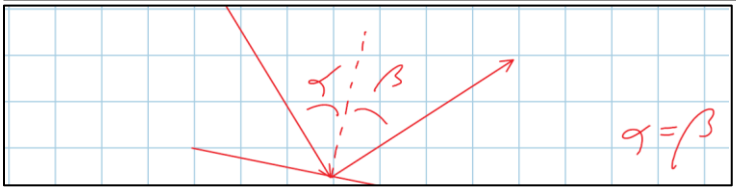
Chaque point de l'objet éclairé renvoie la lumière dans toutes les directions.



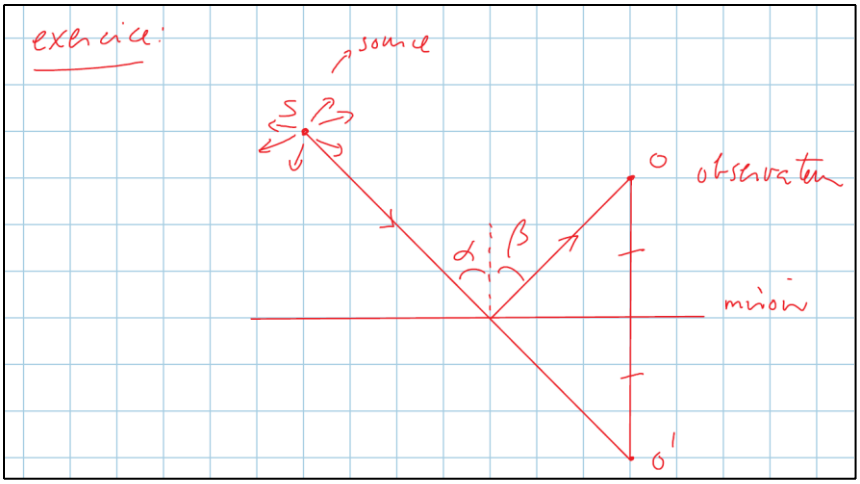
13.3 réflexion

Une partie importante de la lumière que reçoit un objet est renvoyée dans une direction privilégiée.

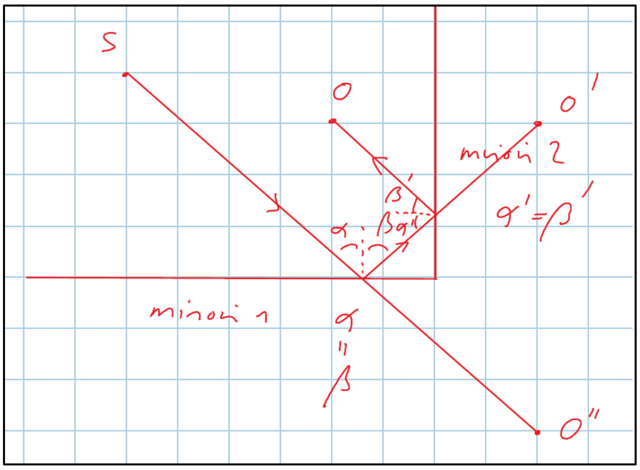




Question 1 : quel est le trajet du rayon émis par une source de lumière, arrivant au point o (observateur), après avoir été réfléchi par un miroir ?



Question 2 : quel est le trajet du rayon émis par une source de lumière, arrivant au point o (observateur), après avoir été réfléchi par deux miroirs ?



Exercice 3

Une personne a une hauteur totale de 160 cm. Ses yeux sont 10 cm au-dessous du sommet de sa tête. Elle se regarde dans un miroir vertical situé à 1 m d'elle. Déterminer la hauteur du plus petit miroir qui lui permet de se voir entièrement et indiquer où il doit être placé. (Rép. 80 cm ; à 75 cm du sol)

Exercice 4

Un corridor a une largeur de 1.80 m. Un miroir rectangulaire de 40 cm sur 30 cm est fixé au mur. Un homme se tient devant le miroir, à 60 cm de celui-ci. Il y voit une partie du mur qui est derrière lui. Quelles sont les dimensions de cette portion de mur ? On ne se préoccupera pas de ce que l'homme cache par son corps et on fera comme s'il n'avait qu'un œil. (Rép. 160 cm x 120 cm)

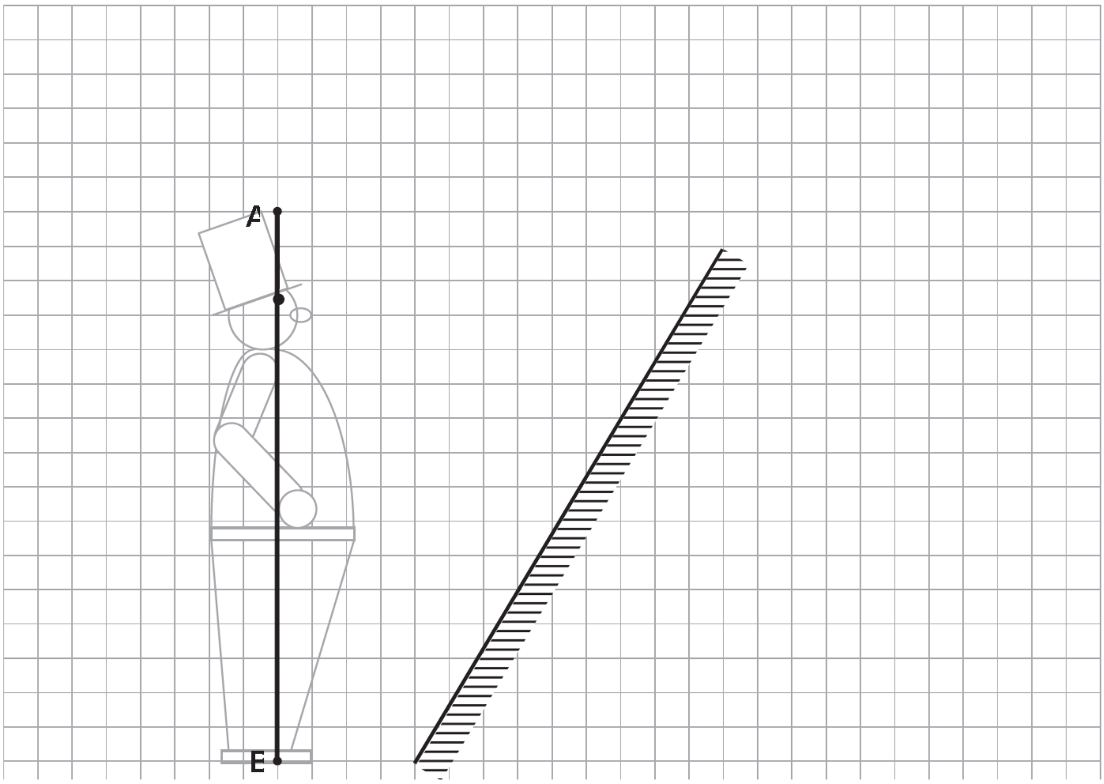
Exercice tirés d’anciens examens de maturité :

2.1 (5 points)

Au magasin, une personne qui essaie un vêtement se regarde dans un miroir plan, incliné comme l’indique la figure ci-dessous.

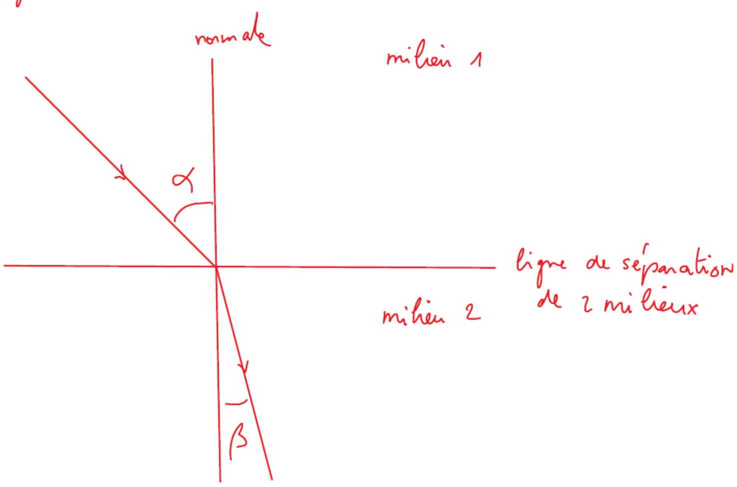
2.1.1 Marquer sur le dessin les images (**A’** et **B’**) des points **A** et **B** qui correspondent au sommet du chapeau et à ses pieds.
Tracer également l’image (un simple trait droit) de la personne.

2.1.2 Déterminer par une construction et marquer sur le dessin les extrémités (**M** et **N**) de la partie du miroir qui est indispensable pour que la personne puisse se voir en entier (de **A'** à **B'**).



13.4 réfraction

Loi de la réfraction



α : angle d'incidence

β : angle de réfraction

Loi de la réfraction

indice de réfraction dans le 2ème milieu

cf. formulaire

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}}$$

ou

Loi de Descartes
ou
Loi de Snellius

indice de réfraction dans le 1er milieu

v_1 : vitesse dans le milieu 1

v_2 : vitesse dans le milieu 2

<u>Autre forme de la loi de la réfraction</u> :

$n_1 sin\alpha_1 = n_2 sin\alpha_2$, avec α_1 : angle d'incidence et α_2 : angle de réfraction

Le milieu possédant l'indice petit est dit moins réfringent que celui possédant l'indice grand, qui lui est donc plus réfringent. Par exemple l'eau et le verre sont plus réfringents que l'air et l'eau est moins réfringente que le verre.

Il faut se souvenir de la règle suivante :

Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu A vers un milieu B plus réfringent, il se rapproche de la normale.
Si le milieu B est moins réfringent, il s'écarte de la normale.

Conséquence de la loi de la réfraction : vitesse de la lumière dans un milieu d'indice n

$\Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow v_1 = \frac{n_2 v_2}{n_1}$

célérité

si le milieu 2 est le vide alors $v_2 = 3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s}\right] = C$

$n_2 = 1$

$\Rightarrow v_1 = \frac{1 \cdot C}{n_1} \Rightarrow \boxed{v = \frac{c}{n}}$

vitesse de la lumière dans un milieu d'indice n

Exercice 7

L'indice de réfraction du verre vaut 1.5 et celui de l'eau 1.33.
a) Calculer la vitesse de la lumière dans chacun de ces milieux.
b) Un rayon lumineux passe du verre dans l'eau. Son angle d'incidence étant de 50°, calculer l'angle de déviation du rayon.
Rép. $2 \cdot 10^8$ m/s ; $2.26 \cdot 10^8$ m/s ; 9.8°

Exercice 8

Trois milieux d'indices 1.5 ; 1.7 et 2 sont séparés par deux plans parallèles. Un rayon lumineux arrive du premier milieu sur le second avec un angle d'incidence de 55°. Calculer l'angle de réfraction dans le troisième milieu. Le résultat serait-il le même si le rayon passait directement du premier au troisième milieu ?
Rép. 37.9° ; oui

Exercice 10

Un récipient a un fond horizontal et une hauteur de 30 cm. Il est rempli de sulfure de carbone. Un rayon de lumière blanche pénètre dans le liquide par sa surface libre, avec un angle d'incidence de 80°. Calculer la distance qui sépare la tache rouge et la tache violette qu'on peut observer au fond du récipient. Dans le sulfure de carbone, la lumière rouge a une vitesse de 186500 km/s et la lumière violette une vitesse de 176600 km/s. Rép. 1.9 cm

Exercice 11

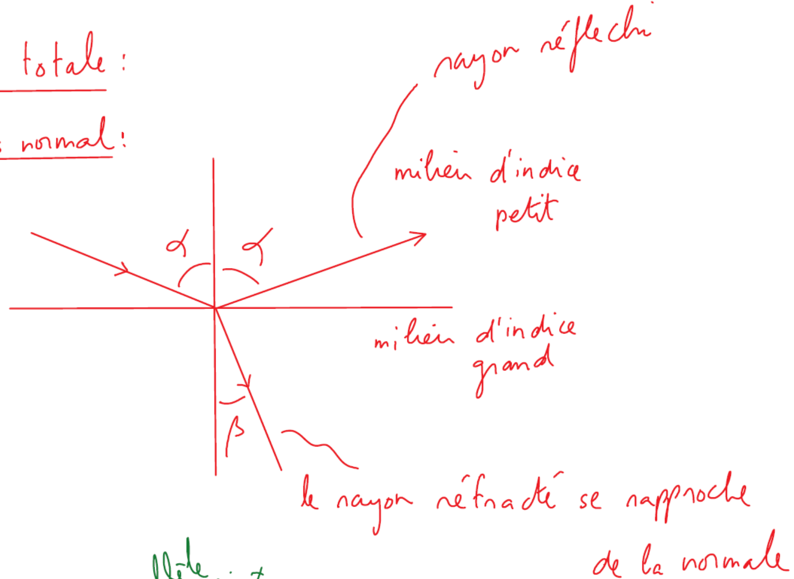
Une cuve de verre de forme cubique est remplie d'eau. L'indice de réfraction de l'eau est de 1.329 pour le rouge et de 1.344 pour le violet. Un rayon de lumière blanche arrive dans un plan horizontal, sur une face de la cuve, et sort sur la face adjacente. L'angle d'incidence est de 70°. Quel est l'angle que font à la sortie le rayon rouge et le rayon violet ? Rép. 3.9°

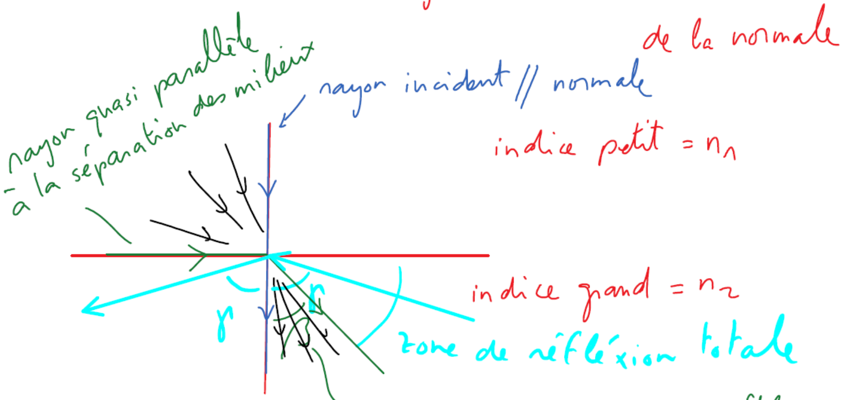
13.5 réflexion totale

Lorsqu'un rayon passe d'un milieu moins réfringent (indice petit) vers un milieu d'indice plus réfringent (indice grand), une partie du rayon est réfractée et l'autre réfléchie (environ 4%). Par contre si le rayon passe du milieu plus réfringent vers celui moins réfringent, il peut parfois être uniquement réfléchi et pas du tout réfracté : on parle de réflexion totale. L'angle limite β de réflexion totale se détermine par le raisonnement suivant, qui utilise le principe du retour inverse :

Réflexion totale :

cas normal :





β = angle limite de réflexion totale

$$\frac{\sin 0}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin\beta = \frac{n_1 \cdot \sin 0}{n_2} = 0 \Rightarrow \beta = 0 \Rightarrow$$ le rayon continue sans être dévié

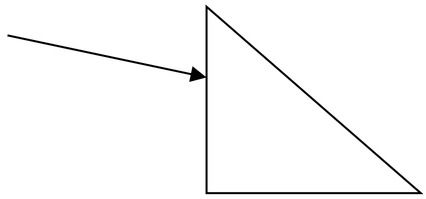
$$\frac{\sin 90}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin\beta = \frac{n_1 \cdot \overset{1}{\sin 90}}{n_2} \Rightarrow \sin\beta = \underbrace{\frac{n_1}{n_2}}_{<1} \Rightarrow \boxed{\beta = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)}$$

$\Rightarrow \beta$ existe tout le temps (si $n_1 < n_2$)

Si l'angle d'incidence est plus grand que l'angle limite β de réflexion totale, le rayon est totalement réfléchi, sinon il est réfracté et partiellement réfléchi.

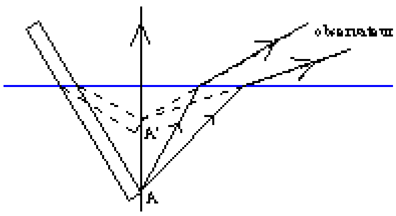
Exercice 9

Un prisme de verre a pour base un triangle rectangle et isocèle. Son indice de réfraction est de 1.445. Un rayon lumineux arrive sur ce prisme avec un angle d'incidence de 16°. Il est disposé comme l'indique le dessin ci-contre. Faire un dessin aussi correct que possible du trajet de ce rayon dans le bloc de verre, jusqu'à ce qu'il en sorte. Calculer les derniers angles d'incidence et de réfraction.
Rép. 11° ; 16°



Applications de la réfraction :

1° Le bâton brisé

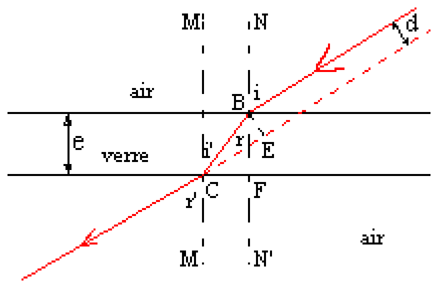


Un bâton plongé dans l'eau nous semble brisé. En effet, les rayons lumineux issus du point A se réfractent en s'écartant de la normale lors du passage de l'eau dans l'air.
L'oeil, qui reçoit les rayons réfractés, va extrapoler l'origine de ces rayons qui semblent alors provenir de A' et non de A (l'extrémité du bâton). Nous avons alors la sensation de voir un objet brisé.

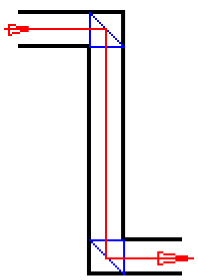
2° Lame à faces parallèles

On appelle lame à faces parallèles, un milieu transparent limité par deux faces planes parallèles (deux dioptres plans parallèles). Si nous plaçons derrière une lame à faces parallèles un crayon et que nous regardons à travers la lame, nous voyons un crayon cassé. La partie cassée, c'est-à-dire la partie du crayon qui est déviée, n'est visible qu'à travers la lame et dépend de l'angle sous lequel on regarde la lame. Ce déplacement croît avec l'obliquité des rayons mais aussi avec l'épaisseur de la lame.
Voici le trajet d'un rayon lumineux à travers une lame à faces parallèles. Le rayon lumineux a subi un déplacement d.

Calcul du déplacement d :
Dans le triangle rectangle BCE, nous avons :
BE = d = BC sin (r' - i')
Mais, puisque i' = r et r' = i (angles à côtés parallèles), il vient :
d = BC sin (i - r) a
Dans le triangle rectangle BCF, nous avons :
BF = e = BC cos (r) b
divisons a par b : d/e = sin (i - r) / cos r
d = e sin (i - r) / cos r

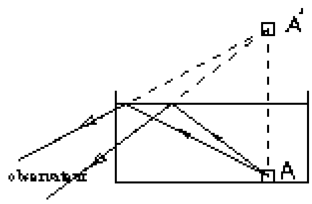


3° Le périscope



Considérons un prisme dont la section principale est un triangle rectangle isocèle. Un rayon lumineux arrive perpendiculairement sur une face d'un côté de l'angle droit. Il n'est pas dévié en entrant dans le prisme puisque l'angle d'incidence est de 0°. Donc, l'angle de réfraction est de 0°. Il atteint l'hypoténuse sous un angle î = 45° (c'est-à-dire sous un angle supérieur à l'angle limite dans le cas du passage du verre dans l'air). Il y a donc réflexion totale; le rayon ne sort pas du prisme. L'angle de réflexion est de 45°. Il sort du prisme perpendiculairement à l'autre face.
En répétant le système deux fois, on obtient une image droite composée de 100% de lumière émise.

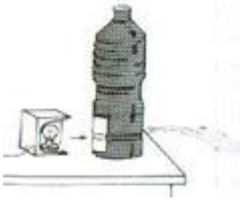
4° La pièce de monnaie



Déposons une pièce de monnaie dans une cuve transparente remplie d'eau. Si nous plaçons l'oeil au-dessous du niveau de l'eau et près de la paroi de la cuve, nous apercevons la pièce au fond de l'eau et aussi son image au-dessus du niveau de l'eau.
En effet, les rayons lumineux issus du point A subissent la réflexion totale à la surface de l'eau. Pour l'oeil, ces rayons semblent provenir de l'image A' symétrique de A par rapport à la surface de l'eau.

5° La fontaine lumineuse

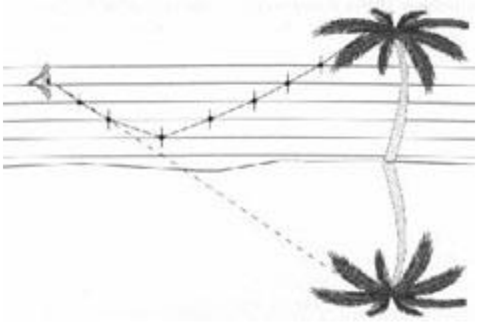
On peut obtenir, en éclairant un jet d'eau par l'intérieur, un effet lumineux très curieux.



Il suffit de peindre une bouteille de plastique transparent avec de la couleur noire, sauf une petite fenêtre à la base de la bouteille.
En face de la fenêtre, on perce un trou de quelques millimètres de diamètre, par lequel sortira le jet. (il faut boucher ce trou avec un petit morceau de papier collant afin de pouvoir remplir la bouteille avec de l'eau colorée par exemple).
On place contre la petite fenêtre une ampoule électrique et on retire le papier collant. Le jet sort de l'orifice, éclairé par la lumière intérieure provenant de la lampe.
Les fontaines lumineuses que l'on voit dans les parcs répondent à ce principe. Dans le jet, la lumière subit des réflexions totales successives aux surfaces de séparation eau / air.

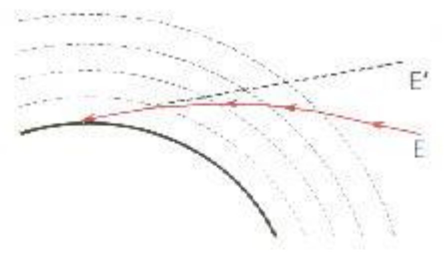
6° Le mirage

C'est une illusion d'optique qui consiste à percevoir l'image renversée d'un objet comme s'il se reflétait à la surface de l'eau. Cela s'observe dans les déserts des pays chauds mais aussi dans nos régions; lorsqu'en été les routes asphaltées sont chauffées par le Soleil.



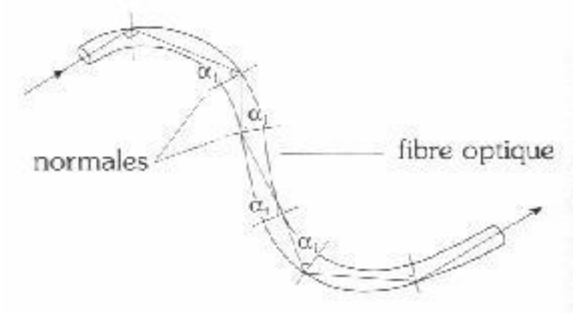
Ce phénomène tient au fait que le sol, surchauffé par un rayonnement intense, provoque la dilatation des couches d'air en contact avec lui. Celles-ci deviennent alors moins réfringentes que les couches supérieures. Il arrive alors que certains rayons fort obliques, provenant d'objets situés au voisinage du sol et ayant subi quelques réfractions, se réfléchissent sur une des couches d'air comme sur un miroir. L'observateur, qui reçoit ces rayons dans son oeil, va apercevoir les images renversées des objets. C'est le mirage.
Pourquoi l'oeil nous donne-t-il une "mauvaise" image ? Lorsqu'il reçoit un rayon lumineux, l'oeil ou plutôt le cerveau va chercher l'origine de ce rayon en faisant le chemin à l'envers. Il prolonge donc le rayon reçu pour trouver son origine. On dit que l'oeil fait une extrapolation sur l'origine du rayon. Le prolongeant, il n'a pas toujours l'origine exacte!

7° <u>La réfraction atmosphérique</u>



Un rayon lumineux issu d'une étoile traverse des couches d'air de densités différentes. Ces couches sont en fait de plus en plus denses au fur et à mesure que l'on descend en altitude. Elles sont donc de plus en plus réfringentes. Le rayon se réfracte dans chaque couche d'air en décrivant une courbe qui arrive sur la rétine de l'observateur. En décodant l'information reçue, le cerveau va "prolonger" le dernier rayon reçu et extrapoler la position de l'étoile en la plaçant plus haut au-dessus de l'horizon.

8° <u>La fibre optique</u>



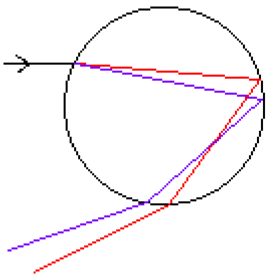
La fibre optique se compose d'un coeur en verre optique d'indice de réfraction élevé et d'une enveloppe en verre d'indice de réfraction faible. Les rayons lumineux qui entrent par une extrémité dans la fibre sont guidés dans le coeur par réflexion totale tout au long de la fibre malgré les courbures infligées et ressortent à l'autre extrémité.

