

Chapitre 43. Notions générales de cinématique et mouvements rectilignes

Le rôle de la cinématique est de décrire les mouvements des corps dans l'espace et dans le temps, sans faire intervenir les causes (les forces) qui déterminent ces mouvements.

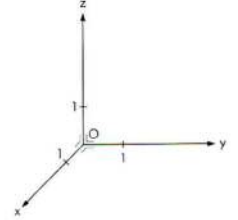
Chapitres avancés



1 Référentiel et trajectoire

Point matériel

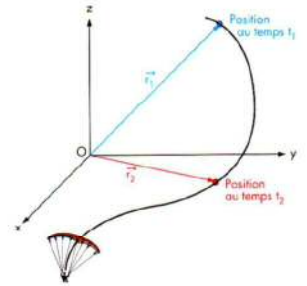
Un corps occupe un certain volume dans l'espace. On modélise cette réalité en supposant que toute la matière constituant ce corps est concentrée en un point: son centre de masse ou centre de gravité ou barycentre. Un corps ainsi idéalisé est un point matériel.



Référentiel orthonormé.

Référentiel

Deux personnes à des endroits différents peuvent avoir des avis différents sur la position du même arbre: la première peut dire que l'arbre se trouve sur sa gauche et la seconde que l'arbre se trouve sur sa droite. Pour définir la position d'un point matériel, il est donc nécessaire de connaître le lieu d'où on l'observe. On appelle cet endroit le référentiel.



Trajectoire

La trajectoire d'un point matériel est l'ensemble des positions de l'espace occupées successivement par ce point matériel au cours du temps. Si un objet qui se déplace laisse une trace de son passage, la ligne formée par cette trace représente la trajectoire: skis sur la neige, balle mouillée sur le sol, patins sur la glace, ...

La trajectoire rectiligne

On frappe une boule de billard (sans lui donner d'effet). Si l'on marque les positions successives (1, 2, 3, ...) de la boule à intervalles de temps réguliers, on obtient un tracé de ce type:



La ligne qui relie les positions successives de la boule est une droite: la trajectoire est rectiligne. De plus, les positions successives de la boule sont régulièrement espacées: la boule suit un mouvement rectiligne uniforme (MRU).

Si on laisse rouler une boule de billard sur une table inclinée, on obtient un tracé de ce type:



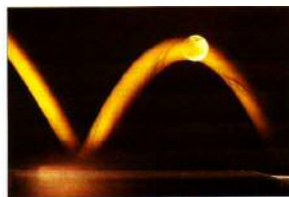
La trajectoire est rectiligne, mais les positions successives sont de plus en plus espacées. La boule suit dans ce cas un mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA).

La trajectoire circulaire

L'extrémité de la pale d'un ventilateur de plafond parcourt une trajectoire dont le tracé est de ce type:



La ligne qui relie les positions successives est un cercle: la trajectoire est circulaire. Ce tracé est celui d'un mouvement circulaire uniforme (MCU).



Un autre type de trajectoire: le rebond d'une balle.

Relativité de la trajectoire

La description de la trajectoire d'un mobile dépend du référentiel dans lequel se trouve l'observateur. Observons un enfant, dans un train en marche (à vitesse constante et en ligne droite); il lance une balle en l'air pour ensuite la recevoir à nouveau dans sa main.

Pour les observateurs dans le train, la trajectoire de la balle durant son ascension est rectiligne:



Pour un observateur arrêté à côté du train qui passe, cette trajectoire est parabolique:



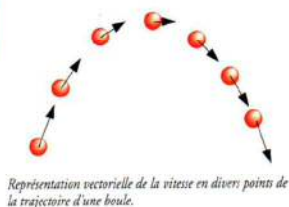
Remarque

Lorsqu'on étudie les phénomènes à l'échelle atomique (par exemple le mouvement d'un électron autour du noyau), il est impossible de définir sa trajectoire. La physique quantique permet au mieux de dire qu'il y a une certaine probabilité pour trouver l'électron dans le voisinage d'une position donnée. Le modèle des électrons se déplaçant autour du noyau sur des orbites bien définies est dépassé.

2 Notion de vitesse

Dans un bulletin météo, il n'est pas suffisant d'annoncer pour le lendemain un vent soufflant à 50 km/h. Il est nécessaire d'indiquer aussi sa *direction* et son *sens*: par exemple vent d'ouest à 50 km/h.

La vitesse doit être représentée par un vecteur.



Représentation vectorielle de la vitesse en divers points de la trajectoire d'une balle.

Vitesse moyenne

À l'issue d'une étape du Tour de France cycliste, on indique la vitesse moyenne du vainqueur bien que sa vitesse ait changé souvent durant l'étape (il a roulé plus vite dans les descentes que dans les montées).

La vitesse moyenne est la vitesse qu'une moto (par exemple) devrait conserver durant tout le parcours pour accomplir le trajet dans le même temps que le vainqueur de l'étape.

La vitesse moyenne se calcule dans les applications quotidiennes par :

$$\text{vitesse moyenne} = \frac{\text{distance totale parcourue}}{\text{durée du parcours}}$$

$$v_{\text{moy}} = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Cette mesure s'exprime dans les applications de la vie courante en kilomètres/heure. S'il nous a fallu 5 heures pour accomplir les 400 km jusqu'à notre lieu de vacances, notre vitesse moyenne était de 80 km/h. Dans les unités du système international, elle s'exprime en m/s (mètre par seconde).

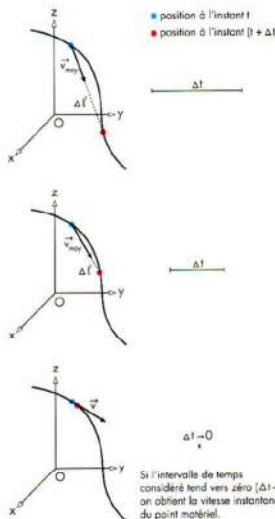
Remarque

On préfère l'abréviation Δt pour indiquer un intervalle de temps ou une durée plutôt que l'abréviation t qui indique un instant donné, une date.

Vitesse instantanée

Le compteur de vitesse d'une voiture indique l'intensité de la vitesse de la voiture à l'instant où la valeur est affichée. Il s'agit de la vitesse *instantanée*.

Valeur de quelques vitesses en [m·s ⁻¹]:	
Marche	1,4
Course (100m)	10
Vélo (record de l'heure de Rominger)	15,36
Avion de ligne	250
Son dans l'air	340
Lumière dans le vide	300 000 000



On peut calculer la vitesse moyenne d'un mobile en choisissant différents intervalles de temps (vitesse moyenne pendant la première heure, pendant la première minute, ...). On constate que cette valeur change selon l'intervalle de temps choisi.

Pour un intervalle de temps suffisamment petit, on constate que la vitesse calculée ne varie pratiquement plus, même en diminuant encore cet intervalle. On parle alors de vitesse *instantanée*.

Le vecteur vitesse instantanée est en chaque point *tangent* à la trajectoire du mobile.



Tachygraphe.

Composition des vitesses

Il arrive qu'un mobile se déplace sur un « support » qui est lui-même en mouvement.

C'est le cas, par exemple, d'un bateau qui se déplace dans le courant d'un fleuve. Bien que le bateau soit orienté perpendiculairement à la rive, le courant le déporte constamment et sa trajectoire n'est pas perpendiculaire à la rive.

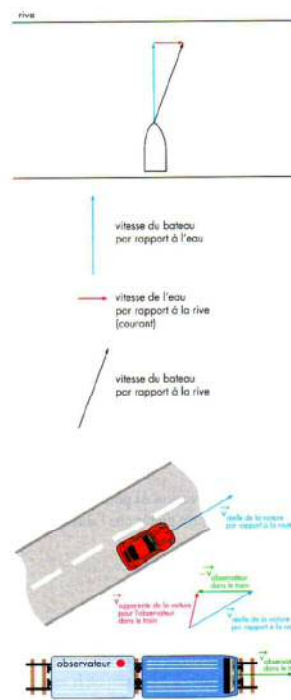
On détermine la vitesse du bateau par rapport à la rive (vitesse réelle) par addition vectorielle de la vitesse du bateau par rapport à l'eau et de la vitesse de l'eau par rapport à la rive.

Un observateur n'est pas forcément immobile. C'est le cas d'une personne dans un train en marche qui observe le mouvement d'une voiture sur une route qui passe sous les voies.

La vitesse « réelle » de la voiture a la direction de la route; son intensité est indiquée par le compteur de la voiture. C'est sa vitesse par rapport au sol.

Pour l'observateur dans le train, la vitesse « apparente » de la voiture se détermine de la façon suivante : on soustrait au vecteur représentant la vitesse « réelle » de la voiture (par rapport au sol) le vecteur représentant la vitesse du train (vitesse de l'observateur par rapport au sol).

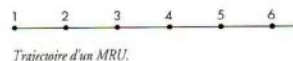
L'observateur voit la voiture se déplacer avec la vitesse apparente représentée en rouge sur le schéma.



3 Le mouvement rectiligne uniforme (MRU)

Définition

- Le mouvement d'un point matériel dans un référentiel donné est un mouvement rectiligne uniforme si sa trajectoire est une droite et si sa vitesse est constante.
- Puisque la vitesse ne change pas lors d'un tel mouvement, le vecteur *vitesse moyenne* est égal au vecteur *vitesse instantanée* à chaque instant; il est parallèle à la trajectoire.
- La valeur de la vitesse représente la distance que parcourt le mobile en 1 seconde.



Trajectoire d'un MRU.

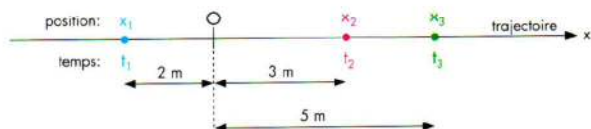
Exemples

- Un objet qui coule dans l'eau d'un lac, une goutte de pluie tombant dans l'air (en absence de vent).

Comment indiquer la position du mobile

Pour indiquer la position du mobile, on choisit un point fixe, noté O, sur sa trajectoire (un panneau de signalisation au bord d'une route rectiligne, un feu rouge, la ligne de départ d'une course, ...).

Le mobile (par exemple une pierre de curling) est représenté par un point coloré sur le schéma. Sa position est en chaque instant donnée par un nombre, noté x , qui est la distance du mobile mesurée depuis le point O: c'est la coordonnée du mobile selon l'axe des x . On lui donne un signe algébrique pour indiquer de quel côté de l'origine se trouve le mobile.



Si à l'instant t_1 , le mobile se trouve 2 m avant l'origine, on indique $x_1 = -2$ m

si à l'instant t_2 , le mobile se trouve 3 m après l'origine, on indique $x_2 = 3$ m

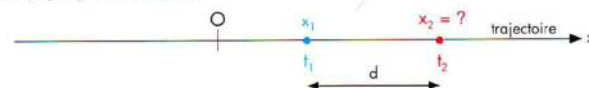
si à l'instant t_3 , le mobile se trouve 5 m après l'origine, on indique $x_3 = 5$ m

La distance d parcourue entre deux instants, par exemple entre t_2 et t_3 vaut: $d = x_3 - x_2$



Comment prévoir la position du mobile

Il est possible, si l'on connaît la vitesse v du mobile et sa position x_1 en un instant donné t_1 , de prévoir sa position x_2 à l'instant t_2 , quel que soit cet instant :



La distance d parcourue pendant l'intervalle de temps compris entre t_1 et t_2 vaut :

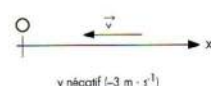
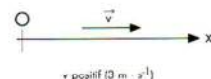
$$x_2 - x_1 = v \cdot (t_2 - t_1)$$

que l'on note aussi :

$$\Delta x = v \cdot \Delta t$$

Par conséquent l'équation du MRU s'écrit :

$$x_2 = v \cdot (t_2 - t_1) + x_1$$

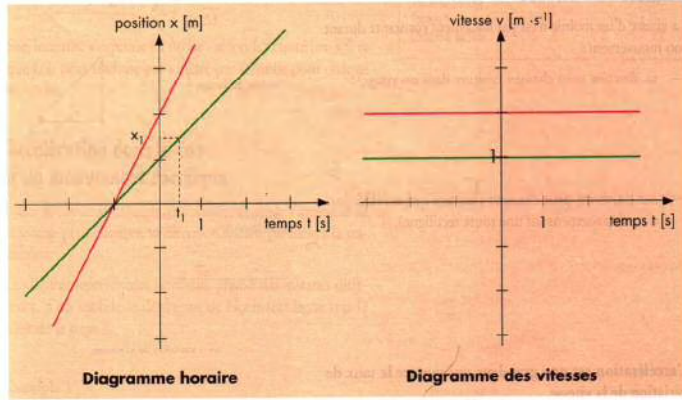


Orientation de la vitesse

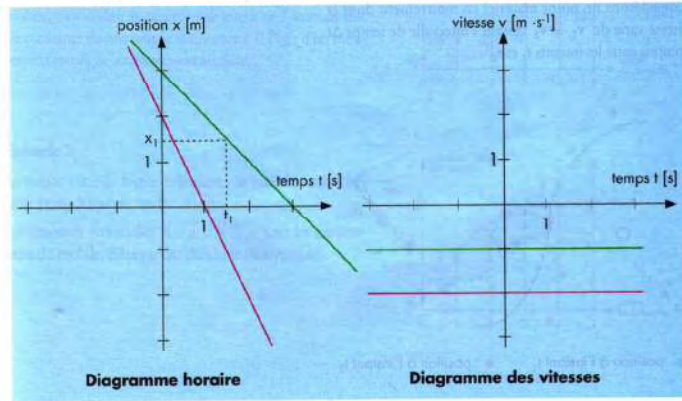
Si la vitesse du mobile est orientée dans le sens opposé à l'axe des x , le mobile se déplace dans le sens des « x décroissants ». On donne alors un signe négatif à la valeur de la vitesse.

Représentation graphique de la position et de la vitesse en fonction du temps

— Vitesses positives



— Vitesses négatives



L'accélération moyenne \vec{a}_{moy} du mobile durant l'intervalle de temps Δt est la quantité vectorielle définie à partir de la variation de vitesse $\Delta \vec{v}$ par :

$$\vec{a}_{\text{moy}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Son intensité s'exprime en mètre · seconde⁻², noté [m · s⁻²] et que l'on peut traduire par « mètre par seconde pour chaque seconde ».

Accélération dans le cas d'un mouvement rectiligne

Dans le cas d'un mouvement rectiligne, seule l'intensité de la vitesse peut changer, sa direction restant parallèle à la trajectoire.

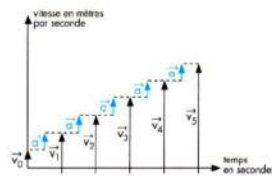
Les figures représentent la vitesse, prise à des instants différents, d'un mobile se déplaçant de façon rectiligne vers le haut de la page.

Exemple 1

La vitesse varie de façon régulière; pendant chaque seconde, elle varie de la même quantité \vec{a} .

La quantité vectorielle \vec{a} est par définition l'accélération du mobile, c'est-à-dire sa *variation de vitesse en 1 seconde*. Elle est constante durant tout le mouvement. Il s'agit d'un mouvement rectiligne *uniformément accéléré*.

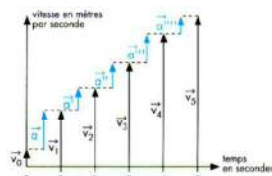
Valeur de quelques accélérations en [m·s ⁻²]:	
Course (départ d'un 100m)	12
Voiture	2 à 5
Voiture au freinage	-7 à -10
Formule 1	10 à 15
Chute libre sur Terre	9,8



Exemple 2

La vitesse varie de façon irrégulière; sa variation est différente pour chaque seconde : $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \dots$

Les quantités vectorielles $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \dots$ sont les accélérations du mobile. Elles varient durant le mouvement.