Pour assurer la réflexion totale dans la fibre, l'enveloppe doit avoir une épaisseur minimale (pour le spectre visible) de 2.10^{-9} m.
La fibre optique est utile dans le transport d'informations, de lumière. Ce dernier cas est fort utile à de nombreuses personnes :

- les archéologues : observation d'un tumulus sans y accéder
- les médecins : endoscopies

9° <u>L'arc-en-ciel</u>

Lorsqu'il pleut et que le soleil est malgré tout visible, nous observons, à condition d'avoir l'astre dans le dos, un arc-en-ciel venant égayer l'atmosphère pluvieuse.
Certaines croyances voudraient qu'aux pieds de l'arc-en-ciel on trouve un pot rempli d'or appartenant à un lutin. Cela ne s'est jamais vérifié d'autant plus que maintenant, une explication physique est donnée à ce bien joli phénomène.
Lorsqu'il pleut et que le Soleil est visible, ce dernier envoie ces rayons sur une multitude de gouttelettes d'eau. Prenons l'exemple d'un rayon pénétrant dans une goutte :



Ce rayon, parce qu'il change de milieu, subit une réfraction. Comme pour le prisme, il y a une déviation qui est différente pour chaque longueur d'onde. Ainsi, le rouge étant le moins dévié et le violet le plus dévié, la lumière du Soleil est donc décomposée. Les rayons déviés subissent aussi dans la goutte une réflexion totale puis une seconde réfraction, ce qui accentue la déviation des rayons. La réflexion totale permet de comprendre pourquoi le Soleil doit être dans notre dos pour observer l'arc-en-ciel (voir schéma). Toutefois, un rayon peut pénétrer dans la goutte par le bas et non le haut comme sur le schéma. A ce moment, ce sont deux réflexions totales qui ont lieu dans la goutte et nous voyons un second arc-en-ciel dont les couleurs sont dans l'ordre inverse par rapport au premier. Cet arc-en-ciel "secondaire" n'est pas aussi visible que le premier à cause des deux réflexions totales.

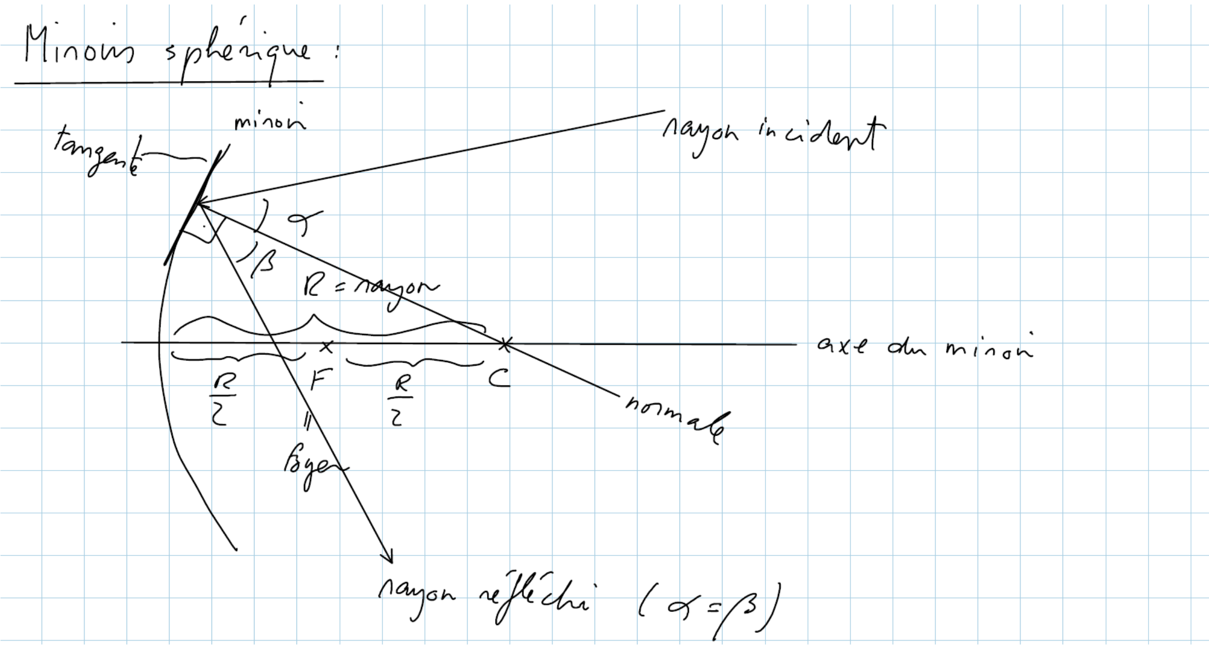
13.6 dispersion

Un rayon de lumière blanche passant à travers un prisme est séparé en toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

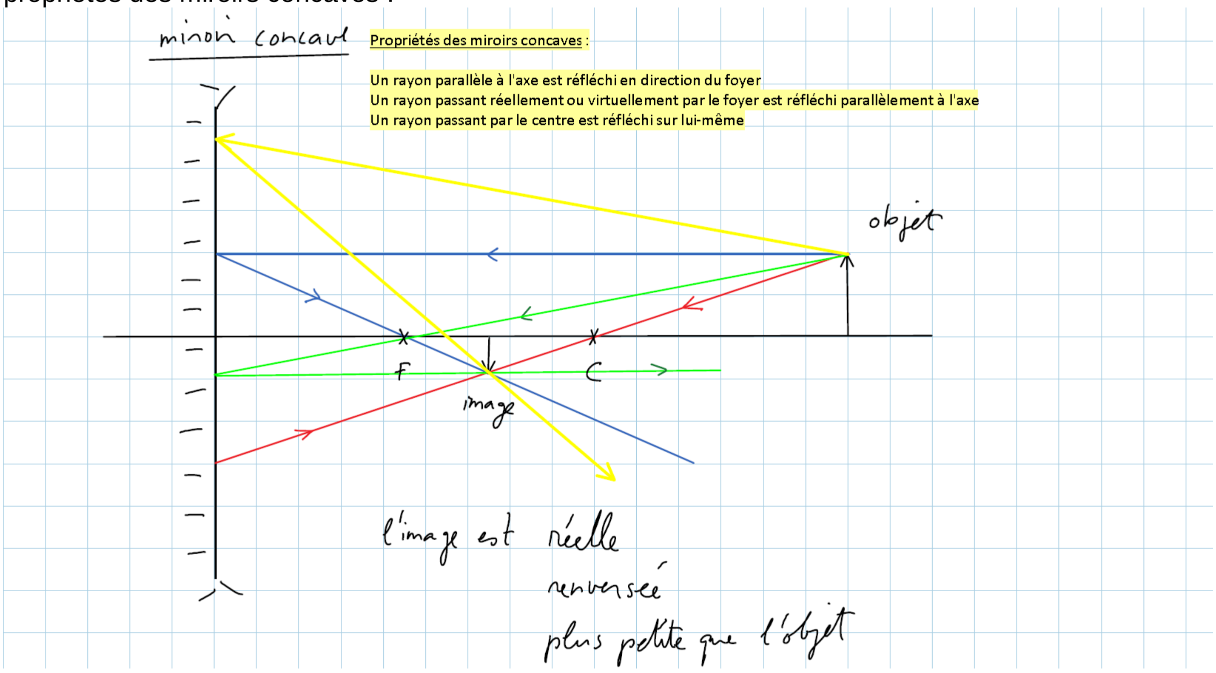
13.7 miroir plan

Le trajet d'un rayon heurtant un miroir plan est donné par la loi de la réflexion.

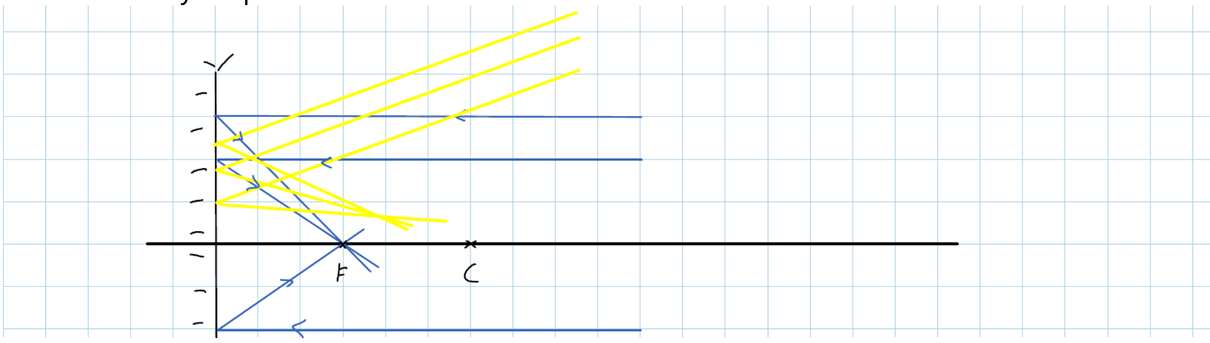
13.8 miroir sphérique



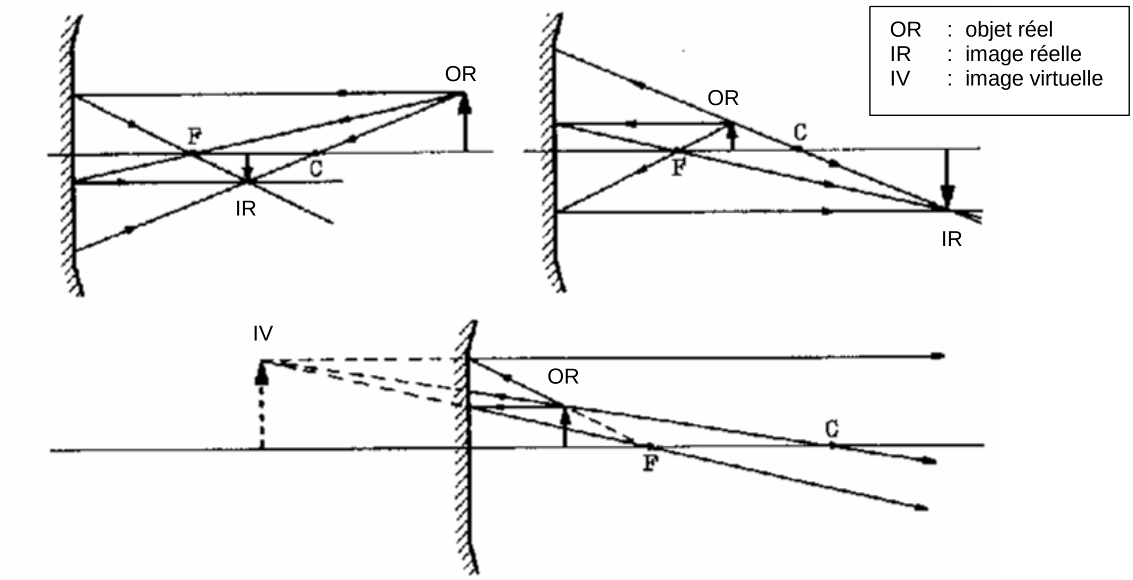
propriétés des miroirs concaves :



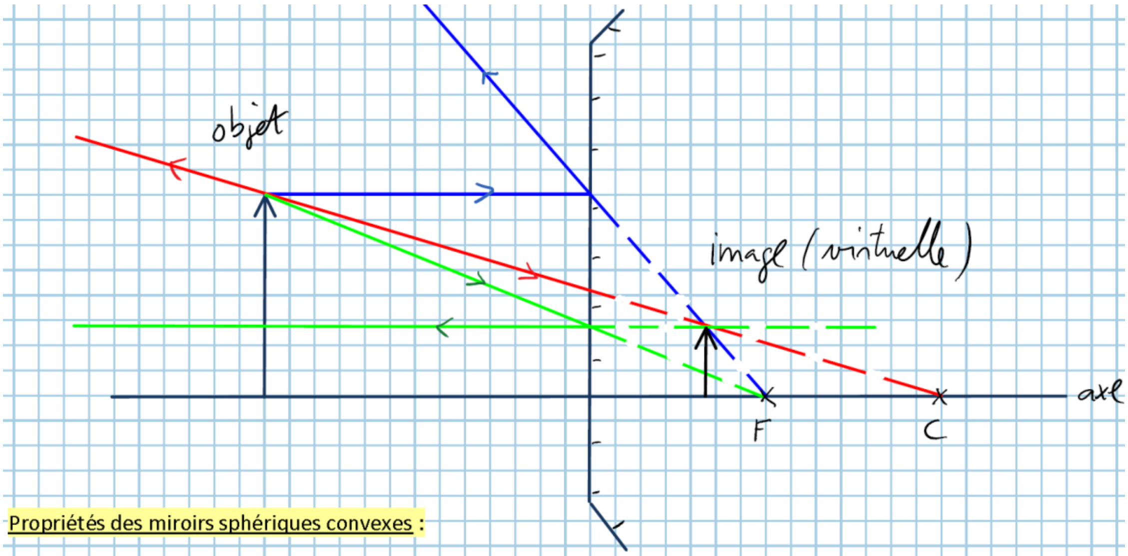
Faisceau de rayons parallèles :



Différentes positions de l’objet :



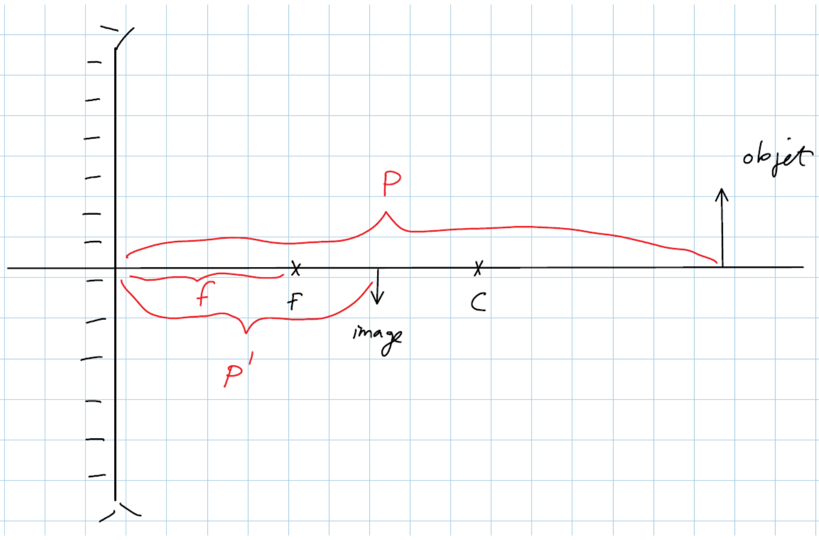
propriétés des miroirs convexes :



<u>Propriétés des miroirs sphériques convexes</u> :

Un rayon parallèle à l'axe est réfléchi de façon à passer virtuellement par le foyer
Un rayon passant virtuellement par le foyer est réfléchi parallèlement à l'axe
Un rayon passant virtuellement par le centre est réfléchi sur lui-même

Formule des miroirs : on peut calculer la grandeur et la position de l'image à l'aide des formules des miroirs.



p : distance objet-miroir

p' : distance image-miroir ($p' > 0$ si l'image est réelle) ($p' < 0$ si l'image est virtuelle)

f : distance foyer-miroir ($f > 0$ si miroir concave) ($f < 0$ si miroir convexe)

g : grandeur objet

g' : grandeur image ($g' > 0$ si image à l'endroit) ($g' < 0$ si image à l'envers)

formule des miroirs :

$$\begin{cases} \dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{p'} = \dfrac{1}{f} \\[2ex] \dfrac{g'}{g} = \dfrac{-p'}{p} \end{cases}$$

exemple ci-dessus : $p = 15$ $\quad f = 4,5$ $\quad g = 2$

$p' = ?$ $\quad g' = ?$

$$\begin{cases} \dfrac{1}{15} + \dfrac{1}{p'} = \dfrac{1}{4,5} \Rightarrow \dfrac{1}{p'} = \dfrac{1}{4,5} - \dfrac{1}{15} = 0,15 \Rightarrow p' = \dfrac{1}{0,15} = 6,43 \\[2ex] \dfrac{g'}{2} = \dfrac{-p'}{15} \Rightarrow g' = \dfrac{-2p'}{15} = \dfrac{-2 \cdot 6,43}{15} = -0,86 \end{cases}$$

Exercice 5

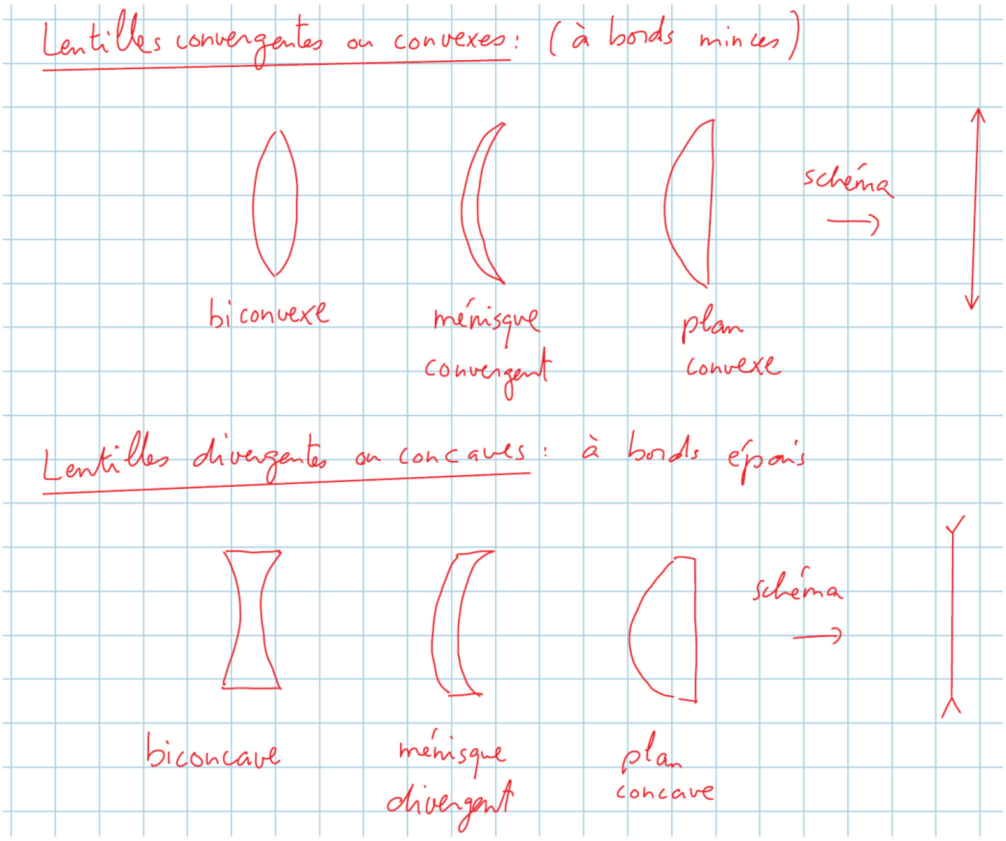
Un objet de 1 cm de long se trouve devant un miroir sphérique concave dont le rayon de courbure vaut 6 cm. Il se trouve successivement à 4 cm puis à 2 cm du miroir. Dans chaque cas, déterminer graphiquement et par le calcul le genre d'image obtenue, sa distance au miroir et sa grandeur.
Rép. réelle, renversée, 12 cm, 3 cm ; virtuelle, droite, 6 cm, 3 cm

Exercice 6

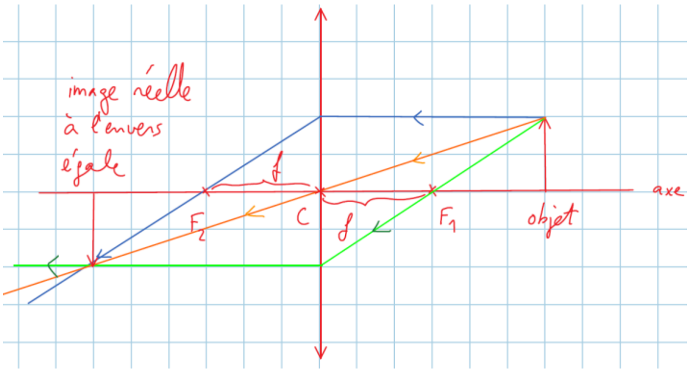
Un objet a une grandeur de 10 cm et se trouve situé à 15 cm d'un miroir sphérique convexe dont le rayon de courbure vaut 20 cm. Déterminer graphiquement et par le calcul l'image de cet objet.
Rép. virtuelle droite, 4 cm, à 6 cm du miroir

Module 14. La lumière : partie 2

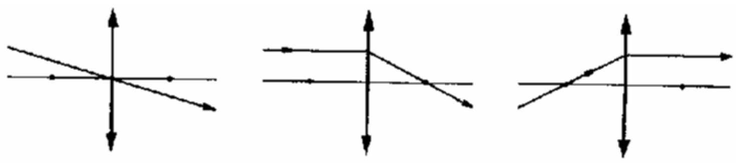
14.1 lentilles



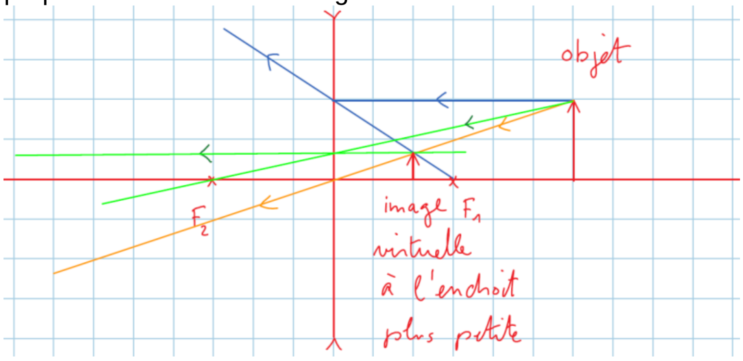
propriétés des lentilles convergentes :



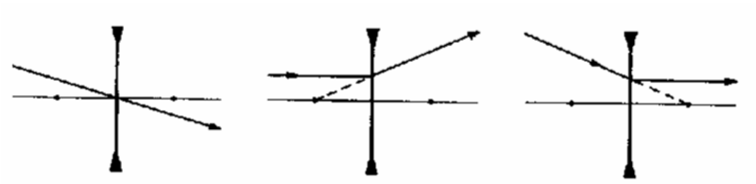
1. Tout rayon passant par le centre n'est pas dévié
2. Tout rayon parallèle à l'axe est dévié en direction d'un foyer
3. Tout rayon passant par un foyer est dévié parallèlement à l'axe



propriétés des lentilles divergentes :



1. Tout rayon passant par le centre n'est pas dévié
2. Tout rayon parallèle à l'axe est dévié de sorte qu'il passe virtuellement par un foyer
3. Tout rayon passant virtuellement par un foyer est dévié parallèlement à l'axe



formules des lentilles :

formules : $\begin{cases} \dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{p'} = \dfrac{1}{f} \\ \dfrac{g'}{g} = \dfrac{-p'}{p} \end{cases}$

avec p = distance objet - lentille

p' = distance image - lentille

$p' > 0 \Rightarrow$ l'image de l'autre côté de la lentille (réelle)

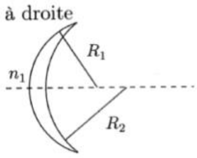
$p' < 0 \Rightarrow$ l'image est du même côté que l'objet (virtuelle)

f = distance focale = distance foyer - lentille

$f > 0$ si lentille convergente

$f < 0$ si lentille divergente

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)$$

Lentille sphérique mince		$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$	sens de la lumière de gauche à droite  R_i : rayons de courbure $f > 0$: lentille convergente $f < 0$: lentille divergente

Exercice 1

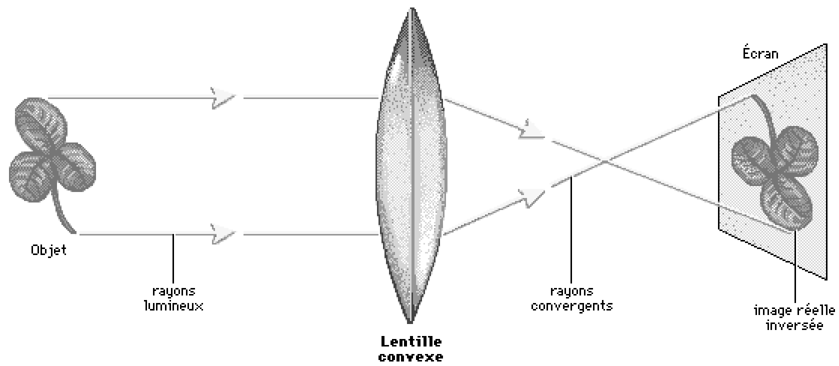
Une lentille convergente a une distance focale de 6 cm. Un objet dont la grandeur est de 4 cm est placé à la distance d de la lentille. Déterminer l'image. Vérifier les résultats en utilisant la méthode graphique et le calcul.
a) d = 3 cm b) d = 6 cm c) d = 12 cm d) d = 18 cm

Exercice 2

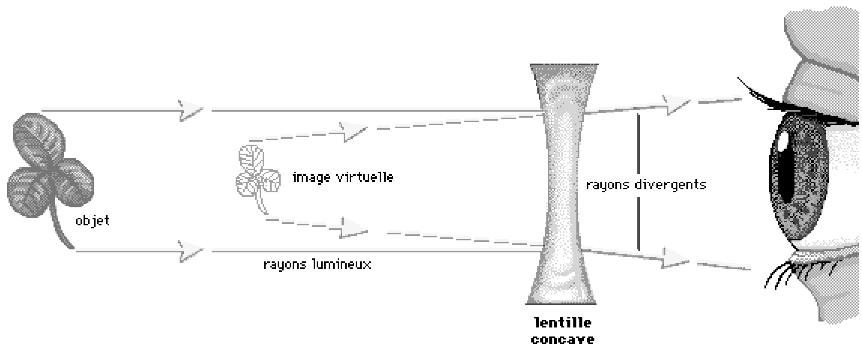
Une lentille divergente a une distance focale de 6 cm. Un objet dont la grandeur est de 4 cm est placé à la distance d de la lentille. Déterminer l'image. Vérifier les résultats en utilisant la méthode graphique et le calcul.
a) d = 2 cm b) d = 3 cm c) d = 6 cm d) d = 12 cm

14.2 instruments d'optique

L'œil

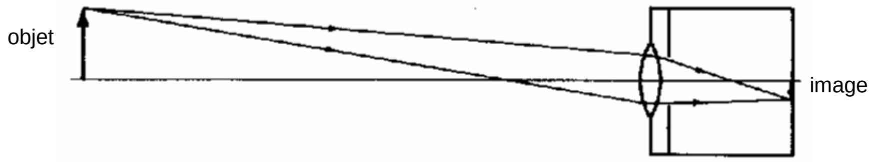


Chez l'homme, le cristallin de l'œil s'apparente à une lentille convexe qui serait élastique. En effet, cette lentille est épaisse et étroite lorsque l'œil regarde quelque chose de proche ; elle devient allongée et très mince dans le cas contraire. Les lentilles convexes sont prescrites en cas d'hypermétropie car elles permettent aux yeux de former des images nettes sur la rétine, et non en arrière de celle-ci.

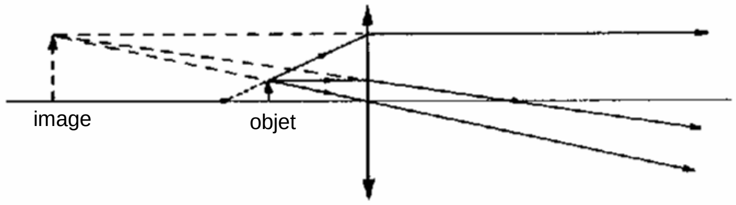


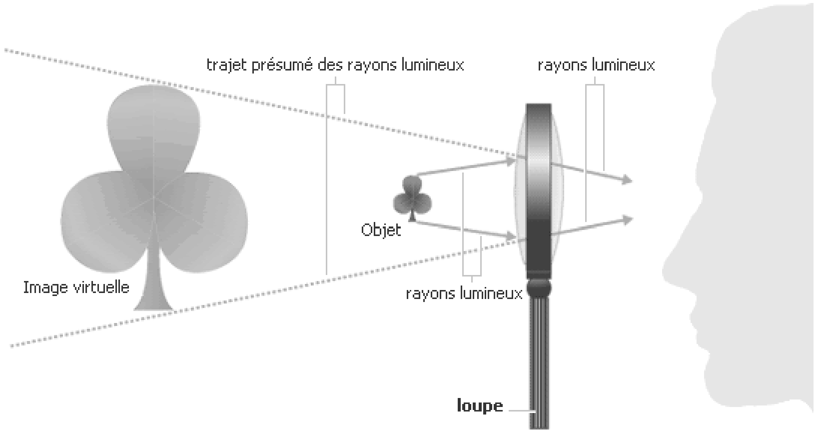
À la différence d'une lentille convexe, qui peut créer des images réelles, une lentille concave ne produit que des images virtuelles. Une image virtuelle est une image d'où semblent partir les rayons lumineux.
Les lentilles concaves sont prescrites en cas de myopie car elles aident les yeux à former des images nettes sur la rétine, et non en avant de celle-ci.

L’appareil photographique



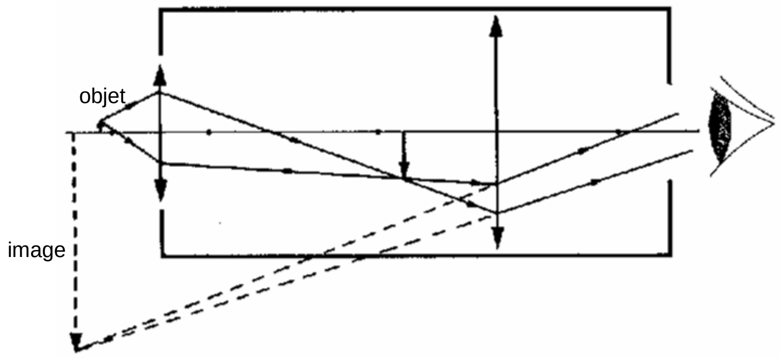
La loupe



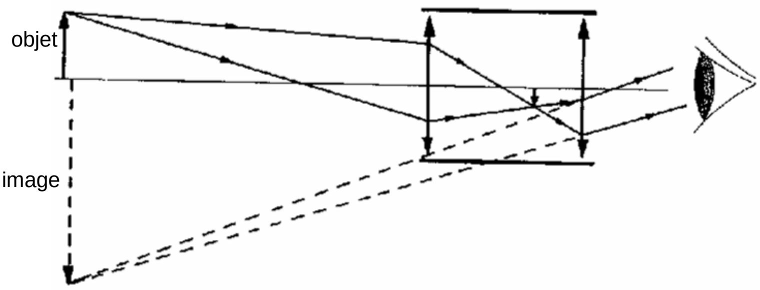


Une loupe est une grande lentille convexe utilisée pour examiner des objets de petite taille. En plaçant la loupe près de l'objet, à une distance inférieure à la distance focale de la lentille, une image virtuelle et agrandie de l'objet (ici un trèfle) apparaît alors derrière la lentille. Cette image ne peut être projetée sur un écran

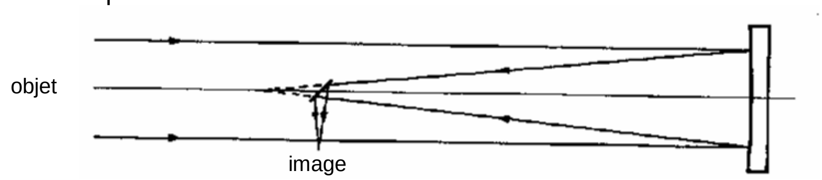
Le microscope



La lunette astronomique



Le téléscope



Exercice 3

Un objectif photographique est braqué sur un groupe de personnes. La plus proche est à 3 m, la plus éloignée à 8 m. La focale de cet objectif étant de 5 cm, où le film devrait-il se trouver pour qu'il se forme sur lui des images nettes ?
Rép. A la fois à 5.08 cm et à 5.03 cm de l'objectif.

Exercice 4

Un projecteur pour diapositives 24 mm x 36 mm possède un objectif de 7.5 cm de focale. L'appareil est à 5 m de l'écran. Quelles sont les dimensions de l'image ?
Rép. 1.58 m x 2.36 m

Exercice 5

Une bougie se trouve à 2 m d'une paroi. On dispose d'une lentille convergente dont la distance focale est de 32 cm. A quelle distance de la paroi faut-il la placer pour obtenir sur celle-ci une image réelle de la bougie ? La flamme a 3 cm de haut. Quelle est la hauteur de son image ? Etudier toutes les solutions.
Rép. 40 cm ; 160 cm ; 0.75 cm ; 12 cm.

Exercice 6

A quelle distance d'une lentille convergente de 16 cm de distance focale faut-il placer un objet lumineux pour en obtenir une image réelle quatre fois plus grande ?
Rép. 20 cm

Exercices tirés d'anciens examens de maturité :

QCM

a) (printemps 2007)

L'indice de réfraction de la lumière d'un milieu est défini par :

- ❑ La variation de célérité de la lumière
- ❑ Le freinage de la lumière en km/s
- ❑ Le sinus de l'angle de réfraction
- ❑ Le rapport de la célérité de la lumière dans le vide / célérité de la lumière dans le milieu
- ❑ Le rapport de la célérité de la lumière dans le milieu / célérité de la lumière dans le vide.

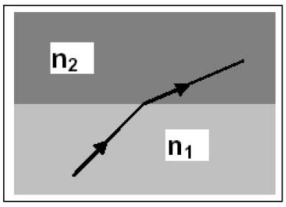
b) (printemps 2007)

- ❑ Une image virtuelle est toujours droite et produite par une lentille divergente.
- ❑ Une image virtuelle est toujours droite et plus petite que l'objet.
- ❑ Une image virtuelle renversée n'est jamais produite par une lentille unique.
- ❑ Une image virtuelle droite n'est jamais produite par une lentille convergente.
- ❑ Une image virtuelle renversée produite par une lentille divergente si l'objet est à une distance inférieure à la distance focale f de la lentille.

c) (automne 2006)

Un rayon lumineux qui passe du milieu 1 au milieu 2 est dévié comme l'indique le dessin. Que peut-on en déduire quant aux valeurs respectives de l'indice de réfraction de chacun des deux milieux ?

- ❑ $n_1 > n_2$
- ❑ $n_1 \geqslant n_2$
- ❑ $n_1 = n_2$
- ❑ $n_1 < n_2$
- ❑ $n_1 \leqslant n_2$



d) (printemps 2006)

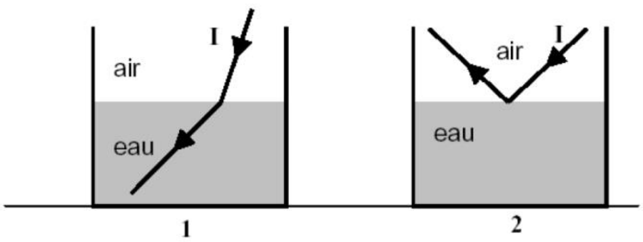
L'image d'un objet vu à travers une lentille divergente est :

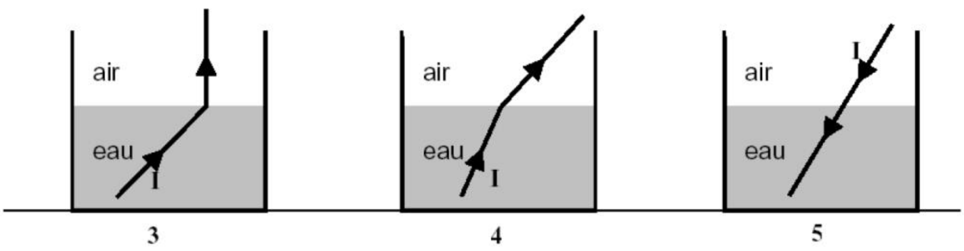
- ❑ Réelle, droite et plus petite que l'objet.
- ❑ Virtuelle, droite et plus petite que l'objet.
- ❑ Réelle, renversée et plus grande que l'objet.
- ❑ Virtuelle, renversée et plus grande que l'objet.
- ❑ Réelle, droite et plus grande que l'objet.

e) (printemps 2006)

Les figures représentent une cuve partiellement remplie d'eau et un rayon lumineux (**I**). Quelle est la figure qui représente correctement le parcours du rayon ?

- ❑ La figure N° 1
- ❑ La figure N° 2
- ❑ La figure N° 3
- ❑ La figure N° 4
- ❑ La figure N° 5

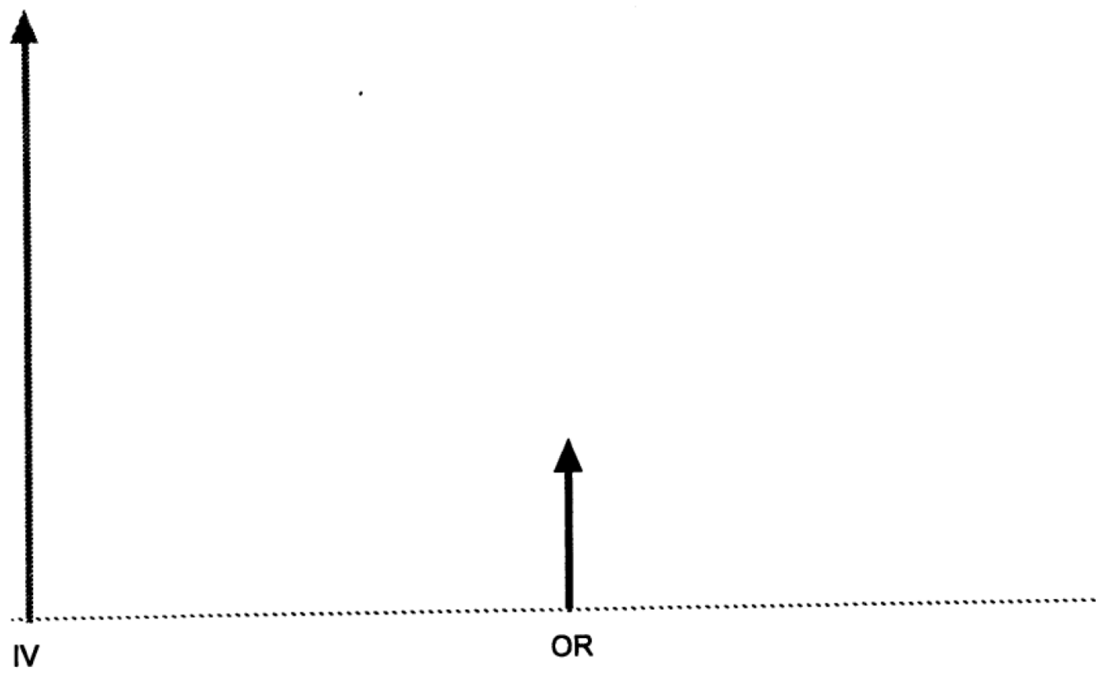




Exercice 2 (automne 2005)

(5 points)

2.4 On obtient d'un objet réel (OR) une image virtuelle (IV) en utilisant une lentille mince. Compléter le schéma ci-dessous de manière précise en y ajoutant la lentille, trois rayons lumineux, les deux foyers. Mesurer alors sur votre dessin la distance focale de la lentille. L'échelle du schéma est 1:1. Est-elle convergente ou divergente.



Exercice 3 (automne 2004)

2.1 Les distances focales de 2 lentilles convergentes L_1 et L_2 mesurent respectivement 1,4 cm et 5 cm. L'objet AB de hauteur 1 cm se trouve à 2 cm de la lentille L_1. Ces deux lentilles L_1 et L_2 sont séparées de 8 cm (voir figure page suivante) (8 pts)

a) Faire un dessin en grandeur réelle
b) Trouver graphiquement l'image A'B' formée à travers L_1
c) On considère l'image A'B' comme objet vu à travers L_2, trouver graphiquement l'image finale A"B"
d) Donner, à partir de ce dessin, les propriétés de ces images
e) Vérifier par le calcul les positions et dimensions des images obtenues, calculer le grossissement.

Exercice 4 (projet 209)

1. Un faisceau lumineux se propage dans un milieu transparent 1 d'indice de réfraction n_1=1,52. Il rencontre la surface d'un autre milieu transparent 2 d'indice n_2<n_1. L'angle d'incidence vaut i_1=35°. Choisir la bonne réponse dans chacune des propositions suivantes :

a. L'angle entre le faisceau incident et le faisceau réfléchi est :

35° 70° 90°

b. L'angle de réfraction est :

41° 31° 35°

c. L'indice du milieu 2 est :

1,33 1,48 1,52

d. Un faisceau se propageant dans le milieu 1 et arrivant sur la surface de séparation entre les deux milieux subit une réflexion totale pour un angle d'incidence supérieur à :

41° 61° 70°

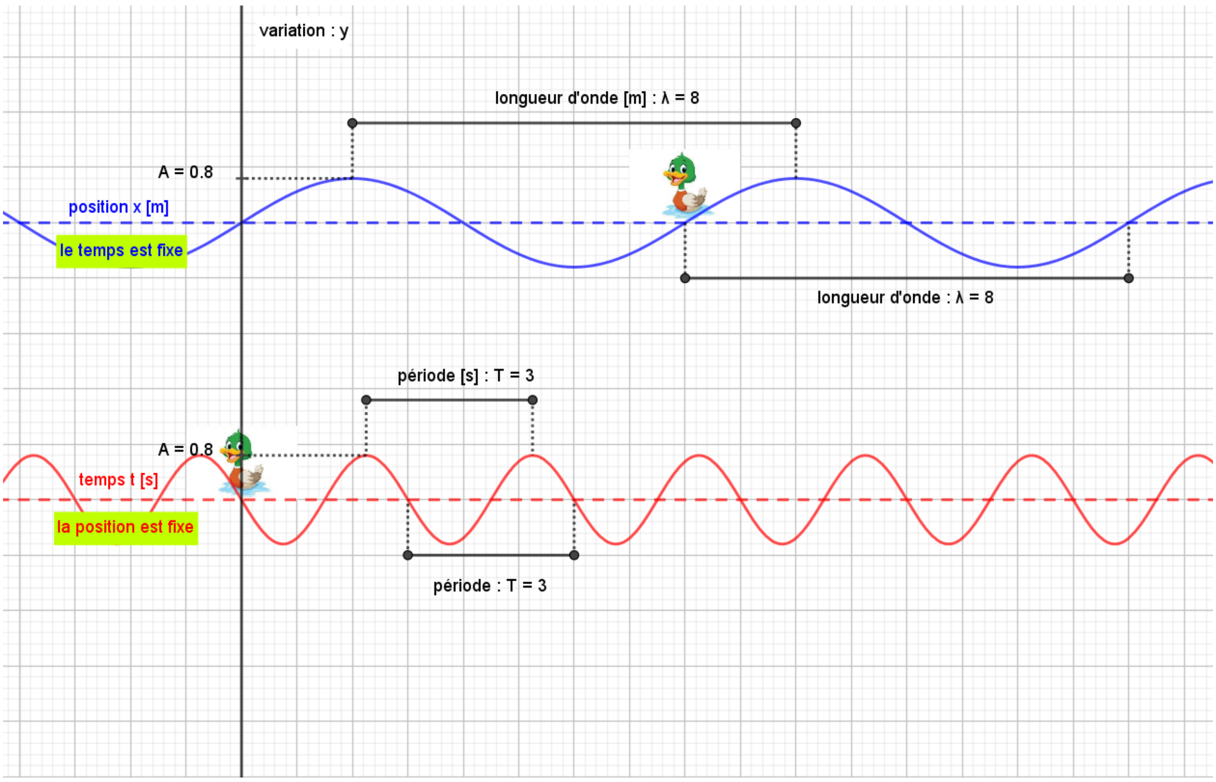
[4 points]

Module 15. La lumière : partie 3

15.1 dualité onde-corpuscule

La lumière peut être considérée comme une particule se déplaçant selon le principe de Fermat et les lois en découlant (optique géométrique) ou/et comme une onde créée par une variation du champ électro-magnétique.

Notions fondamentales caractérisant une onde :



λ	:	longueur d'onde en $[m]$, c'est la distance, à un instant donné, séparant deux maxima consécutifs
T	:	période en $[s]$, c'est la durée d'une oscillation complète
f	:	fréquence en $[Hz]$, c'est le nombre d'oscillations par seconde
v	:	vitesse de l'onde en $\left[\frac{m}{s}\right]$
A	:	amplitude, c'est la valeur maximale de la perturbation, l'unité dépend de la perturbation

formules : $v = \frac{\lambda}{T}$ $f = \frac{1}{T}$ $v = \lambda f$

équations ou fonction d'onde : $y = A\sin(kx \pm wt)$

k : nombre d'onde, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

w : pulsation ou fréquence circulaire, $w = \frac{2\pi}{T}$

Energie d'un photon

La lumière et les ondes électro-magnétiques sont composées de photons, dont l'état énergétique varie suivant la fréquence de l'onde. L'énergie d'un photon est donnée par :

$$E = hf$$

avec :

E : énergie du photon en $[J]$

h : constante de Planck, $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ $[J \cdot s]$

f : fréquence en $[Hz]$, c'est le nombre d'oscillations par seconde

Exercice 1

Un rayon de lumière verte de longueur d'onde 0.5 [μ] (microns), passe du vide dans un bloc de verre dont l'indice de réfraction vaut 1.5. Sa fréquence n'étant pas modifiée, calculer sa longueur d'onde dans le verre.
Rép. 0.333 [μ]

Exercice 2

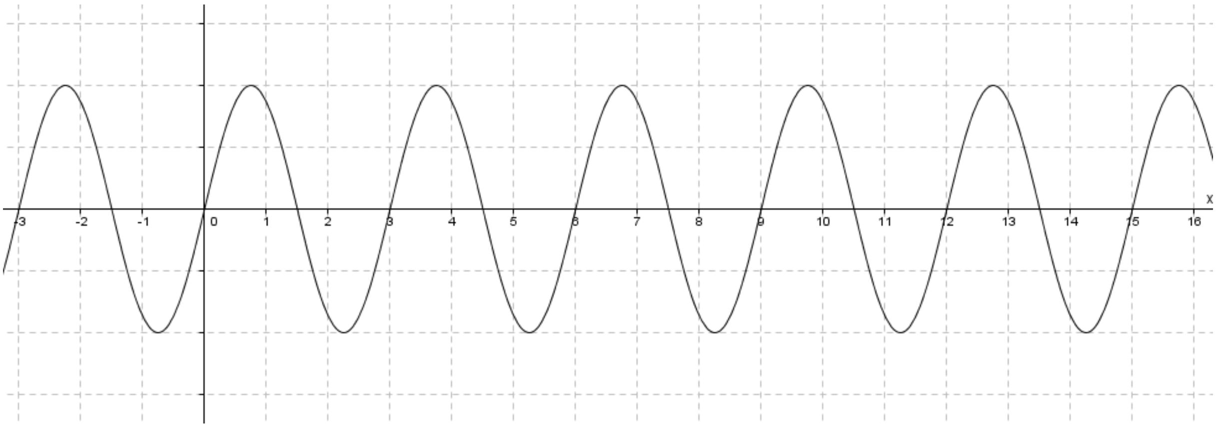
Une station de radio a une puissance émettrice de 400 kW à 100 MHz. Combien de photons par seconde sont émis ?
Rép. $6.04 \cdot 10^{30}$ photons/s

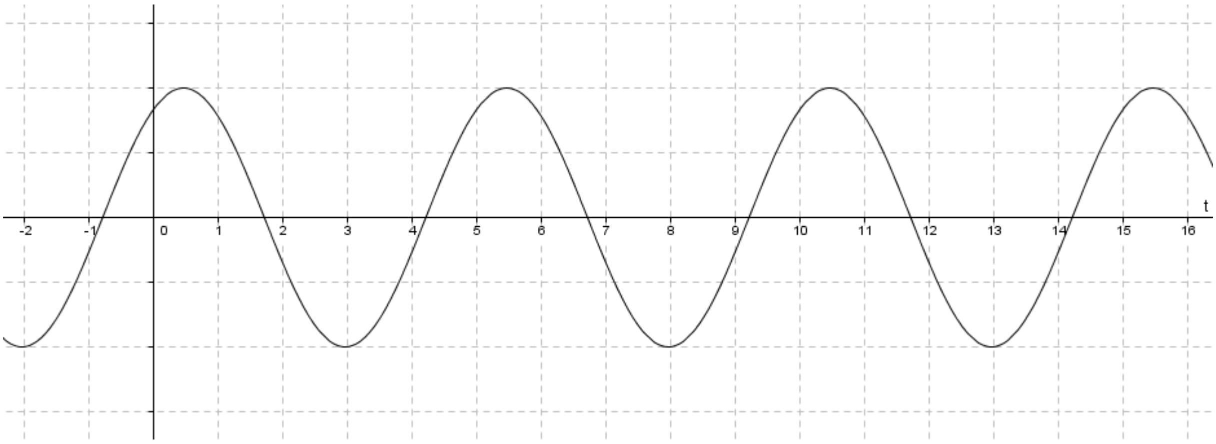
Exercice 3

Une ampoule de 100 W convertit 5% de l'énergie électrique consommée en lumière visible. On suppose que la lumière a une longueur d'onde de 600 nm et que l'ampoule est une source ponctuelle.
Quelle est le nombre de photons émis par seconde ?
Rép. $1.51 \cdot 10^{19}$ photons/s

Exercice 4

Les 2 graphiques ci-dessous représentent la même onde. Le premier représente la variation en fonction de la position, le deuxième représente la variation en fonction du temps. L'unité de l'axe des positions est le mètre, celle de l'axe temporel est la seconde.