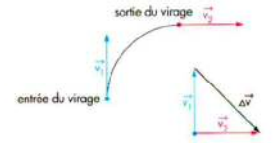


4 Accélération

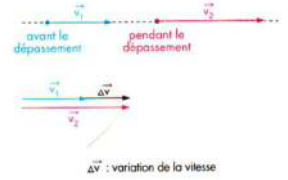
Variation de vitesse

La vitesse d'un mobile n'est pas forcément constante durant son mouvement :

— sa *direction* peut changer (voiture dans un virage);



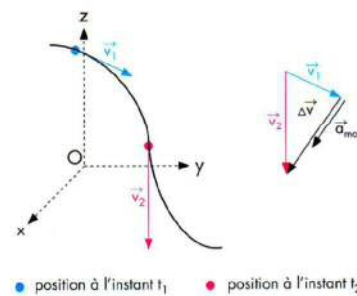
— son *intensité* peut changer (voiture qui accélère lors d'un dépassement sur une route rectiligne).



L'accélération est une grandeur qui mesure le taux de variation de la vitesse.

Accélération moyenne

Considérons un point matériel en mouvement dont la vitesse varie de \vec{v}_1 à \vec{v}_2 durant l'intervalle de temps Δt compris entre les instants t_1 et t_2 .



5 Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)



Trajectoire d'un MRUA.

Définition

- Le mouvement d'un point matériel dans un référentiel donné est un mouvement rectiligne uniformément accéléré si sa trajectoire est une droite et si son accélération est constante.
- L'accélération est parallèle à la trajectoire. Sa valeur indique la variation de la vitesse chaque seconde.

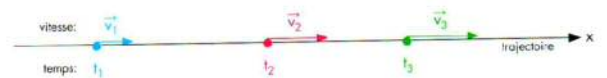
Mouvement de chute libre

Dans une situation où les frottements peuvent être négligés, le mouvement de chute libre des corps est un MRUA.

L'accélération mesurée à la surface de la Terre se note \vec{g} . Sa valeur varie légèrement d'un endroit à l'autre de la surface de la Terre : elle vaut $g = 9,832 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ aux Pôles et $g = 9,776 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ à l'Equateur. Ces différences sont dues à la rotation de la Terre et à la distance entre l'endroit considéré et le centre de la Terre. En Suisse, elle vaut $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Sa direction est verticale et elle est orientée de haut en bas.

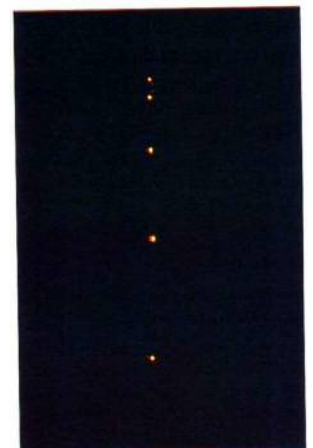
Comment indiquer la vitesse du mobile

Pour indiquer la vitesse du mobile, on la représente par un vecteur aux instants t_1, t_2, t_3, \dots considérés; ces vecteurs sont notés $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots$



Suivant le sens de la vitesse, on attribue à son intensité une valeur positive ou une valeur négative :

Si la vitesse est orientée dans le même sens que l'axe du référentiel, on donne à son intensité une valeur *positive*, par exemple $v_1 = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Chute d'une bille photographiée avec un éclairage stroboscopique.

Si la vitesse est orientée dans le sens opposé à l'axe du référentiel, on donne à son intensité une valeur *negative*; par exemple ($v_2 = -5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Comment prévoir la vitesse du mobile

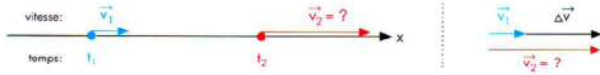
Dans le cas d'un MRUA, la valeur de l'accélération indique la variation de l'intensité de la vitesse en 1 seconde.

Si l'accélération constante d'un mobile vaut $a = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, cela signifie que chaque seconde la vitesse du mobile augmente de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Après 4 secondes, sa vitesse aura augmenté de:

$$\Delta v = a \cdot \Delta t = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \cdot 4 \text{ s} = 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Il est possible, si l'on connaît l'accélération a du mobile et sa vitesse v_1 en un instant donné t_1 , de prévoir sa vitesse v_2 à l'instant t_2 , quel que soit cet instant:



La variation de vitesse Δv pendant l'intervalle de temps compris entre t_1 et t_2 vaut:

$$\Delta v = v_2 - v_1 = a \cdot (t_2 - t_1)$$

que l'on note aussi:

$$\Delta v = a \cdot \Delta t$$

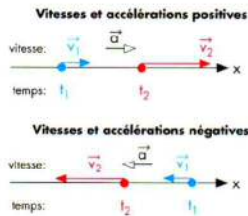
Par conséquent, l'équation des vitesses pour un MRUA s'écrit:

$$v_2 = a \cdot (t_2 - t_1) + v_1$$

Augmentation ou diminution de vitesse

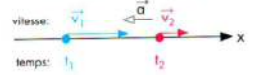
Pour pouvoir utiliser l'équation ci-dessus aussi bien lorsque la vitesse augmente (accélération dans le langage quotidien) que lorsqu'elle diminue (freinage dans le langage quotidien), on doit prendre la précaution d'attribuer à l'accélération un signe algébrique qui respecte les mêmes règles que pour la vitesse. Quatre situations peuvent se présenter.

— Si la valeur absolue de la vitesse augmente, l'accélération est orientée dans le même sens que la vitesse: *l'accélération et la vitesse ont le même signe* (les deux positives ou les deux négatives).



— Si la valeur absolue de la vitesse diminue, l'accélération est orientée dans le sens opposé à celui de la vitesse: *l'accélération et la vitesse ont des signes différents* (si la vitesse est positive, l'accélération est négative et vice versa). On utilise aussi le terme «*décélération*» dans ce cas.

Vitesses positives et accélération négative



Vitesses négatives et accélération positive



EXPERIENCE

Vitesse moyenne d'un mobile suivant un MRUA

On lâche un wagonnet sur un rail à coussin d'air incliné.

On cherche à établir une relation entre la vitesse moyenne v_{moy} du mobile sur un trajet compris entre deux positions x_1 et x_2 et les vitesses instantanées v_1 et v_2 en x_1 et x_2 .

On détermine expérimentalement:

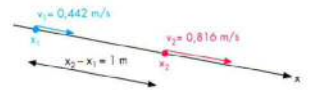
- x_1 première position du mobile
- x_2 seconde position du mobile
- v_1 vitesse du mobile en x_1
- v_2 vitesse du mobile en x_2
- Δt temps de parcours entre les positions x_1 et x_2 .

On calcule $v_{\text{moy}} = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t}$

On constate que

$$v_{\text{moy}} = \frac{v_2 + v_1}{2}$$

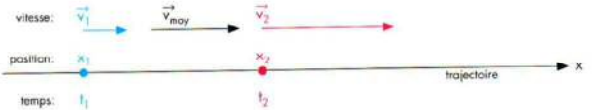
Cette propriété est toujours vérifiée pour le MRUA; ce n'est pas le cas pour d'autres types de mouvements à l'exception de quelques cas tout à fait particuliers.



Par définition: $v_{\text{moy}} = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} = \frac{1 \text{ m}}{1,59 \text{ s}} = 0,629 \text{ m/s}$
 D'autre part: $v_{\text{moy}} = \frac{0,816 \text{ m/s} + 0,442 \text{ m/s}}{2} = 0,629 \text{ m/s}$

Variation de position et vitesse moyenne

Si l'on connaît la vitesse v_1 à l'instant t_1 d'un mobile en MRUA et sa vitesse v_2 à l'instant t_2 , il est possible de connaître sa variation de position $x_2 - x_1$:



$$x_2 - x_1 = v_{\text{moy}} \cdot (t_2 - t_1) = \frac{v_2 + v_1}{2} \cdot (t_2 - t_1)$$

que l'on note aussi:

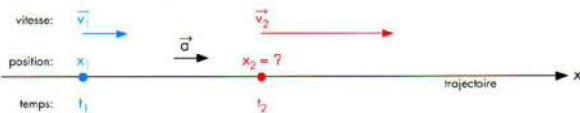
$$\Delta x = \frac{v_2 + v_1}{2} \cdot \Delta t$$