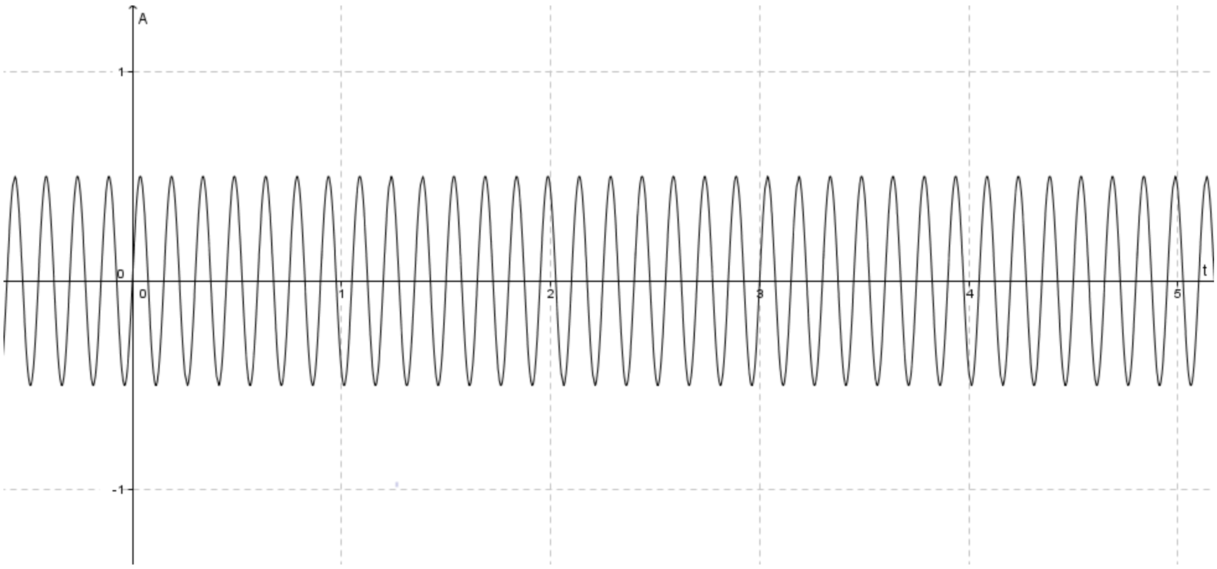




a) déterminer la longueur d'onde de cette onde
b) déterminer la période de cette onde
c) déterminer la fréquence de cette onde
d) déterminer l'amplitude de cette onde
e) déterminer l'équation d'onde de cette onde
f) déterminer la valeur de la variation à la position x=50 [cm] et au temps t=6 [s]
g) déterminer la vitesse de cette onde

Exercice 5

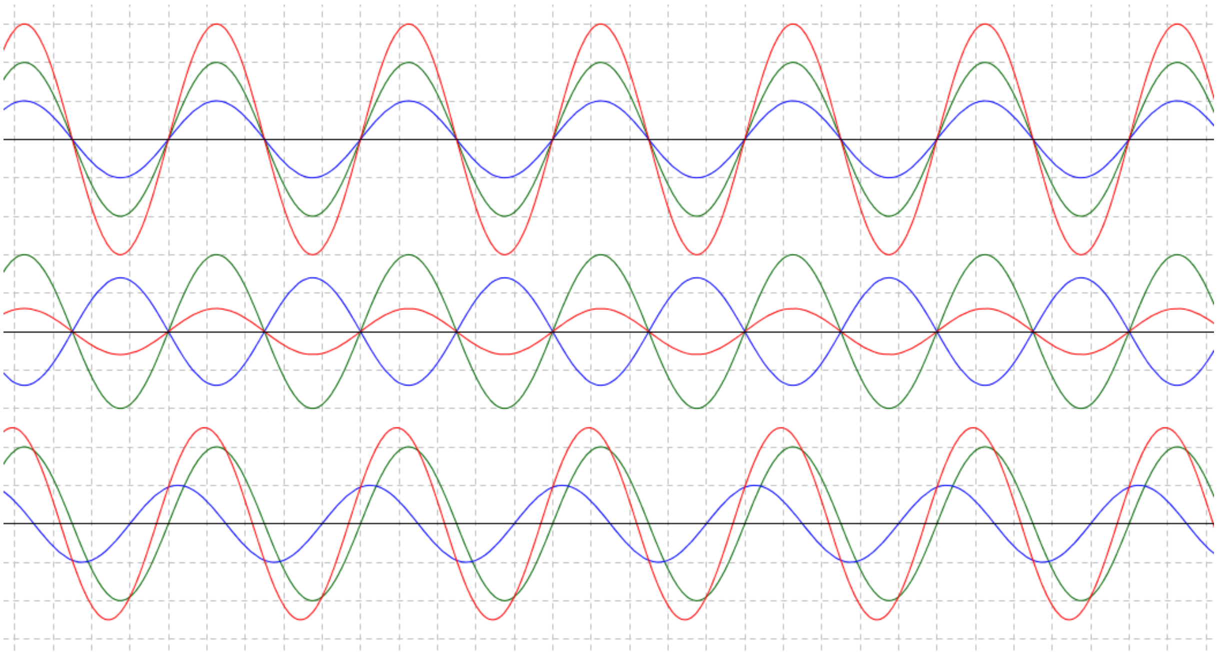
Le graphique ci-dessous représente la variation d'une onde, se déplaçant à la vitesse de 180 m/s, en fonction du temps. L'unité de l'axe temporel est la seconde.



a) déterminer la fréquence de cette onde
b) déterminer la période de cette onde
c) déterminer la longueur d'onde de cette onde
d) déterminer l'amplitude de cette onde
e) déterminer la valeur de la variation à la position x=2 [m] et au temps t=3 [min]

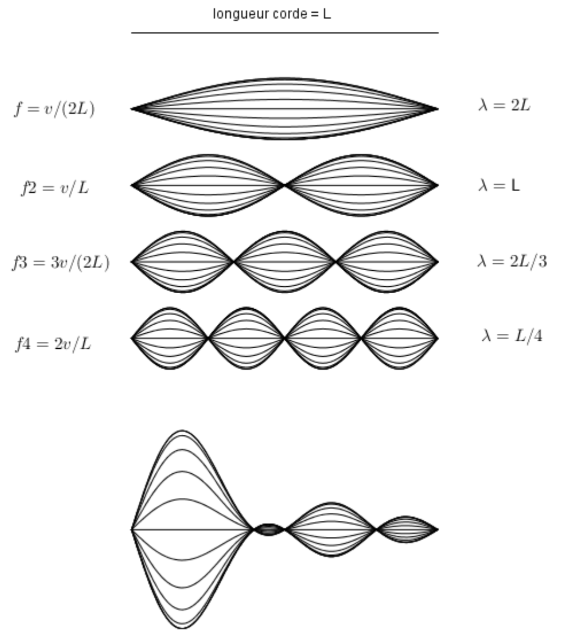
Exercice 6

Les 3 schémas ci-dessous représentent deux ondes (en vert et en bleu) et l'onde résultant de leur superposition (en rouge), à la position x=0 [m], en fonction du temps. L'équation d'onde de ces ondes est donc du type :
y = A sin(ωt) pour l'onde verte, y = A sin(ωt+φ) pour l'onde bleue, où φ représente le déphasage de l'onde bleue par rapport à l'onde verte. L'unité de l'axe temporel est la seconde. Donner dans chaque cas le déphasage de l'onde bleue par rapport à l'onde verte, ainsi que les équations d'onde de toutes ces ondes. Indiquer également celles qui sont en phase ou en opposition de phase.



Exercice 7

Le schéma ci-dessous représente les 4 premiers mode de vibration d'une corde de longueur L.



1[er] mode de vibration : fréquence fondamentale

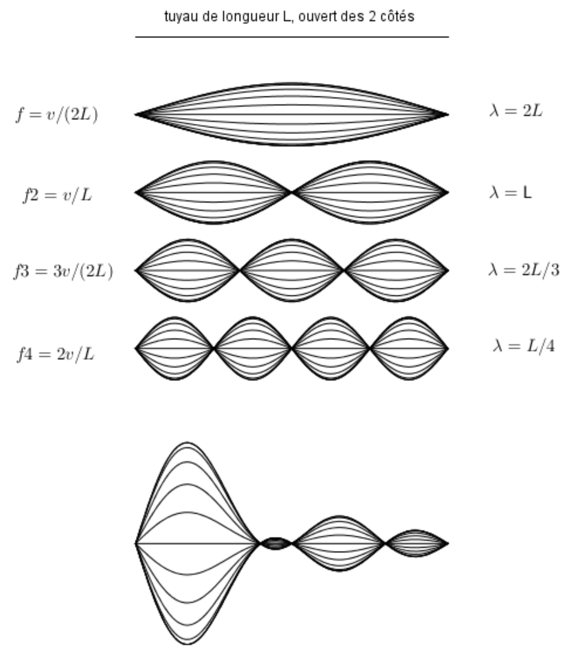
2[ème] mode de vibration : fréquence de la 1[ère] harmonique

3[ème] mode de vibration : fréquence de la 2[ère] harmonique

4[ème] mode de vibration : fréquence de la 3[ère] harmonique

superposition des 4 premiers modes de vibration

Le schéma ci-dessous représente les 4 premiers mode de vibration d'un tuyau, ouvert aux 2 extrémités, de longueur L.



1[er] mode de vibration : fréquence fondamentale

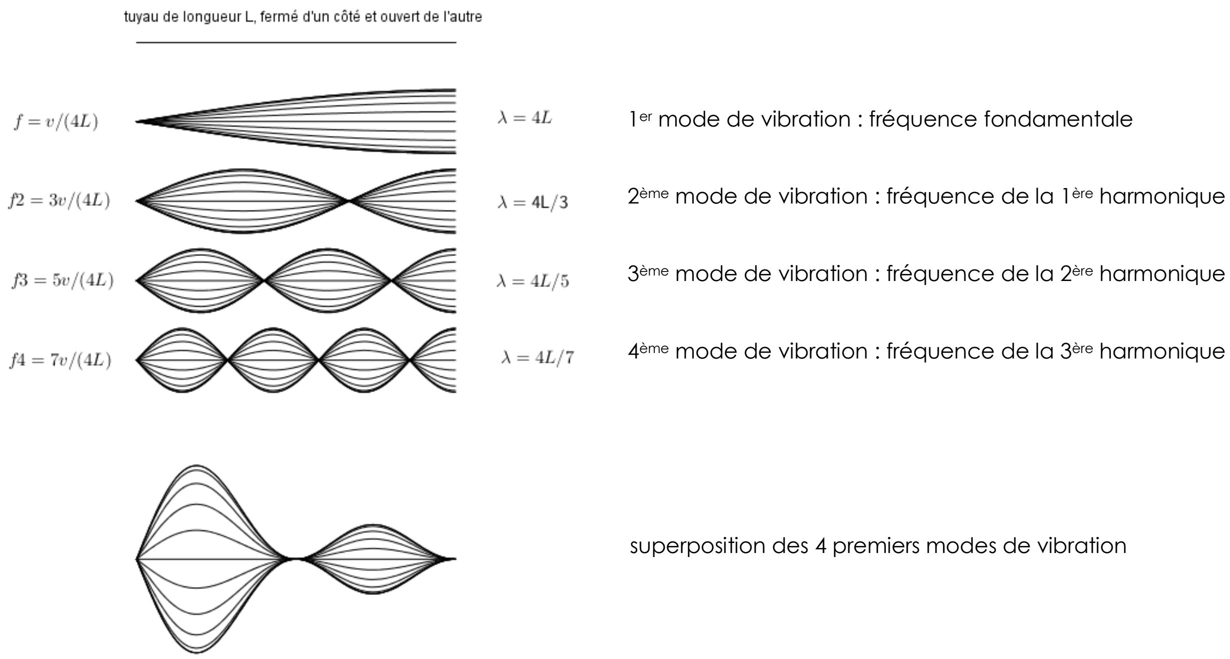
2[ème] mode de vibration : fréquence de la 1[ère] harmonique

3[ème] mode de vibration : fréquence de la 2[ère] harmonique

4[ème] mode de vibration : fréquence de la 3[ère] harmonique

superposition des 4 premiers modes de vibration

Le schéma ci-dessous représente les 4 premiers mode de vibration d'un tuyau, ouvert à une extrémité et fermé à l'autre, de longueur L.



a) Quelle est, dans les 3 cas, la longueur d'onde du 3ème mode de vibration si L vaut 8 ?
b) Quelle est la fréquence de la 3ème harmonique de l'onde émise par un tuyau de 50 [cm]. Faire ce calcul pour un tuyau ouvert aux 2 extrémités, puis pour un tuyau fermé à une extrémité.
c) Quelle est la fréquence du 5ème mode de vibration d'une corde de 30 [cm], dont la masse est 2 [g], et dont la tension est de 50 [N] ?
d) Quelle longueur faut-il, dans les 3 cas, pour obtenir un "la normal" ? (on suppose que l'onde se déplace à 200 [m/s] sur la corde)

Exercice 8

Les sons audibles ont des fréquences comprises entre 20 et 20'000 [Hz]. Calculer les limites entre lesquelles sont comprises les longueurs d'onde de ces sons.

Exercice 9

Des ondes sur une surface d'eau ont une fréquence de 15 [Hz] et une longueur d'onde de 1.6 [cm]. Quelle est leur vitesse ?

Exercice 10

Quelles sont les harmoniques audibles que deux sons composés, dont les fréquences fondamentales valent 2000 et 2400 [Hz], peuvent avoir en commun ?

Exercice 11

Sur une corde de guitare, les ondes ont une vitesse de 200 [m/s]. La corde a une longueur de 50 [cm]. Déterminer la fréquence des 5 premiers modes de vibration de cette corde.

Exercice 12

Une corde de 80 [cm] fournit, par son 1er mode de vibration, un son dont la fréquence est de 174 [Hz].

a) quelle est la vitesse des ondes sur cette corde ?
b) Quelle est la distance entre deux nœuds consécutifs dans le 5ème mode de vibration ?

Exercice 13

Une flûte a une longueur de 60 [cm]. Calculer les fréquences de ses trois premiers modes de vibration, lorsque tous les trous sont bouchés.

Exercice 14

Un tuyau d'orgue est fermé à une extrémité et ouvert à l'autre. Sa longueur est de 3.2 [m]. Calculer la fréquence de ses 3 premiers modes de vibration.

Module 16. Electricité : électrostatique (partie 1)

16.1 charges électriques

Mécanique :

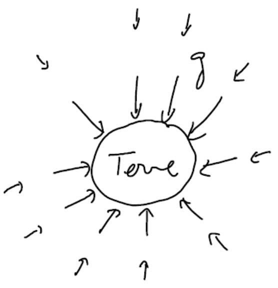
grandeur fondamentale :

la masse : m

dans un champ gravitationnel $\vec{g}$ une masse subit une force appelée poids :

$$\vec{F} = \vec{P} = m\vec{g}$$

les champs gravitationnels sont créés par une masse (p. ex. la terre)



Electricité :

grandeur fondamentale :

la charge : q

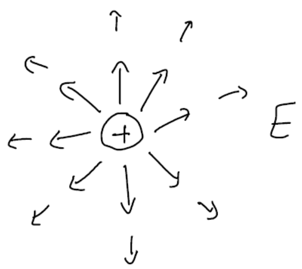
dans un champ électrique $\vec{E}$ une charge subit une force appelé force électrique :

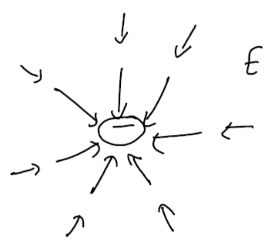
$$\vec{F} = q\vec{E}$$

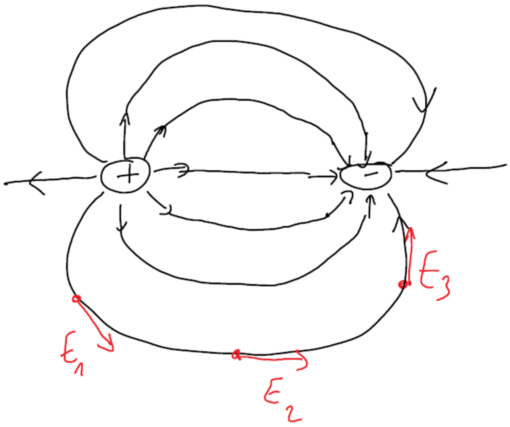
les champs électriques sont créés par des charges.

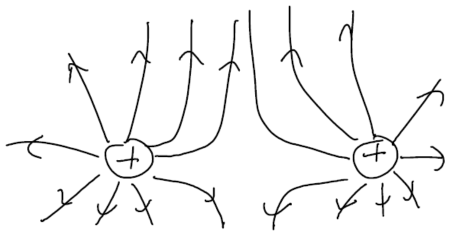
il y a 2 types de charges :

- les charges positives
- les charges négatives









charge de l'électron : $-1{,}602 \cdot 10^{-19}$ [C]

charge du proton : $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ [C]

charge du neutron : 0 [C]

Les charges se mesurent en [C]

↳ Coulomb

1 [C] est la charge portée par $6{,}24 \cdot 10^{18}$ protons.

$$\downarrow$$

$$\frac{1}{1{,}602 \cdot 10^{-19}}$$

Exercice 1

Calculer la charge que l'on ferait apparaître sur une boule de fer de 200 [g], si on enlevait tous ses électrons libres. On admettra que le fer possède un électron libre par atome.
Rép. $3.46 \cdot 10^5$ [C]

16.2 champ électrique

$\vec{F} = q\vec{E}$ où $\vec{F}$ est la force en $[N]$ subie par une charge q en $[C]$ placée dans un champ électrique $\vec{E}$ en $\left[\frac{N}{C}\right]$ ou $\left[\frac{V}{m}\right]$

Une ou plusieurs charges créent un champ électrique E.
Une autre charge q placée dans ce champ électrique subit une force électrique : $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ et $F = |q| \cdot E$

si $q < 0 \Rightarrow \vec{F}$ et $\vec{E}$ sont opposés

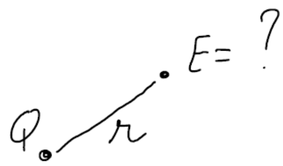
si $q > 0 \Rightarrow \vec{F}$ et $\vec{E}$ sont de même sens

si $q = 0 \Rightarrow F = 0 \cdot E = 0$
(une particule neutre n'est pas influencée par un champ électrique)

<u>Valeur de E dans le cas d'un champ électrique ponctuel</u>
(champ créé par une seule charge)

Q = valeur de la charge créant le champ

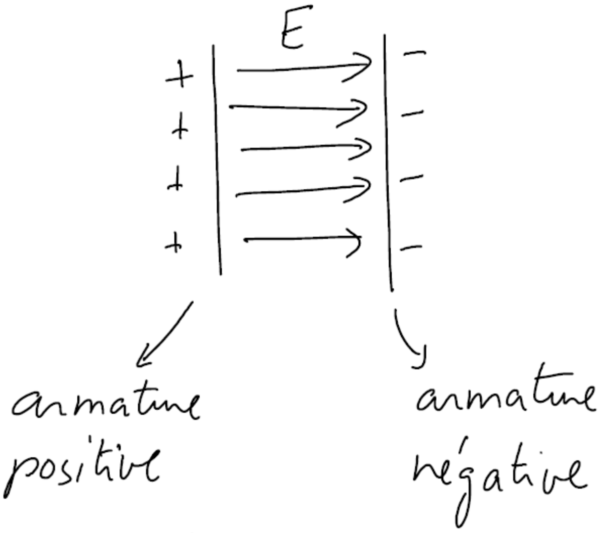
r = distance entre le point considéré et Q [m].



$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|Q|}{r^2}$$

$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \left[\frac{N \cdot m^2}{C^2}\right]$ $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \left[\frac{C^2}{N \cdot m^2}\right]$

Champ électrique dans un condensateur (plan)



Q = charge totale de l'armature positive

–Q = charge totale de l'armature négative

S = surface en [m²] d'une des armatures

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \cdot S}$$

ε_0 : constante valant environ $8.86 \cdot 10^{-12} \left[\frac{A \cdot S}{V \cdot m}\right]$

Loi de Coulomb : force liant deux charges q_1 et q_2 séparées par une distance d.

$q_1 \cdot$ $\qquad\qquad$ $\cdot\, q_2$

$E_1 = ?$

E_1 = champ électrique créé par q_1 là où se trouve q_2

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1|}{d^2}$$

$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$: constante valant environ $9 \cdot 10^9 \left[\frac{Nm^2}{C^2}\right]$

q_2 est placée dans un champ électrique E_1

$\Rightarrow$ elle subit une force électrique égale à :

$$F_{2,1} = |q_2|\, E_1 = |q_2| \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1|}{d^2}$$

$$\Rightarrow F_{2,1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{d^2}$$

Quelle est la force subie par q_1 à cause de q_2 ?

E_2 = champ électrique créé par q_2 là où se trouve q_1

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_2|}{d^2}$$

q_1 est placée dans un champ électrique E_2

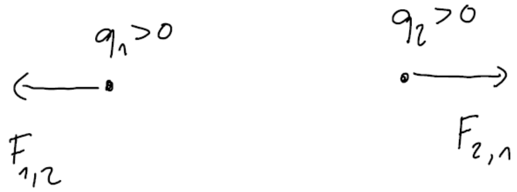
$\Rightarrow$ elle subit une force électrique égale à

$$F_{1,2} = |q_1| \cdot E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{d^2}$$

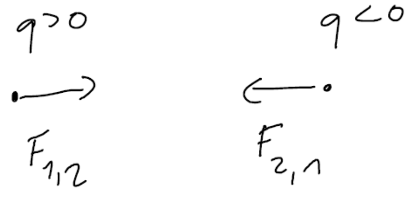
$$\Rightarrow \boxed{F_{1,2} = F_{2,1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{d^2}}$$

↳ loi de Coulomb

2 charges de même signe se repoussent



2 charges de signes opposés s'attirent



mécanique : force liant 2 masses

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}$$

électricité : force liant 2 charges

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{d^2}$$

Exercice 2

En un certain point de l'espace, une charge de 10^{-7} [C] subit une force de 10^{-2} [N]. Calculer l'intensité du champ électrique en ce point et la force que subirait une charge de 10^{-8} [C] si elle était placée au même point.
Rép. 10^5 [V/m] ; 10^{-3} [N]

Exercice 3

Deux charges égales, situées à 1 [m] l'une de l'autre, se repoussent avec une force de 1 [N]. Que valent ces charges ?
Rép. $1.056 \cdot 10^{-5}$ [C]

Exercice 4

Soit deux boules identiques en mousse de polystyrène, de charge Q et de masse m = 2 [g]. On les suspend par des fils de longueur L = 1 [m]. A cause de la répulsion électrique mutuelle des deux boules, les fils font un angle de 15° par rapport à la verticale. Trouvez la valeur de Q.
Rép. $4 \cdot 10^{-7}$ [C]

Exercice 5

Dans le modèle des particules élémentaires qui fait intervenir les quarks, un proton est constitué de deux quarks « up » (u) portant chacun la charge 2e/3 et d'un quark « down » (d), de charge –e/3. En supposant que ces particules sont situées à égales distances sur cercle de rayon $1.2 \cdot 10^{-15}$ [m], trouver la grandeur de la force électrique agissant sur chaque quark. (e = charge d'un électron)
Rép. 20.5 [N]

Module 17. Electricité : électrostatique (partie 2)

17.1 tension électrique

Une tension apparaît dès que l'on sépare des charges positives de charges négatives.

définition non conventionnelle : la tension est ″l'envie que les charges positives ont d'aller vers les charges négatives″. La tension se mesure en Volts $[V]$.

Dans un champ électrique uniforme, la tension entre un point A et un point B est :

$$U_{AB} = E \cdot d \cdot cos\alpha$$

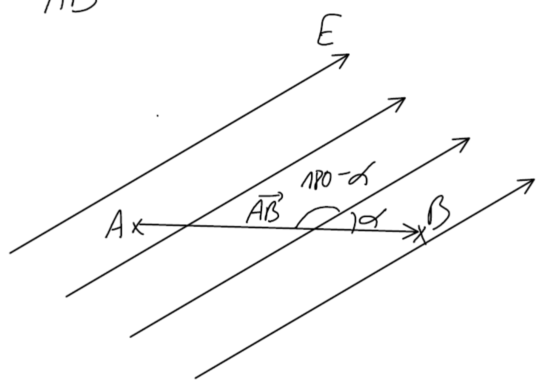
avec

U_{AB}	:	tension en $[V]$ entre les points A et B
E	:	valeur du champ électrique en $\left[\frac{V}{m}\right]$
d	:	distance entre A et B en $[m]$
α	:	angle entre le champ électrique E et la droite (AB)

constant

Dans un champ électrique uniforme on a :

$$U_{AB} = \vec{E} \cdot \vec{AB}$$



$$\Rightarrow U_{AB} = E \cdot AB \cdot \cos\alpha$$

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = \|\vec{u}\| \cdot \|\vec{v}\| \cdot \cos \measuredangle(\vec{u}; \vec{v})$$

si $\alpha = 0$ alors $U_{AB} = E \cdot AB \cdot \cos 0 = E \cdot AB$

si $\alpha = 90$ alors $U_{AB} = E \cdot AB \cdot \cos 90 = 0$

si $\alpha = 180°$ alors $U_{AB} = E \cdot AB \cdot \underbrace{\cos 180°}_{=-1} = -E \cdot AB$

$$\boxed{\begin{array}{l} 0 < \alpha < 90° \Rightarrow U > 0 \\ 90 < \alpha < 180° \Rightarrow U < 0 \end{array}}$$

Remarques:

1) $U_{BA} = E \cdot \underset{AB}{\overset{\shortparallel}{BA}} \cdot \cos(180 - \alpha)$

$= E \cdot AB \cdot (-\cos\alpha)$

$= -E \cdot AB \cdot \cos\alpha$

$= -U_{AB}$

$\Rightarrow \boxed{U_{BA} = -U_{AB}}$

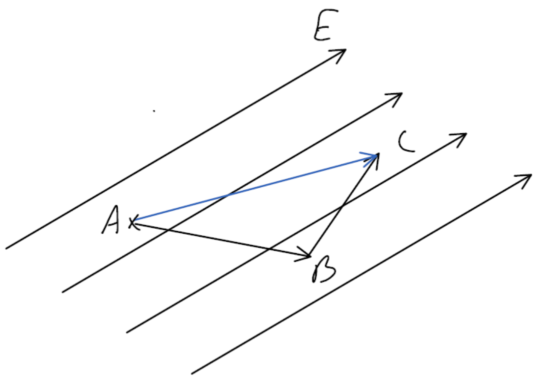
2)

$U_{AC} = \vec{E} \cdot \vec{AC}$

$= \vec{E} \cdot (\vec{AB} + \vec{BC})$

$= \vec{E} \cdot \vec{AB} + \vec{E} \cdot \vec{BC}$

$= U_{AB} + U_{BC}$



$$\boxed{U_{AB} + U_{BC} = U_{AC}}$$

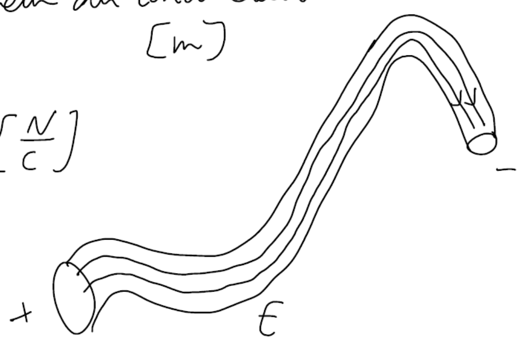
3) dans un conducteur électrique sous tension, le champ électrique est constant et suit la forme du conducteur. On a :

$$U = E \cdot L$$

L → longueur du conducteur [m]

E → champ électrique $\left[\frac{N}{C}\right]$

U → tension aux bornes du conducteur [V]



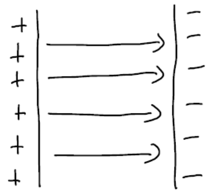
$$\Rightarrow E = \frac{U \;\to [V]}{L \;\to [m]}$$

⇒ le champ électrique se mesure en $\left[\frac{V}{m}\right]$ ou $\left[\frac{N}{C}\right]$

BUISSONNETS MONTANI

4) Condensateur (plan):

U = tension entre les armatures du condensateur



E = constant

$\boxed{U = E \cdot d}$

d: distance entre les plaques [m]

E: champ électrique entre les plaques (armatures)

$\boxed{E = \dfrac{Q}{\varepsilon_0 \cdot S}}$

$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12} \left[\frac{Nm^2}{c^2}\right]$

Q = charge totale de l'armature positive [C]

S = surface [m²] d'une armature

$$U = \frac{Q}{\varepsilon_0 \cdot S} \cdot d$$

$$\Rightarrow Q = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d} \cdot U$$

C = capacité du condensateur [F]

Farad

$$\Rightarrow \boxed{Q = C \cdot U}$$

Exercice 1

Les plaques d'un condensateur plan sont disposées horizontalement à 5 [cm] l'une de l'autre.
a) Quelle tension faudrait-il appliquer à ces plaques pour qu'un électron se trouvant entre elles soit en équilibre, la force électrique compensant exactement le poids ?
b) Quelle serait l'accélération de cet électron si on appliquait aux plaques une tension de 6 [V]
Rép. $2.79 \cdot 10^{-12}$ [V] ; $2.11 \cdot 10^{13}$ [m/s^2]

Exercice 2

Dans un champ électrique uniforme, on considère trois points A, B et C constituant les sommets d'un triangle équilatéral de 10 [cm] de côté. Le vecteur $\vec{E}$ a une grandeur de 15 [V/m]. Il fait un angle de 20° avec le vecteur $\overrightarrow{AB}$ et un angle de 40° avec le vecteur $\overrightarrow{AC}$. Déterminer les tensions entre A et B, entre B et C et entre C et A.
Rép. U_{AB} = 1.41 [V] ; U_{BC} = -0.26 [V] ; U_{CA} = -1.15 [V]

Tension et énergie :

$$A = q \cdot U$$

U : tension entre les 2 points [V]

A : travail entre 2 points [J]

q : charge électrique subissant la tension [C]

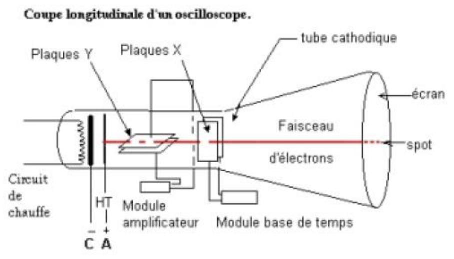
énergie reçue ou perdue par la charge q, accélérée ou freinée par une tension U.

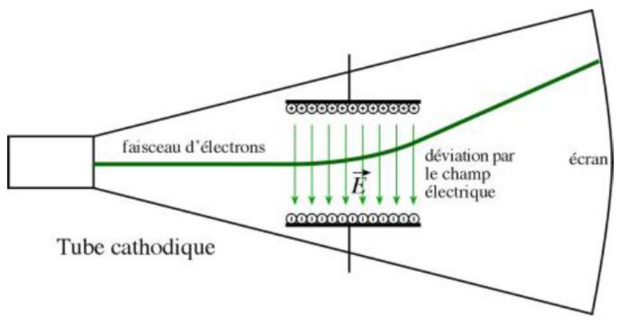
Rappel : Théorème de variation de l'énergie cinétique

$$A_{12} = E_{cin\,2} - E_{cin\,1}$$

$$\Rightarrow \quad q \cdot U = E_{cin\,2} - E_{cin\,1} \quad \Rightarrow \boxed{q \cdot U = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2}$$

Application : l'oscillographe cathodique





Exercice 3

Quelle est la vitesse acquise par un électron initialement immobile, s'il est accéléré sur un parcours entre les extrémités duquel il y a une tension de 1 [V] ?
Rép. $5.93 \cdot 10^5$ [m/s]

Exercice 4

L'électron-volt [eV] est une unité d'énergie. 1 [eV] est l'énergie d'un proton accéléré par une tension de 1 [V]. Etablir la relation entre l'électron-volt et le joule.
Rép. $1.602 \cdot 10^{-19}$ [J]

17.2 potentiel électrique

$$V_p = U_{PO}$$

avec

V_p	:	potentiel en $[V]$ entre les points P et O (point de référence)
U_{PO}	:	tension en $[V]$ entre les points P et O

différence de potentiel :

$$V_A - V_B = U_{AB}$$

avec

V_A	:	potentiel en $[V]$ en A
V_B	:	potentiel en $[V]$ en B
U_{AB}	:	tension en $[V]$ entre les points A et B

Exercice 5

On considère deux points A et B du champ électrique créé par un générateur de van de Graaff. Ces deux points sont sur la même ligne de champ et sont distants de 1 cm. Les potentiels de ces points sont respectivement de 7400 [V] et de 7800 [V]. Calculer l'accélération d'un électron se trouvant entre ces points.
Rép. $7.03 \cdot 10^{15}$ [m/s^2]

Module 18. Electricité : circuit électrique (partie 1)

18.1 Intensité du courant électrique

Un courant électrique est un déplacement de charges électriques. Pour créer un courant électrique, il faut brancher un conducteur (matériaux permettant le passage de charges électriques) à une source de tension (par exemple une pile). Par exemple, le cuivre est un bon conducteur électrique. Si on branche les deux extrémités d'un fil de cuivre aux bornes (positives et négatives) d'une source de tension (pile), les électrons libres des atomes de cuivre composant le fil vont se mettre en mouvement et donc créer un courant électrique. Le courant électrique correspond à la charge en [C] traversant une section du conducteur pendant un temps t en [s] :

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

$\Delta Q \rightarrow [C]$

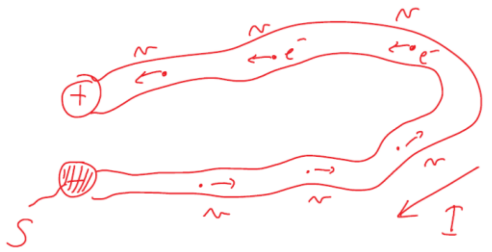
$\Delta t \rightarrow [s]$

$\left[\frac{C}{s}\right] = [A]$

↳ Ampère

avec

I	:	intensité du courant en ampère $[A]$
Q	:	charge en $[C]$ traversant une section de conducteur en t secondes
t	:	temps en $[s]$



Vitesse moyenne de déplacement des charges électriques dans un conducteur :

$$I = q \cdot n \cdot v \cdot S$$

q : charge transportée en [C]

n : nombre de charges transportées par [m³]

v : vitesse moyenne de déplacement des charges $\left[\frac{m}{s}\right]$

S : section du fil en [m²]

Exercice 1

Un condensateur de 4 μF est chargé sous une tension de 100 V. On joint ses armatures par un conducteur de grande résistance. 20 secondes plus tard, on constate que la tension s'est abaissée à 99.5 V. Quel est le courant de décharge ?
Rép. 10^{-7} A

18.2 lois d'Ohm

$$\boxed{U = R \cdot I}$$

tension [V]

courant [A]

résistance $\left[\frac{V}{A}\right] = [\Omega]$

Les conducteurs ont de petites résistances

avec

U	:	tension en $[V]$ entre les extrémités d'un conducteur
R	:	résistance du conducteur en $[\Omega]$ (ohm)
I	:	courant dans le conducteur en $[A]$

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

L = longueur du conducteur [m]

$\rho_{cuivre} = 1,68 \cdot 10^{-7} \, [\Omega \cdot m]$

S = section du conducteur $[m^2]$

résistivité $[\Omega \cdot m]$

avec

R	:	résistance en $[\Omega]$
ρ	:	résistivité en $[\Omega m]$
L	:	longueur du fil conducteur en $[m]$
S	:	section du fil conducteur en $[m^2]$

Exercice 2

Un tuyau de caoutchouc a une longueur de 25 m et un diamètre intérieur de 1 cm. Il contient une solution de sel de cuisine dont la résistivité est de 10^{-1} Ωm. Les extrémités du tuyau sont reliées à une source de courant dont la tension est de 4 V.

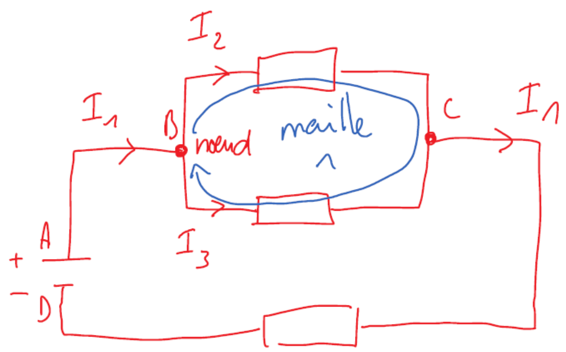
a) Calculer la résistance du conducteur.
b) Calculer la force exercée par le champ électrique sur les transporteurs de charges.
c) Quel est le diamètre d'un fil de cuivre ayant même longueur et même résistance que le tuyau ?

Rép. 31800 Ω ; $2.56 \cdot 10^{-20}$ N ; 4.12 μm

Exercice 4

Un fil de fer a une longueur de 600 m et une section de 2 mm^2. Ses extrémités sont reliées à un générateur dont la tension est de 20 V. Calculer la vitesse des électrons libres dans le fil. On admet qu'il y a, dans le fer, 10^{29} électrons libres par m^3.
Dans le circuit précédent, on interpose un fil de cuivre de 1 km de long et de 1mm^2 de section, de façon que les deux conducteurs soient en série. Calculer la vitesse des électrons libres dans chaque conducteur. On admet que le cuivre possède également 10^{29} électrons libres par m^3.
Rép. $2.14 \cdot 10^{-5}$ m/s ; $1.36 \cdot 10^{-5}$ m/s ; $2.7 \cdot 10^{-5}$ m/s

18.3 circuit électrique



Règles : • dans un circuit le courant est partout le même dans un conducteur

• sur un chemin les tensions s'additionnent

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$$

• la somme des courants arrivant en un noeud est égale à la somme des courants en sortant

$$I_1 = I_2 + I_3$$

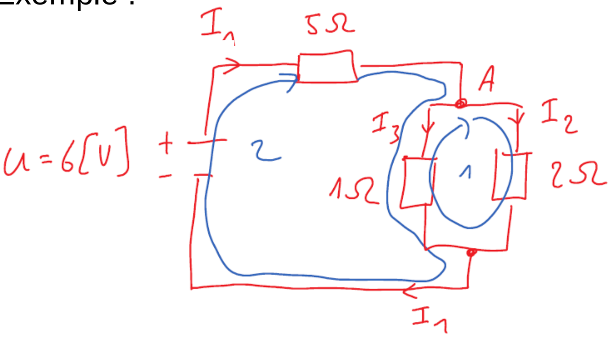
• sur une maille, la somme des tension est nulle
(maille = chemin fermé dans le circuit)

Lois de Kirchhoff

maille 1 : $U_{BC} + U_{CB} = 0$

avec I_2 avec I_3

Exemple :



noeud A: $I_1 = I_2 + I_3 \longrightarrow I_1 = I_2 + 2I_2$

maille 1: $2I_2 - 1I_3 = 0 \rightarrow I_3 = 2I_2$ (#)

maille 2: $5I_1 + 1I_3 - 6 = 0 \longrightarrow 5I_1 + 2I_2 - 6 = 0$

$$\begin{cases} I_1 = 3I_2 \quad (*) \\ 5I_1 + 2I_2 - 6 = 0 \end{cases} \rightarrow 5\cdot(3I_2) + 2I_2 - 6 = 0$$

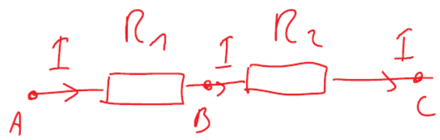
$$\Rightarrow 17\,I_2 - 6 = 0$$

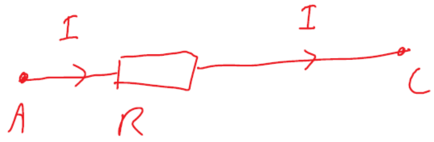
$$\Rightarrow I_2 = \frac{6}{17} \cong 0{,}353\,[A]$$

$$(*) \Rightarrow I_1 = 3\cdot\frac{6}{17} = \frac{18}{17} = 1{,}059\,[A]$$

$$(\#) \Rightarrow I_3 = 2\cdot\frac{6}{17} = \frac{12}{17} = 0{,}706\,[A]$$

Résistances en série :





Question : quelle résistance unique R a le même effet que les 2 résistances R_1 et R_2 placées en série dans un circuit électrique ?

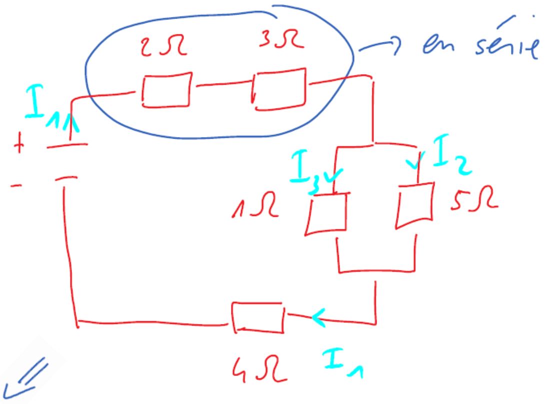
$$U_{AB} + U_{BC} = U_{AC}$$

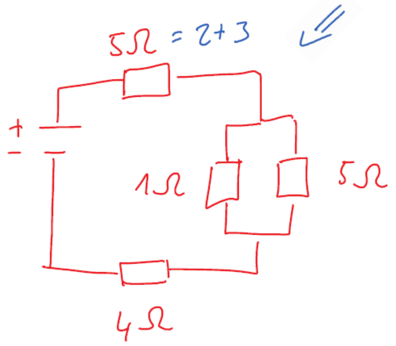
$$\Rightarrow R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = R \cdot I$$

$$\Rightarrow (R_1 + R_2) \cdot I = R \cdot I$$

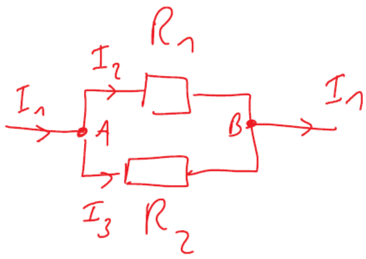
$$\Rightarrow R_1 + R_2 = R \quad \Rightarrow \quad \boxed{R = R_1 + R_2}$$

exemple :

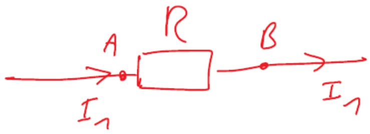




Résistances en parallèle :



Quelle est la résistance R ayant le même effet que 2 résistances R_1 et R_2 placées en parallèle dans un circuit électrique ?



$$I_1 = I_2 + I_3$$

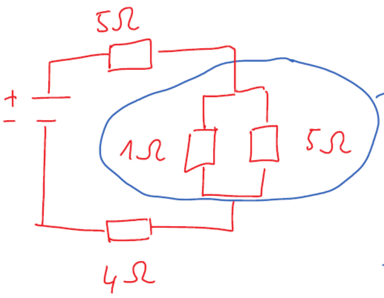
$$U = RI \Rightarrow I = \frac{U}{R}$$

$$\Rightarrow \frac{U_{AB}}{R} = \frac{U_{AB}}{R_1} + \frac{U_{AB}}{R_2}$$

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

$$\Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2} \Rightarrow \boxed{R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$$

Suite de l'exemple :

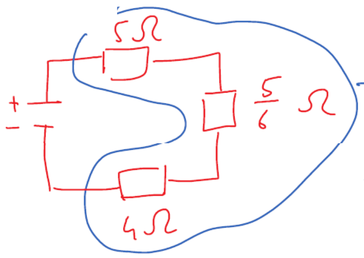


→ en parallèle

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{1} + \frac{1}{5} = \frac{6}{5}$$

$$\Rightarrow R = \frac{5}{6}\,[\Omega]$$

⇒

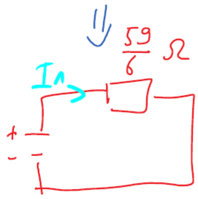


→ en série

$$\Rightarrow R = 5 + \frac{5}{6} + 4$$

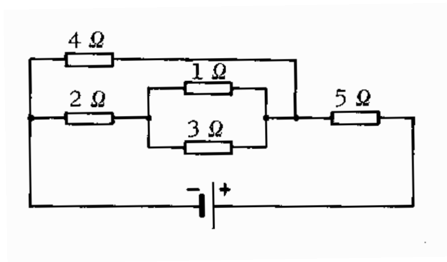
$$= \frac{59}{6}\,[\Omega]$$

⇓



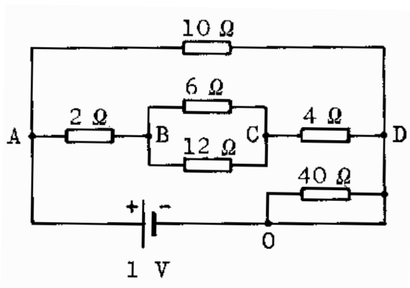
Exercice 3

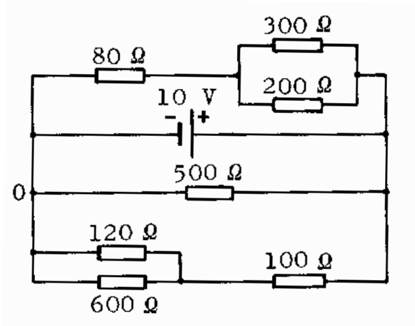
Dans le circuit ci-contre, la résistance de 3 Ω est parcourue par un courant de 12 mA. Calculer la tension aux bornes de la source.
Rép. 537 mV



Exercice 5

Calculer le courant dans chaque résistance et le potentiel de chaque fil de connexion. Placer le point de référence du potentiel au point O indiqué.



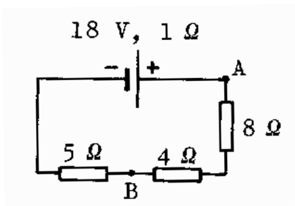


Rép. 0.1 A ; 0.1 A ; 0.0667 A ; 0.0333 A
0.1 A ; 0 A ; V_A=1 V ; V_B=0.8 V ;
V_C=0.4 V ; V_D=0 V ;

Rép. 0.05 A ; 0.02 A ; 0.05 A ; 0.0083 A
0.0416 A ; 0.02 A ; 0.03 A ; 4 V ;
10 V ; 0 V ; 10 V ; 10 V ; 0 V ; 5 V

Exercice 6

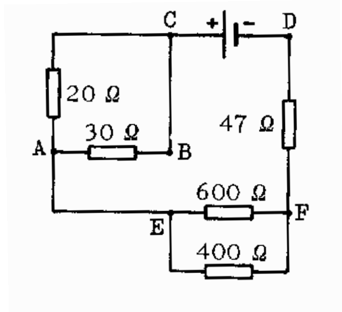
a) Déterminer la tension entre les points A et B du circuit ci-contre
b) On complète le circuit en joignant les points A et B par une résistance de 4 ohms. Calculer le courant qui la traverse.



Rép. 12 V ; 1.5 A

Exercice 7

Une source de courant a une tension électromotrice de 60 V et une résistance intérieure de 1 ohm. Elle alimente le circuit ci-contre. On choisit le zéro du potentiel à la borne négative D de la source.
a) déterminer le courant dans chaque branche du circuit et le potentiel de tous les points indiqués.
b) En suite d'un accident, le point E vient en contact avec le point B. Calculer ce que vaut alors le potentiel de F.



Rép. a) 0.12 A ; 0.08 A ; 0.08 A ; 0.12 A ; 0.2 A ;
V_B=V_C=59.8 V ; V_A=V_E=57.4 V ; V_F=9.4 V ; V_D=0
b) 9.79 V

18.4 effet Joules

La chaleur dégagée dans un conducteur par le passage d’un courant est proportionnelle à la résistance du conducteur, au carré de l’intensité et à la durée du passage du courant :

$$A = E = UIt = RI^2t$$

avec

A, E	:	énergie en $[J]$
U	:	tension en $[V]$ entre les extrémités du conducteur
I	:	courant dans le conducteur en $[A]$
t	:	temps en $[s]$ durant lequel le courant circule dans le conducteur

Applications de l’effet Joule

1. Tous les chauffages électriques mettent à leur profit l’effet Joule. Dans les lampes à incandescence, on produit un dégagement de chaleur assez grand pour que le filament devienne blanc.
2. Les fusibles sont des fils très fins, placés en série avec les appareils qu’on branche sur le réseau d’alimentation. Un court-circuit, c’est-à-dire un circuit de faible résistance, entraîne un courant élevé qui échauffe et fait fondre le fusible. Si cette sûreté n’existait pas, les fils qui alimentent les appareils subiraient un échauffement qui pourrait provoquer des incendies.
3. Comme conséquence fâcheuse de l’effet Joule, il y a les pertes d’énergie dans tous les conducteurs.
4. Il y a aussi l’échauffement dû aux mauvais contacts. Lorsque deux conducteurs sont mal reliés, leur contact possède une résistance relativement élevée. Le dégagement de chaleur est particulièrement grand à ces endroits.

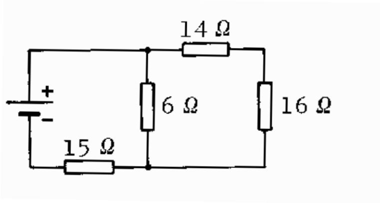
18.5 puissance

$$P = UI$$
$$P = RI^2$$

avec

P	:	puissance en Watt $[W]$
		1 $[W]$ = 1 $[V \cdot A]$
U	:	tension en $[V]$ entre les extrémités du conducteur
R	:	résistance en $[\Omega]$
I	:	courant dans le conducteur en $[A]$

Exercice 8



On donne le circuit ci-contre. La tension aux bornes de la pile est de 2 V.
a) Calculer le courant dans chaque résistance
b) Calculer la puissance dégagée dans la résistance de 16 Ω
Rép. a) 0.1 A ; 0.017 A ; 0.083 A
b) 0.0044 W

Exercice 9

Un générateur a une tension électromotrice de 6 volts et une résistance interne de 2 ohms.
a) Quel est le courant maximum qu'il peut débiter ?
b) On le branche sur une résistance de 10 ohms. Quelle est la chaleur dégagée en une minute dans cette résistance ?
Rép. 3 A : 35.8 cal

Exercice 10

Une plaque chauffante consomme 2400 watts. Elle est branchée sur le réseau (220 volts).
a) Quelle est sa résistance ?
b) Combien met-elle de temps pour amener 10 litres d'eau de 10 à 100° C, si les pertes de chaleur sont négligeables ?
Rép. 20.17 Ω ; 26.12 minutes

Module 19. Electricité : circuit électrique (partie 2)

19.1 courants continu et alternatif

Un **courant continu** est un courant produit par un générateur de tension constante (comme une pile). Dans ce cas le courant dans le conducteur est invariant est toujours dirigé dans le même sens : du plus vers le moins (les électrons se déplaçant bien sûr du moins vers le plus).