Dans le cas particulier où le mobile part de l'arrêt ($v_1 = 0$), cette relation s'écrit:

$$\Delta x = \frac{1}{2} \cdot v_2 \cdot \Delta t$$

Comment prévoir la position du mobile

Il est possible, si l'on connaît l'accélération a d'un mobile, sa vitesse v_1 et sa position x_1 en un instant t_1 , de prévoir sa position x_2 en un instant t_2 , quel que soit cet instant:



— La vitesse v_2 du mobile vaut:

$$v_2 = a \cdot (t_2 - t_1) + v_1$$

— La vitesse moyenne v_{moy} du mobile durant cet intervalle de temps vaut:

$$v_{\text{moy}} = \frac{v_2 + v_1}{2} = \frac{a \cdot (t_2 - t_1) + v_1 + v_1}{2} = \frac{a \cdot (t_2 - t_1) + 2 \cdot v_1}{2} = \frac{a \cdot (t_2 - t_1)}{2} + v_1$$

— La variation de position $x_2 - x_1$ du mobile durant cet intervalle de temps vaut:

$$x_2 - x_1 = v_{\text{moy}} \cdot (t_2 - t_1) = \frac{a \cdot (t_2 - t_1)^2}{2} + v_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

que l'on note aussi:

$$\Delta x = \frac{a \cdot (\Delta t)^2}{2} + v_1 \cdot \Delta t$$

— L'équation du MRUA donne la position x_2 du mobile à l'instant t_2 :

$$x_2 = \frac{a \cdot (t_2 - t_1)^2}{2} + v_1 \cdot (t_2 - t_1) + x_1$$

Relation entre vitesses et positions

Si l'on désigne par:

- a l'accélération d'un mobile suivant un MRUA
- x_2 et x_1 les positions du mobile aux instants t_1 et t_2
- v_1 et v_2 les vitesses du mobile aux instants t_1 et t_2 ,

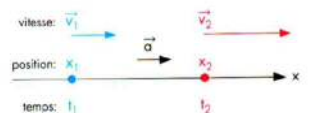
ces grandeurs vérifient la relation:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2 \cdot a \cdot (x_2 - x_1)$$

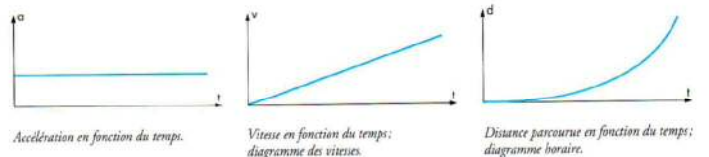
que l'on note aussi:

$$\Delta(v^2) = 2 \cdot a \cdot \Delta x$$

Cette relation peut être établie algébriquement à partir de l'équation du MRUA. On peut d'autre part la vérifier expérimentalement.



Représentations graphiques de l'accélération, de la vitesse et de la distance parcourue lors d'un MRUA



Accélération en fonction du temps.

Vitesse en fonction du temps; diagramme des vitesses.

Distance parcourue en fonction du temps; diagramme horaire.

Chapitre 44. Balistique et mouvement circulaire uniforme

Dans tout ce chapitre, on néglige les forces de frottement.

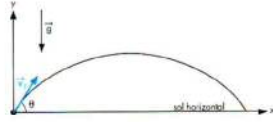
1 La balistique

Introduction

On lance depuis le sol un projectile avec une vitesse initiale v_1 formant un angle θ avec l'horizontale.

Le projectile subit l'accélération constante \vec{g} due à la pesanteur telle que :

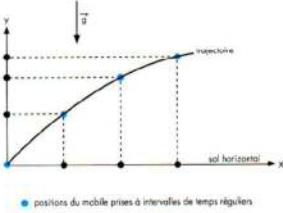
- la direction de \vec{g} est verticale; elle pointe vers le centre de la Terre;
- en Suisse, l'intensité de \vec{g} vaut $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- la trajectoire du mobile est une *portion de parabole*.



Décomposition du mouvement

On décrit le mouvement du projectile dans un repère formé de deux axes :

- un axe x horizontal orienté de gauche à droite;
- un axe y vertical orienté de bas en haut;
- dans la suite de ce chapitre, l'origine des axes est placée arbitrairement à l'endroit où le projectile est lancé ($x_1 = 0$ et $y_1 = 0$);
- le temps de vol du mobile est compté à partir du départ du projectile ($t_1 = 0$).



Le mouvement du mobile est projeté sur chacun des axes. Comme l'accélération est verticale, le mobile suit :

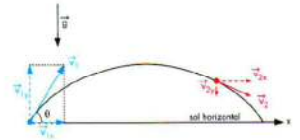
- un MRU suivant l'axe x;
- un MRUA dont l'accélération vaut $-9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ suivant l'axe y.

On traite séparément le mouvement relativement à chaque axe.

Vitesse suivant l'axe horizontal x

La composante *horizontale* de la vitesse est *constante* et vaut à chaque instant :

$$v_{1x} = v_{2x} = v_1 \cdot \cos\theta$$



Position suivant l'axe horizontal x

— La projection du mouvement sur l'axe horizontal est un MRU; à n'importe quel instant t_2 , la coordonnée x_2 sur l'axe horizontal est donnée par l'équation du MRU :

$$x_2 = v_{1x} \cdot (t_2 - t_1) + x_1$$

Par le choix du système d'axes ($x_1 = 0$ et $t_1 = 0$), cette expression prend la forme simplifiée :

$$x_2 = v_{1x} \cdot t_2 = v_1 \cdot \cos\theta \cdot t_2$$



Vitesse suivant l'axe vertical y

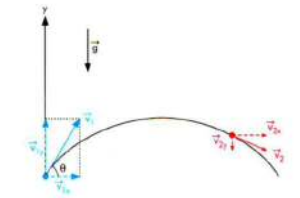
— L'accélération verticale étant *constante*, la valeur de la composante *verticale* de la vitesse *varie*; elle vaut en un instant quelconque t_2 :

$$v_{2y} = g \cdot (t_2 - t_1) + v_{1y} = g \cdot (t_2 - t_1) + v_1 \cdot \sin\theta$$

Comme $t_1 = 0$, l'expression ci-dessus prend la forme simplifiée :

$$v_{2y} = g \cdot t_2 + v_{1y} = g \cdot t_2 + v_1 \cdot \sin\theta$$

($g = -9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, car son orientation est opposée à celle de l'axe y)



Position suivant l'axe vertical y

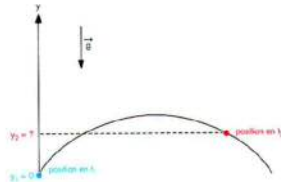
— La projection verticale du mouvement est un MRUA; à n'importe quel instant t_2 , la coordonnée y_2 sur l'axe vertical est donnée par l'équation du MRUA :

$$y_2 = \frac{g \cdot (t_2 - t_1)^2}{2} + v_{1y} \cdot (t_2 - t_1) + y_1$$

Par le choix du système d'axes ($y_1 = 0$ et $t_1 = 0$), cette expression prend la forme simplifiée :

$$y_2 = \frac{g \cdot t_2^2}{2} + v_1 \cdot \sin\theta \cdot t_2$$

($g = -9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, car son orientation est opposée à celle de l'axe y)



La *portée* du jet est la distance, mesurée sur le sol, séparant le point de départ du projectile de son point d'impact sur le sol. Si le point de départ du projectile et le point d'impact sur le sol sont à la même altitude ($y = 0$),

- le temps t_B mis par le projectile pour atteindre le point d'impact B vaut le double du temps t_A mis pour atteindre le point le plus haut de la trajectoire (point A)

$$t_B = 2 \cdot t_A$$

- la portée du jet vaut le double de la distance horizontale correspondant au point le plus haut de la trajectoire :

$$x_B = 2 \cdot x_A$$

Remarques

Les propriétés énoncées dans ce chapitre sont valables si :

- on néglige l'effet des frottements dus à l'air;
- on considère \vec{g} constant;
- on néglige l'effet de la rotation de la Terre.

Forme de la trajectoire

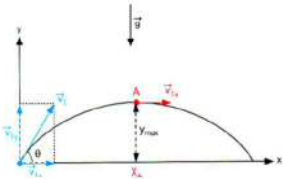
Il est possible, à partir des équations mentionnées ci-dessus, de montrer que la trajectoire du mobile est une *portion de parabole*. (En substituant le temps t dans les équations pour x et y, on peut exprimer y en fonction de x et constater qu'il s'agit d'une équation du second degré).