Un **courant alternatif** est un courant produit par une tension variant au cours du temps. Cette tension varie périodiquement entre une valeur maximale +U et une valeur minimale –U, de manière sinusoïdale. Lorsque la tension est positive, le courant se déplace dans un sens, puis, lorsqu'elle est négative, dans l'autre sens.

19.2 dangers du courant électrique et mesures de sécurité

MISE A TERRE : Lorsque l'on parle de mise à terre, ce n'est pas que l'on pose un objet par terre mais que l'on branche le boîtier métallique de l'appareil avec un fil (de couleurs jaune et verte) relié à la terre par l'intermédiaire des tuyaux d'eau (qui sont en cuivre). L'appareillage électrique doit être conçu pour éviter les risques d'incendie et d'électrocution.

(1) Risques d'incendie
Une intensité trop grande du courant électrique pourrait faire chauffer les fils ($P = RI^2$) et provoquer un incendie. Pour prévenir ce risque, on utilise un fusible, petit fil qui fond à basse température (les premiers qui ont été construits étaient fait en plomb) dès que l'intensité dépasse une certaine grandeur, et coupe le circuit. On utilise couramment des disjoncteurs thermiques ou électromagnétiques qui permettent de réamorcer le circuit sans changer de dispositif.

(2) Risques d'électrocution
Faisons une petite expérience où nous sommes branchés à un générateur, mesurons la tension entre nos deux mains et le courant qui nous traverse. Nous allons successivement prendre un générateur continu puis alternatif en prenant bien garde de rester dans une plage de tension entre 0 et au maximum 50 V qui n'est pas trop dangereuse pour notre corps. Nous pourrons mesurer la résistance de notre corps (U/I) et les grandeurs du courant et de la tension. A un certain stade, les effets du courant commencent à devenir désagréables.
Nous allons découvrir que :

- La résistance du corps pouvant énormément varier suivant qu'il est sec, humide ou dans un bain, c'est le courant qui provoque la contraction musculaire (y compris celle du muscle cardiaque), ce qui est dangereux.
- Le courant continu donne l'impression d'une brûlure alors que le courant alternatif provoque un picotement.

- Notre résistance (U/I) au courant alternatif est plus grande qu'au courant continu et a tendance à diminuer quand le courant augmente. En fonction du contact, elle n'est cependant pas constante au cours du temps pour un même courant et dépend du contact métal-peau et de la transpiration cutanée. Elle peut varier entre 10 et 100 kW environ et dépend des 7 facteurs donnés ci-après :

    1. L'état de la peau (mouillée, moite, transpiration...)
    2. La pression de contact.
    3. L'aire de la surface de contact.
    4. Du parcours du courant dans le corps humain.
    5. De la tension à laquelle le corps est soumis.
    6. des états physiologiques et psychologiques.
    7. Des autres résistances des vêtements, des chaussures, des gants, des sols, des éléments de bâtiments...

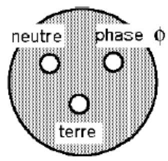
Commentaire : Le courant continu est plus dangereux que le courant alternatif pour notre corps car il peut provoquer une électrolyse du sang et des liquides de notre corps. Un courant à très haute fréquence n'est pas dangereux car il passe uniquement à la surface de notre corps

(3) Tableau des effets du courant :

Courant en [mA]	**Effet du courant alternatif 50 Hz sur le corps humain**
0 – 0.5	Aucun
0.5 – 2	Picotement
2 – 10	Douleur et contraction musculaire
10 – 20	Augmentation de la douleur et, aux alentours de 15 mA, la contraction des muscles est telle que l'on ne peut plus relâcher le métal.
20 – 100	Paralysie des muscles respiratoires
100 – 3000	"Fibrillation ventriculaire" : le cœur arrête de battre normalement et se contracte "au gré du courant".
> 3000	Arrêt cardiaque

Les trois bornes de la prise électrique :

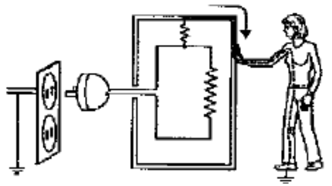
- La phase : arrivée d'énergie (fil chaud) [rouge ou marron]
- Le neutre : retour d'énergie en général à 0 V (fil froid) [bleu]
- La terre : protection contre les électrocutions [jaune et vert]



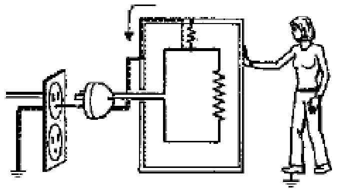
Mise à la terre des boîtiers des appareils électriques :
Le courant de défaut est la partie du courant provenant du fil de phase qui se referme par la terre au lieu de revenir par le fil du neutre.

La mise à terre est une mesure de protection qui empêche le courant de défaut de passer par la personne pour aller se refermer dans la terre.

(a) Le boîtier de l'appareil n'est pas mis à la terre. Le courant va donc se refermer à travers la personne, par la terre.



(b) Le boîtier de l'appareil est mis à la terre. Le courant va donc se refermer directement par la terre, via l'appareil.



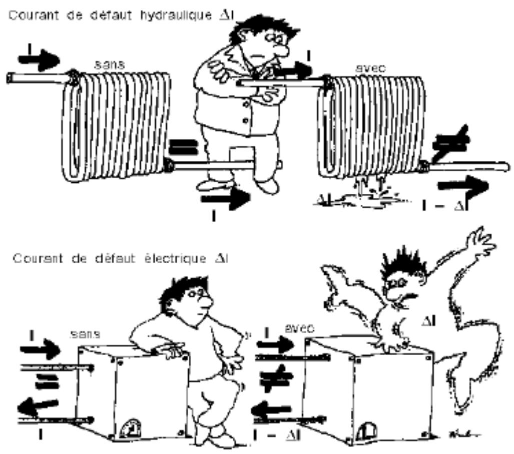
(4) Risques courus et prescriptions électriques pour notre protection :
Les tensions au-delà de 50 V (25 V dans un local humide) sont dangereuses et nécessitent quelques précautions. La tension du téléphone est inférieure à 50 V sauf la sonnerie qui dépasse quelque peu cette valeur.
L’électrocution peut avoir lieu entre la phase et le neutre ou entre la phase et la terre :

- électrocution phase – neutre : les risques sont grands car la protection contre l'électrocution est impossible mais il arrive rarement que l'on touche les deux bornes à la fois. Il existe maintenant des prises où l’on ne peut pas mettre ses doigts (mettre des protections dans les prises pour les enfants !).
- électrocution phase – terre : il existe trois types de protection :

    a) Mise à la terre du boîtier métallique de l'appareil comme décrit plus haut.
    b) Le transformateur d'isolation (220 V - 220 V) permet une séparation entre le neutre et la terre (tension flottante). La personne qui touche une seule borne la met directement à la terre et ne se fait pas électrocuter.
    c) Dans les endroits humides comme les caves, on doit poser un "relais à courant de défaut" (FI) qui déclenche la phase dès que le courant à travers la terre dépasse 10 mA. En effet, dès qu'une personne touche un fil électrique, le courant s'établit entre elle et la terre et revient à travers la terre. Le disjoncteur ou relais à courant de défaut est décrit au paragraphe suivant :

Protection contre le courant de défaut - relais FI :

Le courant de défaut FI (false intensity) consiste en une partie du courant qui, au lieu de terminer son parcours dans les fils, passe par la terre via un utilisateur qui est électrocuté : $I = DI + I'$
Pour donner une comparaison, l'eau qui passe à travers ce radiateur ne se retrouve pas intégralement à la sortie des tuyaux car il y a une fuite par terre. Le courant de défaut est aussi une fuite de courant. Pour le détecter, comme il est impossible de mesurer directement le courant qui passe dans la terre, il faut détecter si le courant IP qui entre est égal à celui IN qui sort. C'est le principe de mesure du relais FI (false intensity).



Les dangers de l'électrocution

(source : Electricité et magnétisme, Benson Harris, DeBoeck Université)

On entend souvent parler des dangers que comporte l'utilisation inappropriée d'appareils électriques. Que doit-on penser des appels à la prudence que lancent à répétition les grandes compagnies de distribution d'électricité dans leurs campagnes de prévention ? Pour en juger, nous allons décrire ici les effets physiologiques du passage d'un courant électrique à travers le corps humain.

Le corps humain est un bon conducteur d'électricité. A la différence des métaux conducteurs, dans lesquels ce sont les électrons libres qui assurent le passage du courant, ce sont les nombreux ions en solution qui permettent la circulation électrique dans notre organisme. Notre système nerveux contrôle la plupart de nos organes par l'intermédiaire de faibles courants d'ions le long du réseau complexe formé par les neurones. Ainsi, la circulation d'un courant provenant d'une source extérieure peut provoquer des effets dévastateurs en interférant avec les courants naturels du système nerveux.

Pour qu'un courant s'établisse dans une personne, il faut que le corps devienne partie intégrante d'un circuit fermé. Le seul fait de toucher à un fil de distribution électrique dénudé ne suffit pas nécessairement. Pour que le courant passe, il lui faut un chemin de retour. Malheureusement (de ce point de vue, du moins), les humains sont généralement en contact avec le sol. Or, la Terre, par son immense capacité, constitue un réservoir naturel vers lequel peuvent passer les charges électriques. Ainsi, on peut toucher à un fil de distribution électrique dénudé et éviter d'être traversé par un courant électrique si on se coupe de tout contact avec le sol. Des bottes munies d'une semelle faite d'un matériau isolant peuvent nous protéger. De même, si un fil de distribution électrique tombe sur une voiture, les passagers sont en sécurité puisque les pneus forment une barrière isolante entre la Terre et le véhicule, dans cette situation particulière, il faut éviter de quitter la voiture puisque pendant un court instant le corps humain pourrait servir de lien fatal entre la voiture chargée et le sol. Un phénomène semblable se produit lorsque la foudre frappe un avion en plein vol. Puisque l'avion n'est pas en contact avec la Terre, il n'y a aucun danger pour les passagers; la charge acquise par l'avion s'échappera lentement dans l'air jusqu'à l'atterrissage.

Lorsque le contact est établi et qu'un courant arrive à circuler, les choses se gâtent rapidement. Un courant aussi faible que 1 mA suffit à produire une sensation de douleur. À partir de 10 mA, l'interférence avec le système nerveux est telle que la plupart des muscles se contractent, rendant très difficile, pour ne pas dire impossible, la simple action de lâcher volontairement la source de courant Au-delà de 100 mA, c'est le coeur qui est touché. Le muscle cardiaque est alors victime de fibrillations ventriculaires associées à une désynchronisation du mécanisme de pompage du sang qui fait chuter le débit sanguin global du corps en deçà du minimum nécessaire au maintien de la vie. Par contre, on peut survivre à un courant de plusieurs ampères si celui-ci est de courte durée. Une telle décharge a pour effet de paralyser complètement le coeur. Celui-ci peut reprendre son rythme normal une fois le choc passé. On exploite d'ailleurs cette capacité du coeur lorsque l'on a recours au défibrillateur, un appareil qui envoie une brève mais intense décharge au coeur, dans l'espoir de lui faire reprendre son rythme normal. En plus des effets sur le système nerveux et les muscles, les forts courants produisent aussi des brûlures, par simple effet Joule.

Cette description des effets de l'électrocution est relative aux valeurs des courants en cause. Nous savons que le courant d'un circuit est fonction de la différence de potentiel appliquée et de la valeur de la résistance dans le circuit. Les sources de tension auxquelles nous risquons d'être exposés sont diverses. Elles sont de 120 ou de 240 V dans le cas d'un circuit domestique, de 25 000 V dans cas d'un circuit typique de distribution d'une grande ville et de 735 000 V dans celui du réseau de transport. La donnée manquante pour établir l'importance du danger auquel on s'expose en manipulant une source de tension donnée est donc la résistance du corps humain. Celle-ci n'est malheureusement pas simple à évaluer. Généralement, le contact avec la source se fait par l'intermédiaire de la peau. D'un bout à l'autre du corps. à divers point de contact sur la peau, notre résistance varie de 104 à 106 W. À une tension de 120 V. on ne s'expose donc qu'à un courant de quelques mA. Rappelons que de tels courants provoquent une douleur sensible et que, dès qu'on atteint les 10 mA, d'importantes contractions musculaire peuvent survenir. Ainsi, à première vue, on risque de se tirer d'affaire à la suite d'un contact accidentel avec la plus faible des tensions auxquelles nous sommes exposés Malheureusement, du seul fait de la transpiration, notre peau est rarement complètement sèche. Or, la résistance de la peau humide chute aux environs de 103 W. Cela provoque une augmentation notable du courant, laquelle s'accompagne de brûlures qui ont tôt fait de briser la barrière naturelle que constitue la peau. Une fois en contact avec l'intérieur du corps, le courant ne rencontre plus qu'une résistance de quelques dizaines d'ohms en raison de la faible résistivité de la solution ionique qui irrigue le corps. Pire, au fur et à mesure que de forts courants y circulent, les membranes des cellules se rompent et rendent le corps encore plus conducteur.

De toute évidence, le corps humain est très vulnérable aux courants électriques. Il est clair que la prudence et le respect des règles de sécurité s'imposent dès qu'on manipule une source de courant électrique.

Exercice 1

Un oiseau pose une patte sur une ligne à haute tension. Que se passe-t-il s'il y pose les deux pattes ? Que se passerait-il s'il posait l'autre patte sur un autre conducteur (éventuellement connecté à la terre) ?

Exercice 2

En admettant que vous ayez une résistance de 50'000 Ω , quelle est la tension qui devient dangereuse pour vous ?
Rép. 800 V

Exercice 3

Quel est le courant que reçoit une personne qui se trouve dans son bain (R = 1500 Ω) et dont le sèche-cheveux branché sur la prise 220 V tombe dans le bain ? Quels sont ses effets ? Est-ce important que l'appareil soit enclenché ? Expliquer.
Rép. 147 mA

Exercice 4

Y a-t-il un risque de recevoir un choc électrique avec une batterie de voiture (12 V) ? Quels types de risques sont possibles avec ce type de batterie ?

Exercice 5

Pourquoi est-il particulièrement important de mettre à la terre les appareils électriques lorsqu'on les utilise à l'extérieur ou dans la cave ?

Exercice 6

Une personne tombe par terre électrocutée avec un fil électrique à la main. Que faire ?

Exercice 7

Un enfant introduit un crayon gris dans les bornes de la prise électrique. Est-ce dangereux ?

Exercice 8

Entre la phase et le robinet (relié à la terre), on mesure une tension de 220 V. Pourquoi ne puis-je pas faire fonctionner une lampe électrique en la branchant entre phase et robinet ?

Exercice 9

On a alimenté un lave-linge avec un cordon à 2 fils. Pouvez-vous prévoir les risques d'accidents ? Si le fil de terre était branché, est-ce que le risque d'électrocution serait éliminé ?

Exercice 10

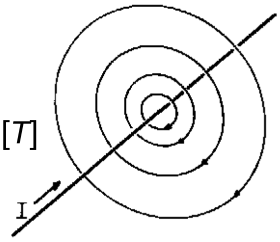
Lors d'un violent orage, un câble haute tension est tombé sur un autocar. Quelle solution proposer pour les secours ?

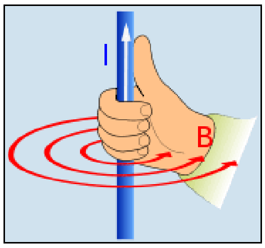
Module 20. Electricité : magnétisme

20.1 champ magnétique produit par un courant rectiligne

Un courant électrique crée un champ magnétique. Si le courant est **rectiligne**, les lignes de champ sont des cercles centrés sur le fil et orthogonaux à celui-ci. L'intensité du champ magnétique à une distance r du conducteur, dans lequel circule un courant I, est donnée par :

$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, où



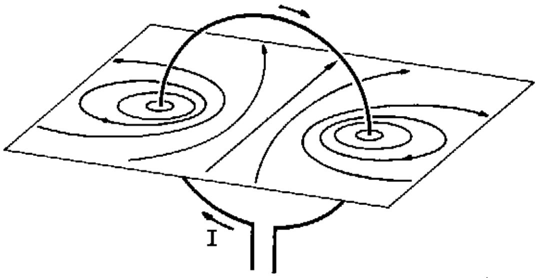


B est l'intensité du champ magnétique en Tesla [*T*]
I est l'intensité du courant électrique en [*A*]
r est la distance au fil en [*m*]
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (constante)

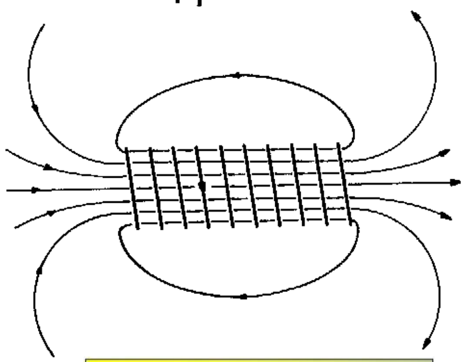
Le sens du champ est donné par la règle du tire-bouchon : on place la vis du tire-bouchon le long du fil. Si on manœuvre l'instrument de manière à le faire avancer dans le sens du courant, la poignée tourne dans le sens des lignes de champ.

Autre champ :

Si le courant est **circulaire**, les lignes de champ sont des cercles au voisinage immédiat du fil et des cercles plus ou moins déformés lorsqu'on s'en éloigne.

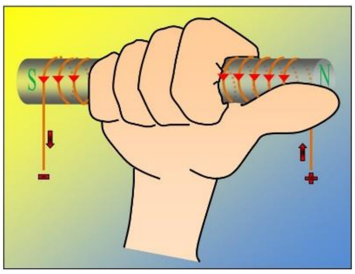


Si le courant est un **solénoïde** (**bobine**), le champ magnétique est uniforme à l'intérieur et beaucoup moins intense à l'extérieur qu'à l'intérieur. L'intensité du champ à l'intérieur de la bobine est donnée par :



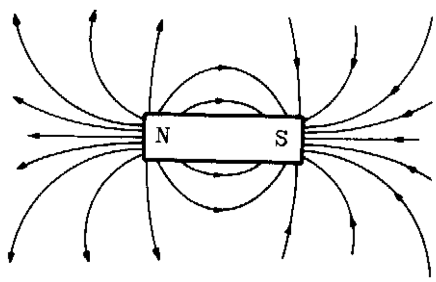
$B = \frac{\mu_0 N I}{l}$, où

B est l'intensité du champ magnétique en Tesla [*T*]
I est l'intensité du courant électrique en [*A*]
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (constante)
N est le nombre de spires (enroulement)
l est la longueur de la bobine

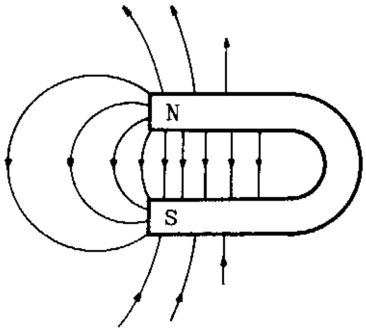


20.2 aimant et électroaimant

Un champ magnétique peut aussi être créé par un aimant : tout électron tournant autour d’un noyau équivaut à un petit courant circulaire. Il engendre donc un petit champ magnétique. On pourrait donc s’attendre à avoir un champ magnétique dans toute matière. Le plus souvent ces petits courants sont placés d’une manière désordonnée et, macroscopiquement, il n’apparaît aucun phénomène magnétique. Dans certains corps, les petits courants sont capables de se placer d’une manière relativement ordrée et il en résulte un champ magnétique observable. C’est ainsi que sont constitué les aimants. Un aimant possède de pôle (nord et sud). Les lignes de champ vont du nord vers le sud.

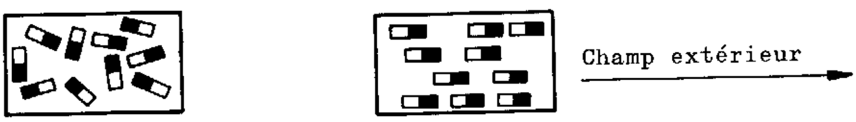


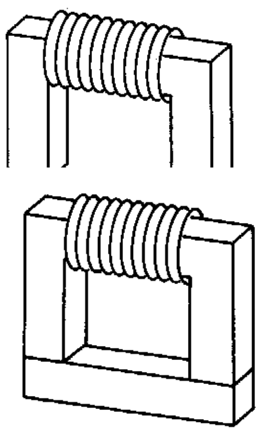
Barreau aimanté



Aimant en fer à cheval

Une substance ferromagnétique peut être considérée comme un ensemble de petits aimants. Sous l’influence d’un champ magnétique extérieur, les aimants élémentaires s’orientent tous dans le même sens. Lorsque l’on supprime le champ extérieur, les aimants élémentaires tendent à se remettre en désordre. Il subsiste toutefois une certaine aimantation, variable selon les substances. Dans certaines substances ferromagnétiques, comme l’acier, les aimants élémentaires ont tendance à garder l’orientation qu’ils ont une fois reçue. Cette propriété est utile pour la fabrication des aimants permanents.



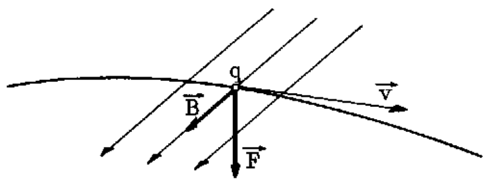


Un électroaimant est un système qui ne devient un aimant que lorsque un courant le traverse. Le plus souvent, un électroaimant est constitué par une bobine dans laquelle se trouve un noyau de fer doux. Ainsi, dès que le courant cesse, l’aimantation disparaît. Le noyau de fer a deux fonctions essentielles. Tout d’abord, il renforce le champ, il le multiplie par un facteur qui peut atteindre quelques milliers. Ensuite, il canalise les lignes de champ. Dans l’exemple indiqué par le dessin ci-contre, les lignes de champ n’ont pas la même forme que si la bobine était seule. Elles suivent le fer et présentent le même aspect que dans le cas d'un aimant permanent en fer à cheval. Le noyau permet donc de donner au champ magnétique la forme qu'on désire. Lorsque les lignes de champ restent constamment dans le noyau de fer, on dit qu'on a un circuit magnétique fermé. Dans un tel cas, on constate que, même avec du fer doux, l'aimantation subsiste lorsque on supprime le courant. Le champ magnétique créé par les aimants élémentaires est suffisant pour les maintenir orientés. Si on ouvre tant soit peu le circuit magnétique, l'équilibre de l'ensemble est rompu, les aimants élémentaires retrouvent leur désordre naturel et le champ magnétique disparaît. Les électro-aimants sont beaucoup utilisés dans la technique : sonnettes, grues, télégraphe, écouteur de téléphone, ampèremètres, etc…

20.3 effets du champ magnétique sur une particule chargée se déplaçant à une vitesse v.

Force de Lorentz :

Une particue chargée se déplaçant dans un champ magnétique subit une force appelée force de Lorentz.



On a : $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$
avec

F : force en $[N]$ subie par la particule chargée se déplaçant dans le champ magnétique
q : charge de la particule en $[C]$
v : vitesse de la particule en $\left[\frac{m}{s}\right]$
B : intensité du champ magnétique en $[T]$

Le module de $\vec{F}$ est $F = qvB\sin\alpha$, où α est l'angle formé par $\vec{v}$ et $\vec{B}$

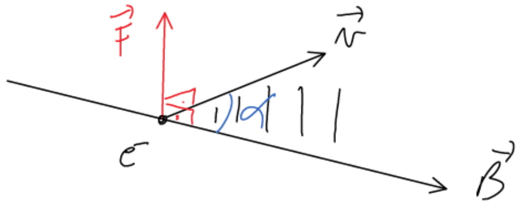
La direction de $\vec{F}$ est perpendiculaire à $\vec{v}$ et $\vec{B}$: $\vec{F} \perp \vec{v}$ et $\vec{F} \perp \vec{B}$

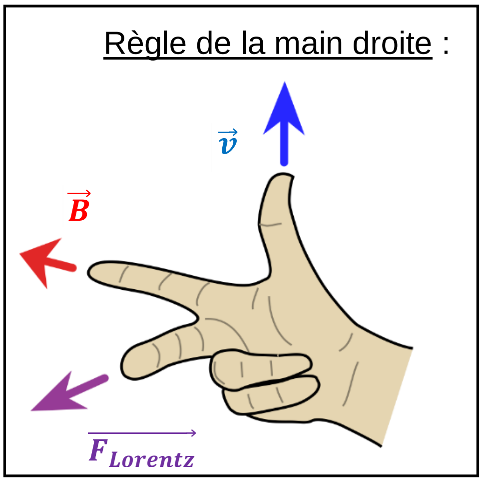
Le sens de $\vec{F}$ est donné par la règle de la main droite si q>0. Il faut changer le sens de $\vec{F}$ si q<0 ou utiliser la règle de la main gauche.

$$\underbrace{\vec{F}_{Lorentz}}_{[N]} = \underbrace{q}_{[C]} \cdot \underbrace{\vec{v}}_{[\frac{m}{s}]} \times \underbrace{\vec{B}}_{[T]}$$

majeur — pouce — index

produit vectoriel





Remarques :

- pour qu'une particule subisse la force de Lorentz, il faut que :

  $q \neq 0 \Rightarrow$ la particule doit être chargée

  $v \neq 0 \Rightarrow$ la particule doit être en mouvement

  $B \neq 0 \Rightarrow$ la particule doit être dans un champ magnétique

  $\sin\alpha \neq 0 \Rightarrow$ la vitesse et donc la trajectoire de la particule ne doivent pas être parallèles aux lignes du champ magnétique.