Altitude maximale du projectile

Le point le plus haut de la trajectoire (noté A sur la figure) est caractérisé par le fait que la composante verticale de la vitesse est nulle en ce point. Si l'on note t_A l'instant où le projectile se trouve en A, on a :

$$v_{Ay} = g \cdot t_A + v_{1y} = g \cdot t_A + v_1 \cdot \sin\theta = 0$$

On peut, en utilisant cette propriété, déterminer à quel instant t_A cette position est atteinte.

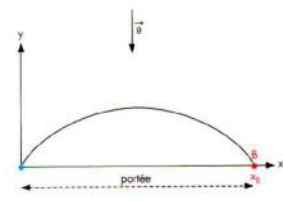


Point d'impact du projectile sur le sol

Le point d'impact du projectile sur le sol (noté B sur la figure) est caractérisé par le fait que l'altitude est nulle en ce point. Si l'on note t_B l'instant où le projectile se trouve en B, on a :

$$y_B = \frac{g \cdot t_B^2}{2} + v_{1y} \cdot t_B = \frac{g \cdot t_B^2}{2} + v_1 \cdot \sin\theta \cdot t_B = 0$$

On peut, en utilisant cette propriété, déterminer à quel instant t_B le projectile touche le sol.



2 Le mouvement circulaire uniforme

Définition

Un point matériel suit un mouvement circulaire uniforme (MCU) si sa trajectoire est un cercle et si l'intensité de sa vitesse est constante.

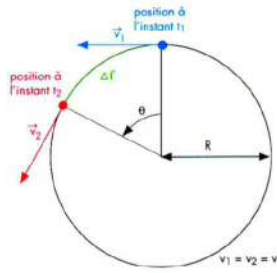
La plupart des planètes suivent approximativement un mouvement circulaire uniforme autour du Soleil. Un enfant sur un manège de chevaux de bois, un électron dans un champ magnétique uniforme ou un grain de poussière sur un disque 33 tours que l'on est en train d'écouter suivent aussi ce type de mouvement.

Vitesse et vitesse angulaire

— Bien que l'intensité de la vitesse du mobile soit constante s'il décrit un MCU, sa direction change; elle est toujours *tangente à la trajectoire*, c'est-à-dire *perpendiculaire* en chaque point *au rayon de la trajectoire*. Le mobile subit donc une accélération.

On désignera par v l'intensité de la vitesse du mobile.

— Lorsque le point matériel se déplace entre deux positions sur la circonférence du cercle, le rayon R balaye un angle θ . Cet angle est exprimé en radians.



— L'arc Δl parcouru sur la circonférence vaut :

$$\Delta l = \theta \cdot R$$

Pour qu'il y ait compatibilité entre les unités des quantités figurant dans cette équation, on remarque que l'angle θ doit être exprimé par un nombre *sans unité*. Le «radian» est une unité «fantôme» souvent utilisée pour désigner une unité de mesure d'un angle. Dans ce système, un angle est en fait représenté par un nombre sans unité.

— La vitesse angulaire ω est par définition l'angle balayé par unité de temps; si l'angle θ est balayé durant l'intervalle de temps Δt , la vitesse angulaire est donnée par :

$$\omega = \frac{\theta}{\Delta t}$$

Sa valeur est *constante* lors d'un mouvement circulaire uniforme; elle s'exprime en s^{-1} .

— La vitesse du point matériel est constante. Si l'on désigne par Δl la distance parcourue sur la circonférence pendant l'intervalle de temps Δt , la vitesse v du mobile vaut :

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{\theta \cdot R}{\Delta t}$$

— En comparant les expressions pour la vitesse v et la vitesse angulaire ω , on en déduit une relation entre la vitesse v , la vitesse angulaire ω et le rayon R :

$$v = \omega \cdot R$$

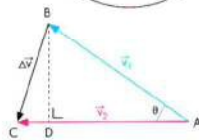
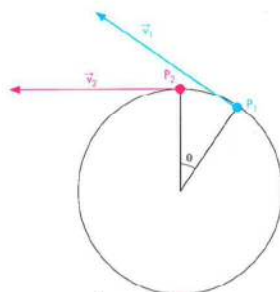
Accélération instantanée

Direction de l'accélération instantanée

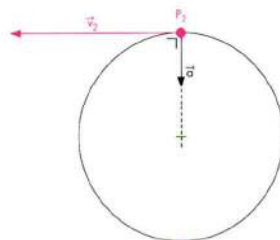
Par définition, l'accélération instantanée est :

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Si Δt tend vers zéro, l'angle θ tend aussi vers zéro et les points C et D du diagramme des vitesses sont quasiment confondus. $\Delta \vec{v}$ peut être représenté entre les points B et D; sa direction, et par conséquent celle de l'accélération, est perpendiculaire à \vec{v}_2 . L'accélération est ainsi dirigée vers le centre de la trajectoire.



Dans un MCU, l'accélération instantanée est, en tout point de la trajectoire, dirigée vers le centre de la circonférence sur laquelle se déplace le mobile; on dit que l'accélération est *centripète*.



EXPERIENCE Si l'on fait pousser de l'«herbe à chat» sur un plateau tournant, la croissance des brins d'herbe n'est pas verticale. La direction des brins est obtenue par composition de l'accélération de la pesanteur et de l'accélération due à la rotation du plateau.



Période et fréquence de rotation

La période de rotation est l'intervalle de temps noté T pendant lequel le mobile effectue un tour complet. L'angle balayé pendant le temps T vaut 2π et la distance parcourue vaut $2\pi \cdot R$.

La période de rotation vaut :

$$T = \frac{2\pi \cdot R}{v} = \frac{2\pi}{\omega}$$

La fréquence f est par définition l'inverse de la période. Sa valeur représente le nombre de tours effectués par le mobile durant 1 s. Elle s'exprime en hertz [Hz] : $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$. Un mobile qui tourne à la fréquence de 3 Hz effectue 3 tours complets par seconde.

La fréquence de rotation vaut :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi \cdot R} = \frac{\omega}{2\pi}$$

Accélération moyenne

On considère les positions P_1 et P_2 occupées par le mobile aux instants t_1 et t_2 :

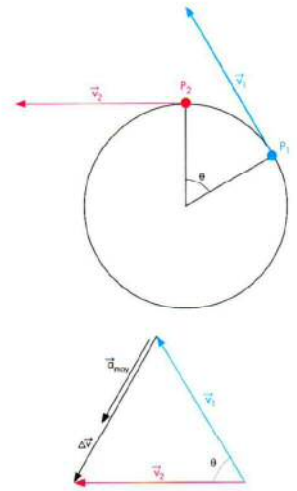
L'accélération moyenne est donnée par :

$$\vec{a}_{\text{moy}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

où Δt est l'intervalle de temps compris entre t_1 et t_2 .

Remarques

- $\Delta \vec{v}$ et \vec{a}_{moy} ont la même direction;
- comme la vitesse est toujours perpendiculaire au rayon correspondant de la trajectoire, l'angle balayé par le rayon de la trajectoire et l'angle entre les directions des vitesses sont égaux. Cet angle est noté θ sur les schémas.



Intensité de l'accélération instantanée

L'accélération instantanée est :

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Les triangles isocèles ABC et OP_1P_2 sont semblables :

$$\frac{AB}{OP_1} = \frac{BC}{P_1P_2}$$

- AB représente la vitesse v du mobile
- OP_1 est le rayon R de la circonférence
- BC représente l'intensité de la variation de vitesse Δv
- Si $\Delta t \rightarrow 0$, alors $\theta \rightarrow 0$ et le segment P_1P_2 est assimilable à l'arc de cercle P_1P_2 de longueur $\theta \cdot R$.