- si $\alpha = 90°$, c'est-à-dire si $\vec{v} \perp \vec{B}$ on a

  $F = q \cdot v \cdot B \cdot \underbrace{\sin 90}_{1}$

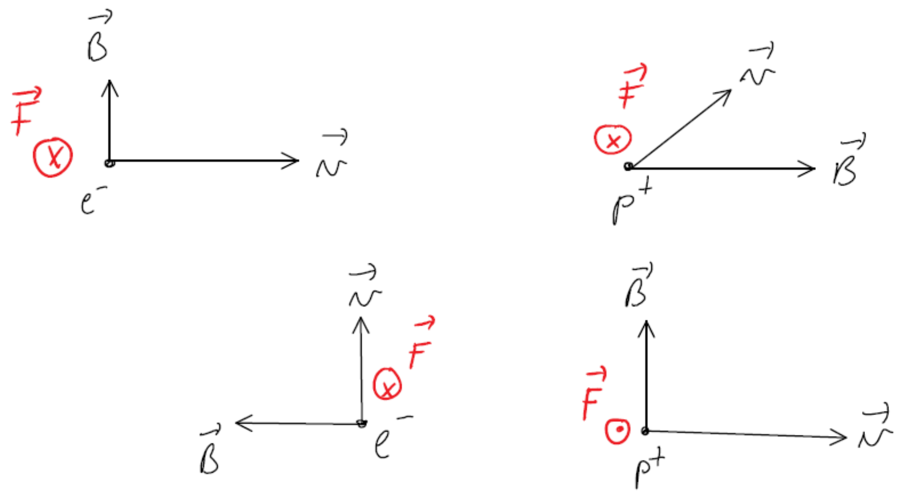
  $\Rightarrow F = q \cdot v \cdot B$

- convention de notation :

  un vecteur rentrant dans le plan est noté : ⊗

  un vecteur sortant du plan est noté : ⊙

<u>exemple</u> : représenter la force de Lorentz dans les cas suivants :



Exercice 1

Un électron se déplace au-dessus de l'atmosphère, à une vitesse de 1000 km/sec, perpendiculairement aux lignes du champ magnétique terrestre. Dans la région où il se trouve, l'intensité de l'induction (magnétisme) est de 10^{-6} tesla.

a) Déterminer la force subie par l'électron
b) Déterminer l'accélération subie par l'électron
c) Déterminer le rayon de courbure de sa trajectoire

rép. $1.602 \cdot 10^{-19}$ N ; $1.758 \cdot 10^{11}$ m/s^2 ; 5.69 m

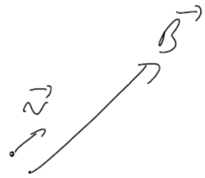
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique :

- Si la vitesse initiale de la particule est parallèle aux lignes du champ magnétique, la force de Lorentz s'annule et la trajectoire de la particule est une droite.

$\vec{v} \parallel \vec{B}$: $F_{Lorentz} = q \cdot v \cdot B \cdot \sin 0 = 0$

$\Rightarrow$ la particule ne subit pas de force

$\Rightarrow$ sa trajectoire est une droite.



- Si la vitesse initiale est perpendiculaire au champ magnétique, la force et donc l'accélération subies par la particule sont dans un plan perpendiculaire au champ. La trajectoire est donc un cercle.

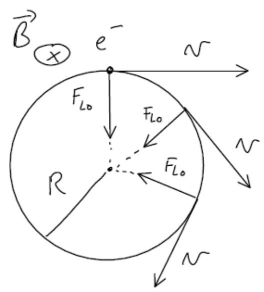
$\vec{v} \perp \vec{B}$:

La trajectoire est un cercle de rayon R avec :

$$F_{Lorentz} = m \cdot a = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad \text{(mcu)}$$

$$\Rightarrow q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow R = \frac{mv^2}{qvB} \Rightarrow \boxed{R = \frac{mv}{qB}}$$

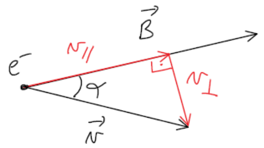


- Si la vitesse initiale de la particule n'est ni parallèle, ni perpendiculaire au champ magnétique, on peut la décomposer en deux : une composante parallèle et une composante perpendiculaire au champ magnétique, le mouvement de la particule est donc simultanément rectiligne et circulaire, la trajectoire est donc une hélice.

$\vec{v}$ ni parallèle, ni perpendiculaire à $\vec{B}$

$v_{//} = v \cdot \cos\alpha$

$v_{\perp} = v \cdot \sin\alpha$

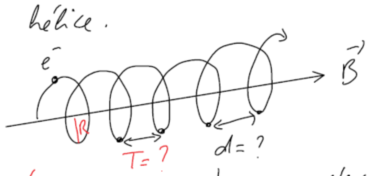


$\sin\alpha = \frac{\text{opposé}}{\text{hyp}} = \frac{v_{\perp}}{v}$

$\Rightarrow v_{\perp} = v \cdot \sin\alpha$

$\cos\alpha = \frac{\text{adj}}{\text{hyp}} = \frac{v_{//}}{v} \Rightarrow v_{//} = v\cos\alpha$

$\Rightarrow$ la particule se déplace avec une vitesse parallèle à $\vec{B}$ et en même temps perpendiculaire à $\vec{B}$. Elle avance donc en suivant le champ magnétique et tourne en même temps. Sa trajectoire est une hélice.



$\hookrightarrow$ pas de l'hélice

$R_{\text{hélice}} = \frac{m v_{\perp}}{qB} = \frac{m v \sin\alpha}{qB}$

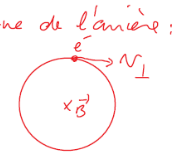
temps pour une "révolution" = période = T

$f = \frac{1}{T}$

$\omega = 2\pi f$

$v_{\perp} = \omega R$

vue de l'arrière :



$\Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\left(\frac{v_{\perp}}{R}\right)} = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v\sin\alpha}$

Le pas de l'hélice est $d = v_{//} \cdot T = v \cdot \cos\alpha \cdot \frac{2\pi R}{v \cdot \sin\alpha}$

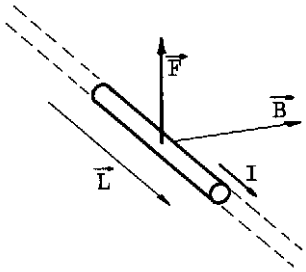
$\Rightarrow d = \frac{2\pi R\cos\alpha}{\sin\alpha} = \frac{2\pi \frac{m v \sin\alpha}{qB} \cdot \cos\alpha}{\sin\alpha}$

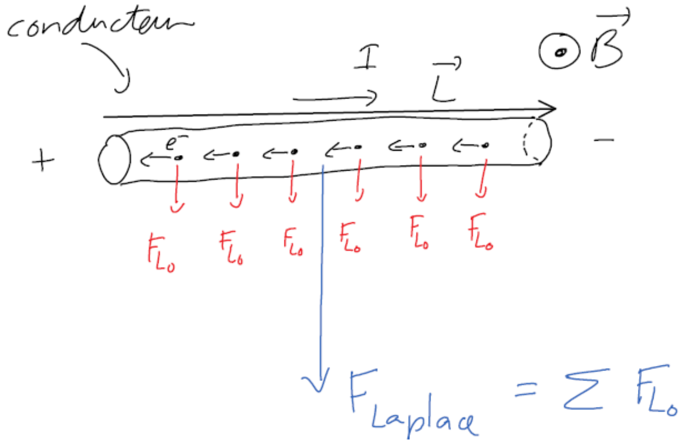
$\Rightarrow d = \frac{2\pi m v \cancel{\sin\alpha} \cos\alpha}{qB \cancel{\sin\alpha}} = \frac{2\pi m v \cos\alpha}{qB}$

20.4 effets du champ magnétique sur un courant électrique

Force de Laplace :

Un conducteur, dans lequel circule un courant, placé dans un champ magnétique, subit une force appelée force de Laplace. En fait chaque transporteur de charge (électron) formant le courant subit la force de Lorentz et la somme de ces forces donne la force de Laplace.





On a :

$$\vec{F}_{Laplace} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$$

[N]

courant [A]

vecteur de longueur égale à celle du conducteur et de même sens que I [m]

champ magnétique [T]

avec

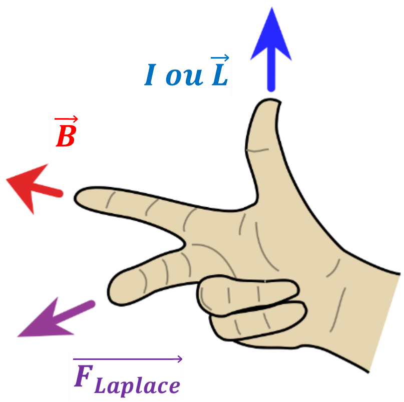
F	:	force en $[N]$ subie par le conducteur dans lequel circule un courant, placé dans le champ magnétique
I	:	courant en $[A]$ circulant dans le conducteur
L	:	longueur en $[m]$ du conducteur
B	:	intensité du champ magnétique en $[T]$

- La direction de $\vec{F}_{Laplace}$ est $\perp$ à $\vec{L}$ et $\perp$ à $\vec{B}$
- Le sens de $\vec{F}_{Laplace}$ est donné par la règle de la main droite
- La valeur de $\vec{F}_{Laplace}$ est :

$$F_{Laplace} = ILB \sin\alpha \text{ , avec } \alpha = \text{angle entre } \vec{L} \text{ et } \vec{B}$$

Remarque : si $\alpha = 90°$ on a : $F_{Laplace} = ILB$

Règle de la main droite :



Exercice 2

Un fil de cuivre dont la section est de 1 mm^2 est placé horizontalement dans un champ magnétique dont les lignes sont horizontales et perpendiculaires au fil. Ce fil est traversé par un courant de 10 A. Quelle doit être l'intensité du champ magnétique pour que la force exercée par celui-ci compense exactement le poids du fil de manière à ce qu'il reste en équilibre en l'air ? rép. 0.00896 [T]

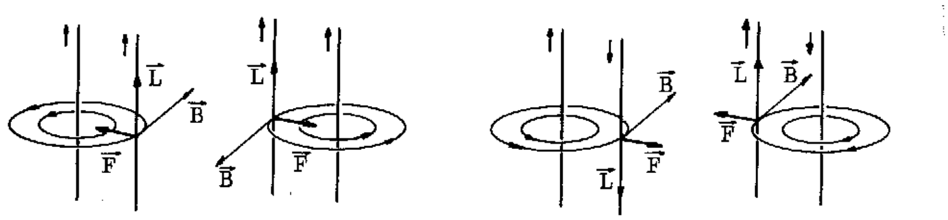
Exercice 3

Une tige métallique horizontale, ayant une masse m et une longueur a, est suspendue à deux fils souples, verticaux, conducteurs et de masse négligeable. Cette tige est placée dans l'entrefer d'un aimant dont le champ magnétique est vertical et a une intensité B. On établit un courant I dans le système. Déterminer l'angle que font alors les fils de suspension avec la verticale, si le système est en équilibre.
Application numérique : a = 9 cm, m = 30 g, B = 0.01 tesla, I = 2 A.
rép. 21'

Action réciproque de deux courants parallèles :

Comme des courants créent des champs magnétiques, et que des champs magnétiques exercent des forces sur des conducteurs dans lesquels circulent des courants, ceux-ci vont s'attirer ou se repousser :

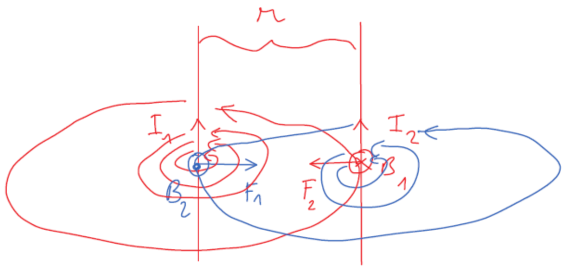
deux courants parallèles et de même sens s'attirent
deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent



On a : $F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 L}{d}$
avec

F : force en $[N]$ avec laquelle les conducteurs s'attirent ou se repoussent
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (constante)
I_1 : intensité en $[A]$ dans le conducteur 1
I_2 : intensité en $[A]$ dans le conducteur 2
L : longueur en $[m]$ des conducteurs
d distance en $[m]$ entre les conducteurs

Action réciproque de 2 courants parallèles :



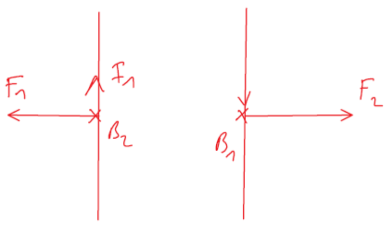
F_2 (F_1) : force de Laplace agissant sur le conducteur 2 (1), dans lequel circule un courant I_2 (I_1), placé dans le champ magnétique B_1 (B_2) créé par I_1 (I_2)

$$F_2 = I_2 \cdot l \cdot B_1 = I_2 \cdot l \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2\pi \cdot r} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi r}$$

$$F_1 = I_1 \cdot l \cdot B_2 = I_1 \cdot l \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2\pi r} = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi r}$$

$\Rightarrow F_1 = F_2$ 2 conducteurs parallèles, dans lesquels circulent des courants de même sens, s'attirent.

de même !



2 conducteurs parallèles, dans lesquels circulent des courants opposés, se repoussent

Exercice 4

Une bobine a un diamètre de 5 cm et une longueur de 15 cm. Elle comprend 1200 spires. Quel est le courant qui doit la traverser pour que l'induction magnétique produite à l'intérieur soit de $2 \cdot 10^{-5}$ tesla ?
rép. $1.98 \cdot 10^{-3}$ A

Exercice 5

Dans deux conducteurs distants de 2 mm circulent des courants de 10 A, en sens inverse. Déterminer la force subie par un tronçon de fil de 10 cm de long.
rép. 10^{-3} N

Module 21. Physique nucléaire (partie 1)

21.1 constituants du noyau

Caractéristiques d'un noyau d'atome.

La représentation symbolique du noyau d'un atome est: ${}^{A}_{Z}X$

- X est le symbole de l'élément chimique de numéro atomique Z.
- Z est le nombre de protons. Z est aussi appelé nombre de charge.
- A est le nombre de nucléons. A est aussi appelé nombre de masse.
- N = A - Z est le nombre de neutrons présents dans le noyau.

Un **nucléide** est l'ensemble des noyaux ayant le même nombre de nucléons A et le même nombre de protons Z.
Des noyaux sont appelés **isotopes** si ils ont le même nombre de charge mais des nombres de nucléons A différents. Par exemple:

${}^{35}_{17}Cl$ et ${}^{37}_{17}Cl$ sont des isotopes du chlore.

21.2 forces nucléaires, électriques entre les constituants du noyau

Les principales forces agissant dans le noyau.

Au sein du noyau s'affrontent principalement deux types d'interactions:

- Des répulsions électriques qui ont tendance à détruire le noyau,
- Des interactions nucléaires fortes qui ont tendance à assurer la cohésion du noyau.

Instabilité du noyau.

Sous l'action des différentes forces en présence, certains noyaux sont stables (ils ont une durée de vie considérée comme infinie à l'échelle géologique) et d'autres sont instables (ils se détruisent spontanément au bout d'une durée plus ou moins grande à la même échelle).

21.3 masse - énergie

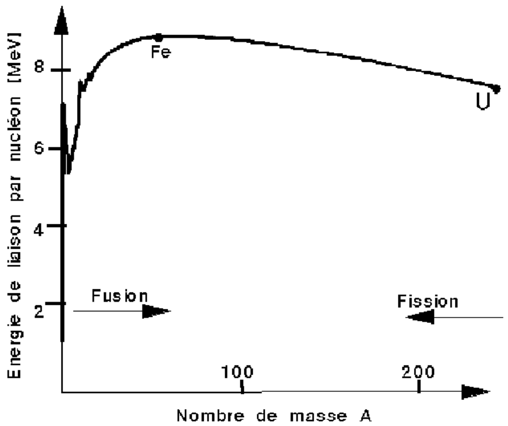
L’existence de noyau stable signifie que les nucléons sont dans un état lié. Puisque les protons dans un noyau sont soumis à une forte répulsion électrique, il doit exister une attraction encore plus forte qui les maintient ensemble et assure la cohésion du noyau. La force nucléaire est une interaction de courte portée qui ne s’étend que jusqu’à 2 [fm] environ. La force nucléaire a la caractéristique importante d’être essentiellement la même pour tous les nucléons, quelle que soit leur charge.

La masse d'un noyau stable est toujours inférieure à la somme des masses de ses nucléons d'une certaine quantité Δm, qu'on nomme défaut de masse. Si on veut séparer complètement les nucléons d'un noyau stable, il faut fournir au noyau une quantité minimale d'énergie, appelée énergie de liaison. Il s'agit tout simplement de l'équivalent en énergie du défaut de masse ; on a :

$E = \Delta mc^2$

où c est la vitesse de la lumière ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

La courbe ci-dessous indique l'énergie de liaison par nucléon en Mev en fonction du nombre de masse. Elle indique que le fer est le plus stable de tous les noyaux atomiques. Cela nous donne de précieux indices sur la façon dont on pourrait tenter de transformer les noyaux pour en retirer de l'énergie. L'ajout de nucléons (fusion) à un noyau plus petit que le fer de même que l'élimination (fission) de nucléons d'un noyau plus gros que le fer devrait donner un noyau plus stable que le noyau de départ et devrait donc, en principe, libérer de l'énergie.



<u>formule supplémentaire</u> :

Les noyaux des atomes sont à peu près sphériques et leur rayon est donné par la formule suivante :

$R = 1.2A^{1/3}$ [fm]

avec

R : rayon du noyau de l'atome en [fm]
A : nombre de masse

Exercice 1

Calculer le rayon des noyaux suivants : $^{16}_{8}O$; $^{56}_{26}Fe$; $^{238}_{92}U$
rép : 3.02 [fm] ; 4.59 [fm] ; 7.44 [fm]

Exercice 2

Quelle est la masse volumique d'une étoile à neutrons ayant un rayon de 10 km et une masse égale à celle du soleil ?
rép : $4.75 \cdot 10^{17}$ [kg/ m^3]

Exercice 3

Calculer l'énergie de liaison moyenne par nucléon des noyaux suivants : ${}^{40}_{20}Ca$; ${}^{197}_{79}Au$
rép : 8.55 [MeV] ; 7.92 [MeV]

Exercice 4

Quelle est l'énergie requise pour enlever un neutron au ${}^{7}_{3}Li$?
rép : 7.25 [MeV]

Module 22. Physique nucléaire (partie 2)

22.1 radioactivités alpha, bêta et gamma

Un noyau radioactif est un noyau instable dont la désintégration (destruction) est aléatoire et s'accompagne de:

- L'apparition d'un nouveau noyau,
- L'émission d'une particule notée α, β^- ou β^+,
- L'émission d'un rayonnement électromagnétique noté γ. Cette émission de rayonnement γ n'est pas systématique mais extrêmement fréquente.

La radioactivité est une réaction dite nucléaire car elle concerne le noyau de l'atome par opposition aux réactions chimiques qui ne concernent que le cortège électronique sans modifier le noyau.

La désintégration radioactive est:

- Aléatoire: Il est impossible de prévoir l'instant où va se produire la désintégration d'un noyau radioactif,
- Spontanée: La désintégration se produit sans aucune intervention extérieure,
- Inéluctable: Un noyau radioactif se désintégrera tôt ou tard,
- Indépendante de la combinaison chimique dont le noyau radioactif fait partie,
- Indépendante des paramètres extérieurs tels que la pression ou la température.

<u>Les divers types de radioactivités.</u>

<u>1. Lois de conservation.</u>

Les réactions de désintégration nucléaires obéissent à un certain nombre de lois. Cette année, par souci de simplification, nous n'en utiliserons que deux, dites lois de **Soddy**.

> Lors d'une désintégration radioactive α ou β il y a conservation du nombre de charge Z et du nombre de nucléons A.

Considérons la désintégration d'un noyau X (appelé noyau père). Cette désintégration conduit à un noyau Y (appelé noyau fils) et à l'expulsion d'une particule α ou β). L'équation de la désintégration s'écrit :

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A'}_{Z'}Y + {}^{A''}_{Z''}P $$

Les lois de conservation de Soddy imposent alors:

- Loi de conservation du nombre de nucléons A: $A = A' + A''$.
- Loi de conservation du nombre de charges Z: $Z = Z' + Z''$.

2. Radioactivité α.

1. Définition.

Des noyaux sont dits radioactifs α s'ils expulsent des noyaux d'hélium ${}^{4}_{2}He$, appelées particule α. Ce type de désintégration a lieu pour des noyaux lourds pour lesquels la somme du nombre de protons et neutrons dépasse 150.

2. Equation de la réaction de désintégration α.

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit:

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

Par exemple, l'uranium 238 est un radionucléide α. Son équation de désintégration s'écrit:

$${}^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

le noyau fils obtenu est un noyau de thorium.

3. Caractéristiques de la particule α.

Ces particules sont expulsées avec des vitesses relativement modestes et sont arrêtées par quelques centimètres d'air ou par une feuille de papier, mais elles sont très ionisantes et donc dangereuses.

4. Position du noyau fils dans le tableau périodique des éléments.

Si Z est le numéro atomique du noyau père, le numéro atomique du noyau fils est Z-2. Le noyau fils se trouve donc deux cases avant le noyau père dans le tableau périodique des éléments.

3. Radioactivité β^-.

1.Définition.

Des noyaux sont dits radioactifs β^- s'ils émettent des électrons notés ${}^{0}_{-1}e$, appelées particules β^-.
On notera cette situation étrange où un électron qui, à priori, n'existe pas dans le noyau, est tout de même expulsé du noyau. Cet électron ne peut provenir que de la transformation d'un nucléon.

2. Equation de la réaction de désintégration.

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit: ${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$

par exemple, le cobalt 60 est un radionucléide β^-. Son équation de désintégration s'écrit:

$${}^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e$$

3. Origine de l'électron expulsé.

Les radionucléides β^- sont des radionucléides qui possèdent trop de neutrons par rapport aux nucléides stables de même nombre de masse A.
la transformation de ce neutron excédentaire produit un électron suivant le bilan:

$${}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$$

Il apparaît aussi un proton. Z=27 dans le cobalt devient Z'=28 dans le nickel. Globalement Z augmente d'une unité et N diminue d'une unité. Alors A reste constant.

4. Caractéristiques de la particule β^-.

Les particules β^- sont assez peu pénétrantes. Elles sont arrêtées par quelques millimètres d'aluminium.

5. Position du noyau fils dans le tableau périodique des éléments.

Si Z est le numéro atomique du noyau père, le numéro atomique du noyau fils est Z+1. Le noyau fils se trouve donc dans la case qui suit celle du père dans le tableau périodique des éléments.

4. Radioactivité β^+ .

1. Remarque.

Cette radioactivité ne concerne que des noyaux artificiels, c'est-à-dire des noyaux engendrés par des réactions nucléaires réalisées par l'homme.

2. Définition.

Des noyaux sont dits radioactifs β^+ s'ils émettent des positrons ${}^{0}_{+1}e$.
Ce sont des particules portant une charge +e.
On notera cette situation étrange où un positron qui, à priori, n'existe pas dans le

noyau, est tout de même expulsé du noyau. Ce positron ne peut provenir que de la transformation d'un nucléon.

3. Equation de la désintégration.

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit:

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e$$

par exemple, le phosphore 30 est un radioémetteur β^+. Son équation de désintégration est:

$$^{30}_{15}P \longrightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{+1}e$$

4. Origine du positron expulsé.

Les radionucléides β^+ sont des radionucléides qui possèdent trop de protons par rapport aux nucléides stables de même nombre de masse A.
La transformation de ce proton excédentaire produit un positron suivant le bilan:

$$^{1}_{1}p \longrightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e$$

Il apparaît aussi un neutron. Z=15 dans le phosphore devient Z'=14 dans le silicium. Globalement N augmente d'une unité et Z diminue d'une unité. Alors A reste constant.