On peut reformuler la similitude des deux triangles comme suit :

$$\frac{v}{R} = \frac{\Delta v}{\theta \cdot R}$$

ou

$$\Delta v = \theta \cdot v$$

on obtient pour l'accélération :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\theta \cdot v}{\Delta t} = \frac{\theta}{\Delta t} \cdot v = \omega \cdot v = \omega \cdot \omega \cdot R = \omega^2 \cdot R$$

L'intensité de l'accélération instantanée est donnée par :

$$a = \omega^2 \cdot R$$

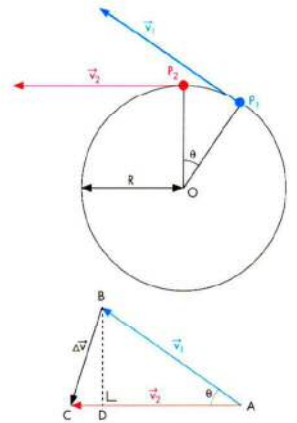
En utilisant la propriété $v = \omega \cdot R$, on obtient de façon équivalente :

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

On appelle cette accélération : accélération normale ou centripète.

Remarque

Tous les points d'un solide en rotation ont la même vitesse angulaire. Par contre, leur accélération centripète augmente avec la distance à l'axe.



Chapitre 45. Dynamique. Quantité de mouvement et lois de Newton

L'étude de la dynamique est l'analyse de l'influence des forces sur les variations de vitesse d'un corps. Les lois de la dynamique ont été formulées pour la première fois par Isaac Newton (1642 - 1727) bien qu'elles soient déjà contenues de façon implicite dans l'œuvre antérieure de Galilée (1564 - 1642).

1 Quantité de mouvement

Système isolé

Un ensemble de points matériels qui peuvent interagir entre eux constitue un *système*. Un système est *isolé* lorsque l'ensemble des points matériels qui le constituent n'interagissent qu'entre eux; un point matériel d'un système *isolé* ne participe à aucune interaction avec un objet extérieur au système.

Le concept de système isolé est une idéalisation; dans la réalité, il est impossible de soustraire un système de toute influence extérieure. On peut toutefois considérer un système comme isolé si :

- les interactions entre ses constituants sont beaucoup plus importantes que les interactions avec l'extérieur;
- les influences extérieures se compensent.



Conservation de la quantité de mouvement

La quantité de mouvement totale d'un système *isolé* constitué de « n » points matériels est *conservée* (elle ne change pas) :

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \dots + \vec{p}_n = \text{constante}$$

Dans le cas du choc de deux mobiles sur un rail à coussin d'air horizontal, on obtient

$$p_1 + p_2 = p'_1 + p'_2$$

- p_1 et p_2 sont respectivement les valeurs des quantités de mouvement du premier et du second mobile *avant* le choc;
- p'_1 et p'_2 sont respectivement les valeurs des quantités de mouvement du premier et du second mobile *après* le choc;
- on attribue à chaque quantité de mouvement une valeur positive ou négative en fonction de son sens.

Cette équation exprime que la quantité de mouvement totale du système isolé constitué des deux mobiles n'est pas modifiée par le choc.

Validité de la loi de la conservation de la quantité de mouvement

L'expérience montre que la validité de cette loi est *universelle*. Elle est *vérifiée pour tous les systèmes isolés* ou que l'on peut considérer comme tels.

C'est à ce titre une loi fondamentale de la physique.

EXPÉRIENCE

On réalise des chocs entre deux mobiles glissant sur un rail horizontal à coussin d'air; le système constitué des deux mobiles peut être considéré comme un système isolé. On peut en effet considérer que lors du choc chacun ne subit que la force due à l'autre car :

- leur force de pesanteur et la force de soutien du rail s'annulent mutuellement;
- les forces de frottement sont négligeables.

Le choc modifie les vitesses des mobiles.

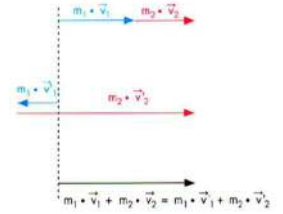
On détermine expérimentalement :

- les masses m_1 et m_2 des mobiles;
- les vitesses v_1 et v_2 des mobiles avant le choc;
- les vitesses v'_1 et v'_2 des mobiles après le choc.

On constate que :

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2$$

La vitesse étant une quantité vectorielle, on tient compte du sens des vitesses en donnant le signe algébrique correct à la valeur de leur intensité. A cet effet, on choisit arbitrairement un sens positif (de gauche à droite); on attribue une *valeur positive* aux vitesses orientées dans ce sens et une *valeur négative* aux vitesses orientées dans l'autre sens.



Quantité de mouvement

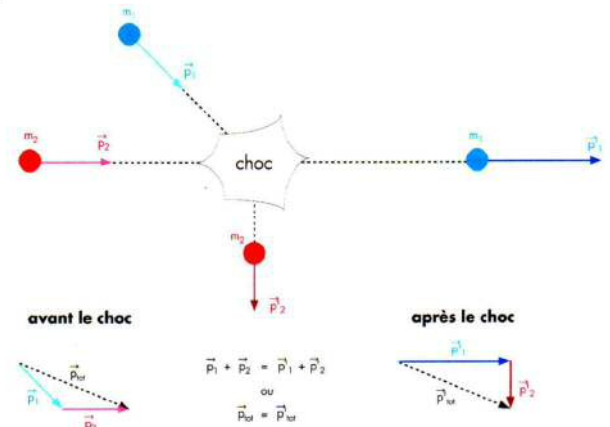
La quantité de mouvement \vec{p} d'un corps de masse m se déplaçant à la vitesse \vec{v} est la *grandeur vectorielle* définie par :

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

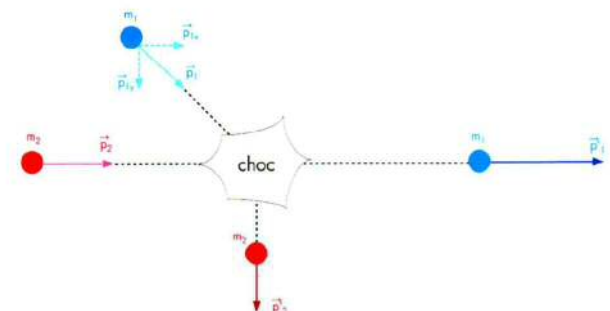
- La quantité de mouvement d'un mobile est représentée par un vecteur de même direction et de même sens que sa vitesse.
- Son intensité est le produit de la masse du mobile par l'intensité de sa vitesse; elle s'exprime en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Choc de deux mobiles sur un plan

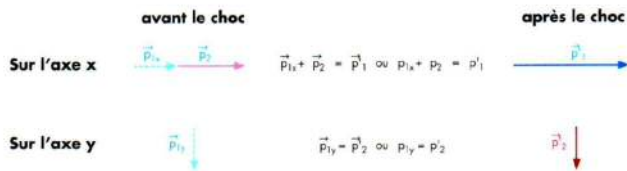
La quantité de mouvement est conservée lors du choc de deux mobiles se déplaçant sans frottement sur un plan horizontal :



Pour déterminer les intensités des vitesses ou des quantités de mouvement en présence, on décompose les vecteurs des quantités de mouvement sur deux axes perpendiculaires « x » et « y » :



On obtient un système de deux équations portant sur les intensités des quantités de mouvement :



Chocs mous; chocs élastiques

On distingue deux types de chocs :

- Les chocs *élastiques* où l'énergie cinétique est conservée; dans ce cas, on peut montrer que, si les masses des mobiles sont égales, leurs trajectoires après le choc forment un angle droit si le choc n'est pas frontal (exemple : choc de deux boules de billard).
- Les chocs *mous* pour lesquels une partie ou la totalité de l'énergie cinétique est transformée en chaleur durant le choc (exemple : accident de la circulation).

Dans tous les cas, la quantité de mouvement est conservée durant le choc.

2 Première loi de Newton ou loi d'inertie

Énoncé de la loi

Un point matériel qui n'est soumis à aucune force ne modifie pas sa vitesse; il suit un mouvement rectiligne uniforme (MRU).

Cette propriété englobe le cas particulier du repos pour lequel la vitesse est nulle.

Dans la réalité, un point matériel subit toujours des forces. La loi d'inertie peut toutefois être appliquée dans le cas où ces forces se compensent pour donner une résultante nulle.

Si plusieurs forces agissent sur un corps donné, il faut faire figurer leur résultante dans la seconde loi de Newton :

$$\vec{F}_{\text{rés}} = m \cdot \vec{a}$$

La seconde loi de Newton traduit les idées suivantes :

- pour provoquer la même accélération sur deux corps de masses différentes, il faut appliquer une force plus intense sur le corps de plus grande masse;
- pour provoquer une plus grande accélération sur un corps donné, il faut lui appliquer une force plus intense.

Remarques

- Si la résultante des forces agissant sur un corps est nulle, son accélération est nulle; le corps est en mouvement rectiligne uniforme (dont le repos est un cas particulier).
- Telle qu'elle est formulée ci-dessus, la deuxième loi de Newton n'est valable que pour des corps dont la masse reste constante. Ce n'est pas le cas par exemple d'une fusée qui « perd » une masse importante de carburant durant son trajet.

Dans sa formulation générale, la seconde loi de Newton s'énonce de la façon suivante :

la force (résultante) agissant sur un corps est égale à la dérivée de sa quantité de mouvement par rapport au temps :

$$\vec{F}_{\text{rés}} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Définition de l'unité de force : le newton

1 N est l'intensité d'une force provoquant sur une masse de 1 kg une accélération de 1 m · s⁻².

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

Référentiels d'inertie

On appelle *référentiel d'inertie* (ou *référentiel galiléen*) un référentiel pour lequel la loi d'inertie est vérifiée.

Situation 1 :

Considérons une bille posée sur le plancher horizontal d'un wagon de chemin de fer. Elle est soumise à l'action de deux forces (la force de pesanteur et la force de réaction du plancher) dont la résultante est nulle.

- Lorsque le train est arrêté, la bille est immobile sur le plancher conformément à la loi d'inertie. Le train arrêté peut être considéré comme un référentiel d'inertie.
- Pendant que le train démarre, un observateur dans le wagon voit la bille accélérer vers l'arrière bien que la résultante des deux forces qui s'y appliquent soit toujours nulle. La loi d'inertie n'est pas vérifiée. Le train qui accélère n'est pas un référentiel d'inertie.

Un référentiel accéléré n'est pas un référentiel d'inertie.

Situation 2 :

Dans le cas d'un ascenseur dont le câble se rompt, l'accélération de la cage compense l'effet de la gravitation terrestre. Une personne dans une telle situation se trouve apparemment en état d'apesanteur bien que la gravitation terrestre agisse toujours.

Un ascenseur en chute libre n'est pas un référentiel d'inertie.

3 Deuxième loi de Newton ou relation fondamentale de la dynamique

Énoncé de la loi

Une force \vec{F} appliquée à un corps de masse m lui imprime une accélération \vec{a} telle que :

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

L'accélération a même direction et même sens que la force. Leurs intensités satisfont l'équation

$$F = m \cdot a$$

Deuxième loi et mouvement circulaire uniforme

La force et l'accélération qu'elle provoque ont même direction et même sens. Un corps en mouvement circulaire uniforme est soumis à une force dirigée, comme l'accélération, vers le centre de la trajectoire. La force est centripète. Si le corps de masse m se déplace à la vitesse v sur une circonférence de rayon R , la force qui lui est appliquée a une intensité :

$$F = m \cdot a = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

4 Troisième loi de Newton ou loi de l'action et de la réaction

Énoncé de la loi

Si un corps rigide A exerce une force \vec{F} sur un corps rigide B, le corps B exerce sur A une force \vec{F}' opposée à \vec{F} :

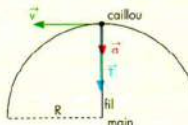
$$\vec{F} = - \vec{F}'$$

La force exercée par le premier corps sur le second est appelée « action » et la force exercée par le second sur le premier est appelée « réaction ». Les deux forces ont la même intensité : $F = F'$.

Exemples

- Le Soleil attire la Terre et la Terre attire le Soleil avec une force opposée.
- La balle d'un fusil est propulsée vers l'avant et le fusil est poussé vers l'arrière avec une force de même intensité.
- Une personne qui pousse une voiture vers l'avant est elle-même repoussée vers l'arrière par la voiture avec une force de même intensité. La personne peut quand même faire avancer la voiture grâce à la force de frottement de la route sur ses pieds; l'opération est impossible si ses pieds glissent sur une plaque de verglas.

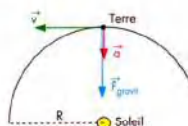
Caillou que l'on fait tourner à l'extrémité d'un fil



La tension du fil est dirigée vers la main, au centre de la trajectoire.

$$T = m_{\text{caillou}} \cdot a = \frac{m_{\text{caillou}} \cdot v^2}{R}$$

La Terre tournant autour du Soleil



La force de gravitation est dirigée vers le Soleil, au centre de la trajectoire.

$$F_{\text{gravit}} = m_{\text{Terre}} \cdot a = \frac{m_{\text{Terre}} \cdot v^2}{R}$$

Validité de la loi d'action et de réaction

Pour comprendre le sens qu'il faut donner au mot « rigide » figurant dans l'énoncé de la loi, examinons les deux exemples suivants :

- Lorsqu'on joue au billard, les boules sont assez rigides pour ne pas se briser lorsqu'elles s'entrechoquent. Au moment du choc, l'action de l'une est opposée à la réaction de l'autre (même intensité et sens opposés).
- Remplaçons une des boules par un œuf; il n'est pas assez rigide et se brise au moment du choc. L'action de la boule est dans ce cas plus intense que la réaction de l'œuf; la troisième loi de Newton n'est pas vérifiée.

Il n'existe aucune situation où la force de réaction \vec{F} est plus intense que la force d'action \vec{F}' . On peut donc écrire en toute généralité :

$$F \geq F'$$

Chapitre 46. L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est liée à la cohésion entre les particules qui constituent le noyau de l'atome. Elle se manifeste lorsque des noyaux se cassent (fission nucléaire) ou lorsqu'ils s'assemblent (fusion nucléaire). Ces phénomènes libèrent de l'énergie et produisent des radiations.

1 Énergie des radiations

Toute radiation possède une certaine énergie. Celle-ci se mesure en une unité particulière : l'électronvolt : eV. C'est l'énergie acquise par une charge élémentaire accélérée par une différence de potentiel de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

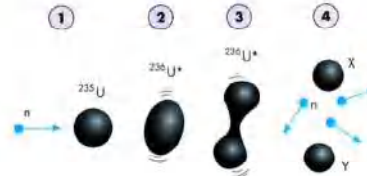
Cette énergie est responsable de l'effet des radiations, principalement sur les êtres vivants.



Le compteur Geiger-Müller, instrument de mesure de la radioactivité.

2 Fission nucléaire

Certains noyaux d'atomes lourds, tels que l'uranium, sont susceptibles, dans des conditions particulières, de subir le phénomène de fission, c'est-à-dire de se « casser » pour donner naissance à deux nouveaux noyaux.



Fission de l'uranium, modèle de la goutte liquide

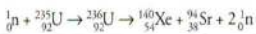


La centrale nucléaire de Leibstadt.

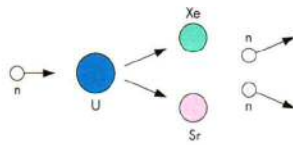
Chaque fission est accompagnée de l'émission de deux à trois neutrons en moyenne et d'un dégagement d'énergie, sous forme thermique, utilisable pour produire, par transformation, de l'énergie électrique.

Un noyau de l'isotope d'uranium ^{235}U , bombardé par des neutrons d'énergie définie (1/40 eV), appelés « neutrons thermiques », se casse en deux nouveaux noyaux accompagnés de deux ou trois neutrons, eux-mêmes susceptibles, après avoir été ralentis, d'induire de nouvelles fissions. C'est la réaction en chaîne.

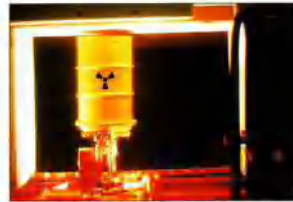
Par exemple, on peut obtenir la réaction nucléaire :



1 neutron + 1 uranium 235 → 1 uranium 236 → 1 xénon 140 + 1 strontium 94 + 2 neutrons



Les deux noyaux formés (Xe et Sr) sont radioactifs et se transforment en d'autres éléments qui constituent souvent des déchets inutilisables et radioactifs.



Stockage des déchets nucléaires; le symbole peint signifie que le contenu est radioactif.