5. Caractéristique de la particule β^+.

Ces particules ont une durée de vie très courte. Lorsqu'elle rencontrent un électron, les deux particules s'annihilent pour donner de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique γ suivant le bilan:

$$^{0}_{-1}e + {}^{0}_{+1}e \longrightarrow \gamma$$

6. Position du noyau fils dans le tableau périodique des éléments.

Si Z est le numéro atomique du noyau père, le numéro atomique du noyau fils est Z-1. Le noyau fils se trouve donc dans la case qui précède celle du père dans le tableau périodique des éléments.

5. Désexcitation γ.

Les rayons γ sont un rayonnement électromagnétique comme les ondes radio ou la lumière. Ce type de désintégration ne modifie ni le nombre de masse ni le numéro atomique de l'atome qui les émet. Les rayons γ sont très pénétrants. Pour les absorber, il faut disposer d'un écran massif épais de plusieurs millimètres de plomb par exemple ou de plusieurs dizaines de centimètres de béton.

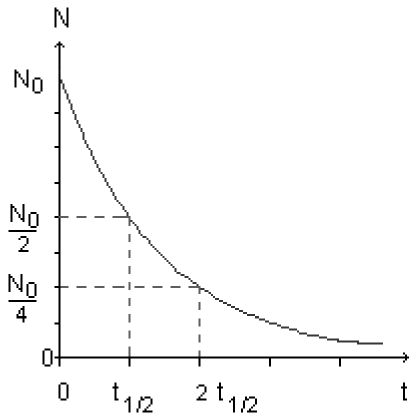
22.2 décroissance radioactive

1. Décroissance exponentielle.

Il n'est pas possible de prévoir l'instant où le noyau d'un atome va se désintégrer. Le phénomène de désintégration est aléatoire.

Si à l'instant t = 0 existent N_0 atomes susceptibles de se désintégrer, le nombre d'atomes non désintégrés N(t), à l'instant quelconque t, est donné par :

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$



Il faut bien comprendre que:

- N représente le nombre de noyaux radioactifs encore présents (non désintégrés) à l'instant t dans l'échantillon.
- N_0 représente le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à l'instant initial t=0.
- λ est la constante radioactive du radioélément considéré.
- t est le temps écoulé depuis l'instant initial.

2. Demi-vie radioactive.

1. Remarque.

Dans l'expression $N=N_0e^{-\lambda t}$, le coefficient de t est négatif. N est une fonction décroissante du temps (il reste de moins en moins de noyaux radioactifs dans l'échantillon). Mais les propriétés de la fonction exponentielle font que N tend vers 0 lorsque t tend vers l'infini. En principe il reste donc toujours des noyaux radioactifs dans l'échantillon.

Plus la constante radioactive λ est grande, plus la décroissance est rapide.

On peut comparer les décroissances des populations de radionucléides en comparant leurs demi-vies radioactives.

2. Définition.

La demi-vie radioactive, notée $t_{1/2}$, d'un échantillon de noyaux radioactifs est égale à la durée nécessaire pour que, statistiquement, la moitié des noyaux radioactifs présents dans l'échantillon se désintègrent (voir la courbe de décroissance plus haut). On a donc:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t_{1/2} \Rightarrow \ln(2^{-1}) = -\lambda t_{1/2}$$

$$\Rightarrow -\ln(2) = -\lambda t_{\frac{1}{2}} \Longrightarrow \lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

on en tire : $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$

V. Activité d'une source radioactive.

1. Définition.

L'activité A d'une source radioactive est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde dans l'échantillon. Elle s'exprime en becquerels dont le symbole est Bq (1Bq=1 désintégration par seconde).

Le curie (Ci) est une autre unité de mesure d'activité utilisée. Il correspond à l'activité de 1,0 g de radium et vaut $3{,}7.10^{10}$Bq.

2. Expression de l'activité.

A pourra être notée:

$A = \lambda N$

l'activité suit la même loi de décroissance exponentielle que N :

$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$

3. Datation archéologique par la méthode du carbone 14.

Le carbone 14 dont la demi-vie est de 5730 ans est constamment produit dans l'environnement sous l'effet des particules cosmiques qui interagissent avec les noyaux atomiques de la haute atmosphère en produisant des neutrons. Le radiocarbone ou carbone 14 se mélange entièrement au carbone ordinaire présent dans l'environnement et est absorbé par tous les organismes vivants. Une fois qu'un organisme meurt, l'absorption de carbone cesse et le rapport du radiocarbone au carbone ordinaire décroît progressivement à cause de la désintégration du carbone 14. La mesure de ce rapport s'avère cependant assez difficile à cause des fluctuations de la proportion de radiocarbone atmosphérique : elle a diminué de 3% au cours du siècle passé puis a doublé vers 1963 à cause des essais de bombes H dans l'atmosphère.

4. Dangerosité et effets biologiques.

1. Dangerosité et demi-vie.

On admettra que plus l'activité d'une source est grande, plus elle est dangereuse. Or d'après ce qui précède:

$A = \lambda N$ et $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ => $A = \frac{N \cdot \ln 2}{t_{1/2}}$

Il apparaît donc q'une source radioactive est d'autant plus active, donc dangereuse, qu'elle comporte un grand nombre de noyaux radioactifs et que sa demi-vie est courte.

2. Effets biologiques.

L'action sur les tissus vivants dépend de plusieurs paramètres:

- Du nombre de particules reçues par seconde. Ce nombre dépend de l'activité de la source et de son éloignement.
- De l'énergie et de la nature des particules émises et donc reçues.

- Du fractionnement de la dose reçue.
- De la nature des tissus touchés.

Les particules ionisantes et le rayonnement γ sont capables de provoquer des réactions chimiques et des modifications dans la structure des molécules constituant la matière vivante. En particulier, ils peuvent induire des mutations génétiques lorsque l'ADN se trouve modifié.

Exercice 1

On utilise l'isotope radioactif $^{60}_{27}Co$ dans le traitement des tumeurs. Il subit une désintégration β^- avec une demi-vie de 5.25 ans. Quel est le taux de désintégration initial (activité) d'un échantillon de 0.01 g ?
Rép. $4.2 \cdot 10^{11}$ Bq

Exercice 2

Le radon $^{222}_{86}Rn$ est un gaz de désintégration ayant une demi-vie de 3.82 jours. Si le taux initial (activité) est de 320 Bq dans un échantillon, combien reste-t-il de noyaux de radon au bout de 1 jour ?
Rép $1.27 \cdot 10^{8}$

Exercice 3

Un os ancien contient 80 g de carbone et a un taux de désintégration (activité) de 0.75 Bq. Quel est son âge ? On suppose que le rapport des isotopes dans l'atmosphère est $^{14}C/^{12}C = 1.3 \cdot 10^{-12}$ et qu'il est resté constant. La demi-vie du carbone est de 5730 ans.
Rép. $2.59 \cdot 10^{4}$ a

Exercice 4

Une certaine substance radioactive dont la demi-vie est de 10 s émet $2 \cdot 10^{7}$ particules α par seconde.
a) Calculer la constante de désintégration de cet isotope.
b) Calculer l'activité de cette substance en Bq et en Ci.
c) Combien y a-t-il de noyaux radioactifs dans cette substance ?
d) Combien en restera-t-il 30 secondes plus tard ?
Rép. 0.0693 s^{-1} ; $2 \cdot 10^{7}$ Bq ou $5.4 \cdot 10^{-4}$ Ci ; $2.8 \cdot 10^{8}$; $3.6 \cdot 10^{7}$

Module 23. Physique nucléaire (partie 3)

23.1 fission nucléaire

La fission de l'Uranium 235

Un peu d'histoire

En 1932, James Chadwick découvrit le neutron. Quelques années plus tard, Enrico Fermi montra que si l'on bombardait différents éléments par des neutrons, on produisait de nouveaux éléments radioactifs. Fermi avait prédit que le neutron, particule non chargée (ne recevant pas de force électrique du noyau quand il s'approche) serait un projectile très intéressant.
En 1939, Otto Hahn et Fritz Strassman, bombardent des solutions de sels d'uranium par des neutrons. Ils mettent en évidence par analyse chimique de nouveux éléments radioactifs (dont du baryum). Quelques semaines plus tard, Lise Meisner et Otto Frisch montrent qu'un atome d'uranium ayant reçu un neutron peut se scinder, en libérant de l'énergie, en deux parts grossièrement égales (dont une serait du baryum). Frisch appela ce processus "la fission".

Un peu de physique

Dans le cas d'une fission typique d'Uranium 235, un noyau de U-235 absorbe un neutron thermique, produisant un noyau de U-236 dans un état très excité (instable). C'est *ce noyau* et non celui de U-235 qui va subir la fission et former deux fragments. Ces fragments, émettent 2 neutrons, laissant du Xe-140 et du Sr-94 comme fragments de fission. La réaction de fission globale est donc :

$$^{235}U + n \rightarrow {}^{236}U^* \rightarrow {}^{140}Xe + {}^{94}Sr + 2n$$

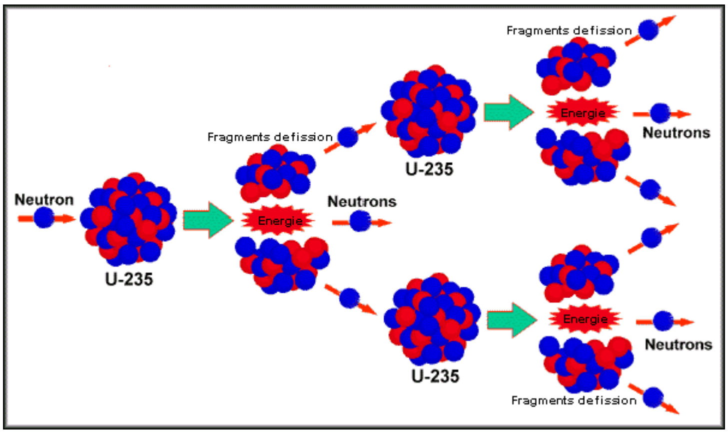
Ces fragments Xe-140 et Sr-94 sont très instables et sont émetteurs béta (émission d'un électron) jusqu'à ce qu'ils forment un produit stable.
En utilisant la courbe d'énergie de cohésion nucléaire, on peut estimer l'énergie libérée dans un processus de fission. D'après cette courbe, on peut voir que pour les nucléides lourds (masse d'environ 240 uma), l'énergie moyenne de cohésion par nucléon est d'environ 7,6 MeV. Pour les nucléides de masse moyenne (masse d'environ 120 uma), elle est d'environ 8,5 MeV. Cette différence énergie de cohésion totale entre un seul noyau lourd et 2 fragments (considérés comme égaux) issus de sa fission est donc :

$$\Delta E = 2 * (8.5\,MeV) * \left(\frac{200u}{2}\right) - 7.6\,MeV * (200u) \approx 200\,MeV$$

C'est une quantité d'énergie libérée relativement importante par fission élémentaire.

La bombe atomique

Dans une réaction en chaîne, de nombreux atomes et noyaux sont concernés et une grande quantité d'énergie est libérée.
Si un noyau U-235 se scinde, il libère de l'énergie sous la forme de chaleur et de rayons γ qui est la forme la plus énergétique de radioactivité et la plus mortelle.
Quand la réaction se produit, l'atome clivé fournit 2 ou 3 de ses neutrons excédentaires qui ne sont plus nécessaires aux fragments formés dans la fission. Ces neutrons sont éjectés avec une force suffisamment grande pour provoquer la fission d'autres noyaux U-235.
En théorie, il est seulement nécessaire de scinder un noyau U-235 et ses neutrons vont scinder d'autres noyaux qui vont scinder d'autres noyaux et ainsi de suite. C'est une progression de type géométrique qui se produit en un millionième de seconde.
L'uranium n'est pas le seul atome utilisé pour les bombes atomiques. On utilise aussi le plutonium Pu-239; cependant le plutonium ne peut démarrer lui-même une réaction en chaîne, il est généralement associé à un détonateur puissant qui amorce la réaction en chaîne.

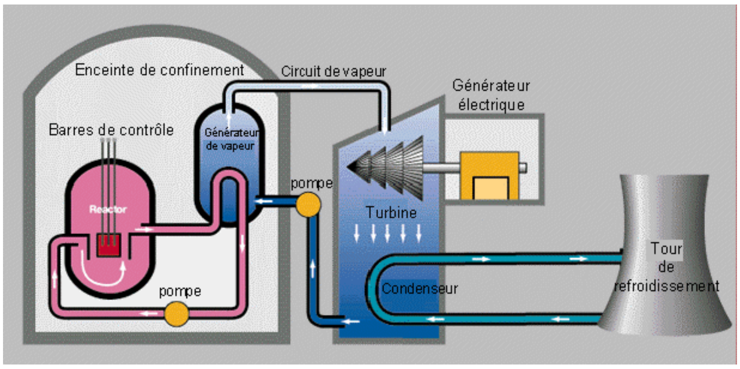


La fission dans les réacteurs nucléaires

Pour utiliser à grande échelle cette énergie libérée par la fission, une fission doit en provoquer une autre si bien que le processus s'étend comme dans un jeu de dominos. Le fait qu'il y ait plus de neutrons produits par la fission que de neutrons consommés permet de créer une réaction en chaîne. Cette réaction peut être soit :

* rapide (comme dans une bombe atomique)
* ou contrôlée (comme dans un réacteur).

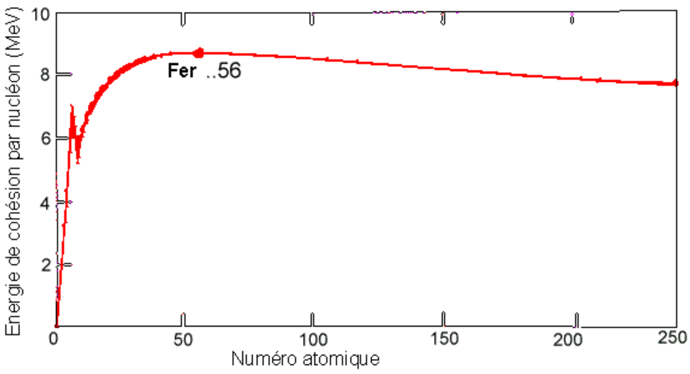
Dans un réacteur nucléaire, des barres de cadmium ou de graphite (ou d'un autre matériau absorbant les neutrons) sont utilisées pour réguler le nombre de neutrons. Cela contrôle le facteur de multiplication *k* qui est le rapport entre le nombre de neutrons présents au début d'une fission donnée au nombre de neutrons présents au début de la prochaine fission. Si k=1, le régime du réacteur est dit exactement *critique* ce que nous souhaitons pour un régime stationnaire de puissance. Les réacteurs sont construits pour être naturellement *supercritiques* (k>1); le facteur de multiplication est ensuite ajusté au régime critique en insérant les barres de contrôle.



Une des conséquences inévitables du fonctionnement du réacteur est l'accumulation de déchets radioactifs incluant des produits de fission et des noyaux transuraniens lourds comme le plutonium et l'americium.

Numéro atomique et énergie de cohésion du noyau
Energie de cohésion nucléaire

L'énergie totale nécessaire pour casser un noyau en ses constituants protons et neutrons peut-être calculée à partir de $E = \Delta mc^2$. Si nous divisons l'énergie cohésion d'un noyau par le nombre de protons et de neutrons (nombre de nucléons), nous obtenons l'énergie de cohésion par nucléon. La figure suivante montre la variation de l'énergie de cohésion du noyau par nucléon en fonction du numéro atomique.



Le point rouge correspond au cas du fer (Z=56).

L'abaissement de la courbe d'énergie de cohésion pour les numéros atomiques élevés nous montre que les nucléons sont liés plus fortement quand ils font partie de nucléides de masse moyenne que s'ils appartiennent à un seul noyau de fort numéro atomique. En d'autres termes, de l'énergie peut être libérée par la fission d'un noyau lourd en deux noyaux plus petits.

La remontée de la courbe aux faibles numéros atomiques nous montre que au contraire, de l'énergie peut être libérée si deux noyaux légers (faible numéro atomique) se combinent pour former un seul noyau de masse moyenne : c'est la *fusion nucléaire*.

Masses nucléaires

Les masses nucléaires peuvent changer au cours des réactions en raison de la conversion de la masse perdue en énergie. Par exemple, la combinaison d'un proton (p) et d'un neutron (n), produira un deuteron (d). Si nous ajoutons les masses du proton et du neutron, nous obtenons :

$$m_p + m_n = 1.00728u + 1.00867u = 2.01595u$$

La masse du deuteron est $m_d = 2.01355u$
Donc la variation de masse est = $(m_p + m_n) - m_d = (1.00728u + 1.00867u) - (2.01355u) = 0.00240u$

Une unité de masse atomique (u) est égale au 1/12ème de la masse du Carbone C-12 qui est environ 1.66×10^{-27} kg. Donc en utilisant $E=mc^2$ cela nous donne une énergie par unité de masse atomique =

$(1.66 \times 10^{-27}\text{ kg})(3.00 \times 10^{8}\text{ m/s})^2 = 1.494 \times 10^{-10}$ J = environ 931 MeV/u.

(rappel : 1 MeV=1.6×10^{-13} J)

Notre résultat final est :

$$\Delta E = \Delta mc^2 = (0.00240u)\cdot(931\,{}^{\text{MeV}}\!/_{\text{u}}) = 2.24\text{MeV}$$

La quantité 2.24 MeV est l'énergie de cohésion du deuteron.

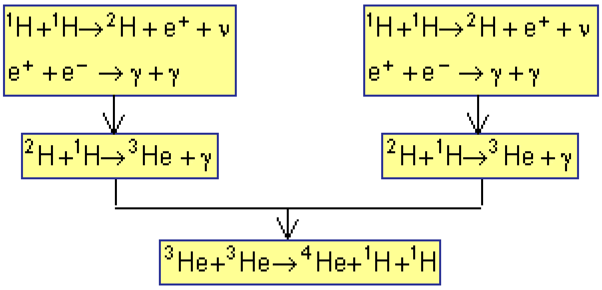
23.2 fusion nucléaire

La Physique de la fusion nucléaire

La courbe d'énergie de cohésion nucléaire montre que de l'énergie peut être libérée si deux noyaux légers se combinent pour former un noyau unique plus gros. Ce processus est appelé *la fusion nucléaire*. Il est empêché par la répulsion électrique qui s'exerce sur les deux particules qui ne peuvent s'approcher l'une de l'autre pour fusionner.
Pour créer une quantité d'énergie utilisable, la fusion nucléaire doit se produire dans un matériau dense pour que suffisamment d'atomes puissent fusionner et fournir une quantité d'énergie significative. La meilleure chance d'y arriver est d'élever la température du matériau pour que les particules atteignent une énergie suffisante (due à l'agitation thermique) pour vaincre la barrière de répulsion électrique. Ce procédé est appelé *la fusion thermonucléaire*. Les calculs montrent que ces températures doivent être de l'ordre de celle du soleil ($1.5\ 10^{7}$K.)

La fusion thermonucléaire dans le Soleil et les autres étoiles

Le soleil rayonne une énergie de 3.9 10^{26} W (watts) depuis des milliards d'années. Le soleil brûle de l'hydrogène dans un four nucléaire. La réaction de fusion dans le soleil est un processus en plusieurs étapes dans lequel l'hydrogène est brulé pour donner de l'hélium comme le montre la figure.



Le cycle commence par la collision de 2 protons (^1H + ^1H) pour former un deuteron (^2H), avec la création simultanée d'un positron (e^+) et d'un neutrino (ν). Le positron rencontre très rapidement un électron libre (e^-) et les 2 particules s'annihilent, l'énergie de leur masse se manifestant sous la forme de 2 photons gamma (γ). Dès que le deuteron a été produit, il collisionne rapidement un autre proton et forme un noyau ^3He et un photon γ. Deux de ces noyaux ^3He peuvent se rencontrer comme la ligne du bas le montre. A la fin, cela conduit à la combinaison de 4 protons et 2 électrons pour former une particule alpha (α, ^4He), 2 neutrinos et 6 photons γ. Ainsi, l'équation finale est :

$$4\,^1H + 2e^- \rightarrow ^4He + 2\nu + 6\gamma$$

L'énergie libérée dans cette réaction est :

$$\Delta E = \Delta mc^2 = \left[4 \cdot (1.007825u) - 4.002603u\right] \cdot (931\,{}^{MeV}\!/_{u}) = 26.7 MeV$$

où *1.007825 u* est la masse d'un atome d'hydrogène et *4.002603 u* celle d'un atome d'hélium; les neutrinos et les photons γ n'ont pas de masse, ils n'interviennent donc pas dans le calcul de l'énergie produite.
La fusion de l'hydrogène sur le soleil dure depuis environ 5 milliards d'années et les calculs indiquent qu'il y a encore assez d'hydrogène pour que cela continue pendant une durée équivalente.

La fusion sur Terre

La première réaction de fusion thermonucléaire fut réalisée par les Etats Unis sur l'atoll d'Eniwetok le 31 Octobre 1952 (bombe H - énergie libérée équivalente à 10 millions de tonnes de TNT). La haute température nécessaire pour initier la fusion fut obtenue par l'explosion d'une bombe à fission nucléaire (bombe A).
Une source d'énergie utilisant la fusion (un réacteur de fusion) est très difficile à réaliser. Cet objectif est cependant poursuivi très activement par de nombreux pays en raison de l'intérêt présenté par un réacteur de fusion pour la production d'énergie électrique.
Les 3 conditions pour réaliser un tel réacteur de fusion thermonucléaire sont :

- **Une forte densité de particule.** La densité des particules en intéraction doit être assez forte pour garantir que le taux de collisions est élevé.

- **Une haute température du plasma.** Le plasma doit être "chaud", sinon la vitesse des particules ne serait pas assez élevée pour permettre de franchir la barrière de répulsion électrostatique.
- **Un temps de confinement long.** Un problème essentiel est de conserver le plasma chaud assez longtemps pour permettre que sa densité et sa température restent assez élevés pour qu'une quantité suffisante du combustible fusionne. Il est évident qu'aucun container n'est capable de supporter de telles températures, ce qui conduit à rechercher des techniques de confinement sans contacts.

Réalisations possibles sur Terre

- **Le Tokamak**

Le Tokamak est un instrument de fusion thermonucléaire d'abord développé en URSS. De grands tokamaks ont été construits et ont fonctionné dans plusieurs pays (France, Japon, Grande Bretagne) et plusieurs nouvelles machines sont en cours de construction.
Dans un tokamak, les particules chargées qui constituent le plasma chaud sont confinées par un champ magnétique à l'intérieur d'un tore. Les forces magnétiques agissant sur les particules en déplacement du plasma empêchent le plasma de toucher les parois de la chambre. Le courant qui génère le champ magnétique est induit dans le plasma lui-même et le chauffe en même temps.
Cependant, une réaction thermonucléaire *auto-entretenue* n'a pu encore être obtenue (réaction qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme).
En dépit des progrès rapides, des problèmes techniques considérables restent à résoudre et il est probable qu'il faudra attendre les années 2010-2020 pour voir un réacteur thermonucléaire industriel en fonctionnement.

- **La fusion laser**

Une seconde technique de confinement du plasma est appelée le *confinement inertiel*. Il suppose la compression d'un grain de combustible par balayage de toute sa surface par des faisceaux lasers, pour que la compression et l'augmentation de sa température et de la densité de particule conduise à la fusion thermonucléaire. En comparaison du tokamak, le confinement inertiel amène à travailler avec de plus fortes densités de particules pendant des temps plus courts.
La fusion par laser est étudiée dans un certain nombre de laboratoires aux Etats Unis. Au Lawrence Livermore Laboratory, les pulses lasers sont prévus pour délivrer, au total, quelque 200kJ en moins d'une nanoseconde sur chaque grain de combustible. C'est une puissance délivrée d'environ $2\ 10^{14}$ W durant le pulse; c'est en gros 100 fois la capacité de puissance électrique mondiale.
La faisabilité de la fusion thermonucléaire par fusion laser n'a pas encore été démontrée mais la recherche se poursuit activement.

Exercice 1

En supposant que toute l'énergie libérée par la fission de chaque noyau $^{235}_{92}U$ (190 MeV) est absorbée par l'eau, combien d'atomes $^{235}_{92}U$ doivent subir une fission pour élever de 1°C la température de 1 g d'eau ?
Rép. $1.38 \cdot 10^{11}$

Exercice 2

Une réaction de fusion D-D libère 4.03 MeV. Le rapport de concentration du deutérium à l'hydrogène est de 1/6500 dans l'eau de mer. Quelle est l'énergie de fusion disponible dans 1 kg d'eau de mer ?
Rép. $3.3 \cdot 10^{9}$ J

Exercice 3

L'énergie libérée pendant la fission d'un noyau ^{235}U est à peu près de 200 Mev.

a) Combien de noyaux sont nécessaires pour produire une explosion équivalant à 20 kilotonnes de TNT ? L'énergie associée à l'explosion d'une tonne de TNT est de $4.18 \cdot 10^{9}$ J.
b) Quelle est la masse de ^{235}U nécessaire ?

Rép. $2.61 \cdot 10^{24}$; 1.02 kg