Chaque fission d'un noyau d'uranium est accompagnée d'un dégagement d'énergie de 200 MeV. Comparativement, l'énergie dégagée par une réaction chimique entre deux atomes est de l'ordre de quelques eV seulement!

On s'aperçoit alors que la fission d'une mole d'uranium ($6,02 \cdot 10^{23}$ atomes ou 235 g d'uranium) produit une énergie énorme de l'ordre de $1,9 \cdot 10^{13}$ J. C'est environ l'énergie consommée par 2 000 ménages en une année (comparable à l'énergie dégagée par l'explosion de la bombe d'Hiroshima).

L'uranium naturel contient 99,3 % de l'isotope 238 peu fissile lorsqu'il est bombardé par des neutrons thermiques ou lents; c'est pourquoi, pour augmenter le rendement de la fission, on l'enrichit de quelques pour-cent en uranium 235.



Principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire

Il existe des réacteurs à uranium naturel ou à uranium enrichi en ^{235}U . Pour qu'une réaction en chaîne ait lieu, il faut qu'au moins un neutron libéré par chaque fission provoque la fission d'un autre noyau d'uranium 235, on le nomme alors « neutron utile ».

Si le nombre de neutrons utiles est exactement égal à 1, on dit que la réaction est critique ou contrôlée.

Si le nombre de neutrons utiles dépasse l'unité, on a une réaction supercritique ou divergente dont la bombe atomique est un exemple frappant!

Si le nombre de neutrons utiles est inférieur à l'unité, la réaction s'arrête d'elle-même rapidement.

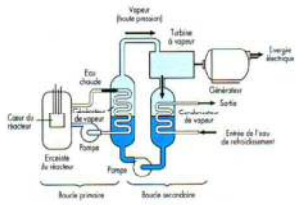
Il est donc nécessaire de contrôler soigneusement le nombre de neutrons utiles; en moyenne, 2,7 neutrons rapides sont produits par fission. Il faut donc ralentir les neutrons utiles et absorber le surplus.

Une première solution est l'utilisation d'un modérateur qui ralentit les neutrons. Pour ce faire, on utilise de l'eau naturelle sous pression, de l'eau lourde (l'hydrogène de l'eau est remplacé par du deutérium), du graphite, voire du béryllium. Une seconde solution est d'absorber les neutrons excédentaires. On dispose, dans le réacteur, des barres mobiles, dites barres de contrôle, souvent constituées de cadmium. Elles permettent de bien contrôler la réaction en chaîne et aussi d'arrêter le réacteur en cas de défectuosité ou lors des révisions périodiques.



Le cœur d'un réacteur nucléaire.

L'énergie dégagée par la fission sert à vaporiser de l'eau. Cette vapeur d'eau, à haute pression et haute température entraîne des turbines couplées à des alternateurs qui transforment cette énergie mécanique en énergie électrique. Après passage dans les turbines, la vapeur est condensée dans des tours de refroidissement, l'eau est alors renvoyée dans le réacteur pour être de nouveau réchauffée. Pour des raisons évidentes de sécurité, entre autres pour éviter tout risque de contamination radioactive par les produits de

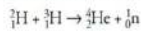


Principaux éléments d'un réacteur à eau sous pression.

fission, ce processus est décomposé en deux circuits indépendants et isolés l'un de l'autre : c'est l'échangeur de chaleur. On parle alors de circuit primaire et de circuit secondaire. Seule la vapeur du circuit secondaire entre en contact avec les aubes des turbines.

3 Fusion nucléaire

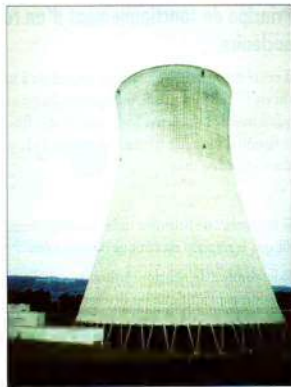
La fusion concerne les noyaux légers tel que les isotopes de l'hydrogène (deutérium et tritium). Par exemple, un noyau de deutérium peut fusionner avec un noyau de tritium pour former un noyau d'hélium. Cette fusion est exothermique. On écrit la réaction nucléaire comme suit :



deutérium + tritium → hélium + neutron

L'énergie dégagée est d'environ 17,6 MeV par fusion. Ce processus a lieu au centre du Soleil et des étoiles. La matière s'y trouve à l'état de plasma (les atomes sont complètement ionisés), et la température peut atteindre 10⁸ K.

Les particules du plasma possèdent alors une énergie cinétique énorme ce qui permet à deux noyaux, lors d'une collision, de s'approcher suffisamment l'un de l'autre, malgré la forte répulsion électromagnétique (coulombienne), pour qu'ils fusionnent sous l'effet de la force nucléaire. Cette réaction s'appelle « réaction thermonucléaire ».



Tour de refroidissement ; elle produit uniquement de la vapeur d'eau.



Un réacteur expérimental pour la fusion nucléaire : le Tokamak. (Photo : CRPP, Centre de recherches en physique des plasmas, Lausanne)

5 Types de radiations

Il existe plusieurs types de radiations. Les principales sont l'émission de particules α, de particules β et de rayonnement γ.



particule α

Emission de particules α

Cette radiation est caractérisée par l'émission d'une particule composée de deux protons et deux neutrons : il s'agit en fait d'un noyau d'hélium. Ce type de désintégration a lieu pour des noyaux lourds pour lesquels la somme du nombre de protons et neutrons dépasse 150. Ces particules sont soustraites au noyau qui les émet. Par exemple l'isotope du radium (²²⁶Ra) se transforme, par émission α, en radon (²²²Rn).

Les particules α sont facilement arrêtées par une feuille de papier.

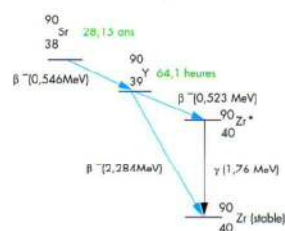


Traces de particules α dans une chambre à brouillard.

Emission de particules β

Cette radiation est constituée d'un électron (particule β⁻) ou d'un positron (particule β⁺, antiparticule de l'électron, chargée positivement) provenant du noyau qui se désintègre. Le nombre de masse ne change pas, même si le nombre de protons et de neutrons change. Par exemple, le strontium (⁹⁰Sr) se transforme, par émission d'un β⁻ en yttrium (⁹⁰Y).

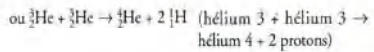
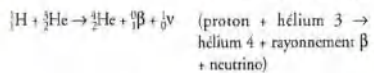
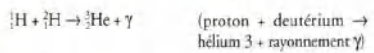
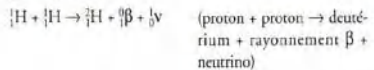
Les particules β sont plus pénétrantes que les particules α : le parcours des particules β dans l'air est de l'ordre du mètre. Elles sont pratiquement totalement absorbées par une épaisseur de Plexiglas de 3 mm.



Exemple de désintégration β⁻ : les indications en vert représentent les « dérivés » des éléments.

Les noyaux d'yttrium (⁹⁰Y) subissent une désintégration β⁻ qui les font passer aléatoirement, soit directement au zirconium dans son état fondamental (⁹⁰Zr), soit vers un état excité du zirconium (⁹⁰Zr*). Dans ce dernier cas, l'état fondamental est atteint après une émission de rayonnement γ.

L'énergie rayonnée par les étoiles, comme le Soleil, provient d'une série de réactions de ce type que l'on nomme « cycle proton-proton » :



L'énergie libérée, par cycle, est d'environ 25 MeV.

Actuellement, un difficile problème à résoudre consiste à maîtriser la fusion, c'est-à-dire réussir à contrôler une réaction qui a lieu à des températures supérieures à dix millions de kelvins.

La fusion possède de nombreux avantages par rapport à la fission. La réserve d'hydrogène, sous forme de deutérium, est quasiment inépuisable dans l'eau des océans.

La réaction de fusion ne produit pas d'éléments radioactifs de longue période contrairement à la réaction de fission nucléaire.



Les étoiles sont de formidables réacteurs à fusion nucléaire.



Les lacs et l'océan, une source quasi inépuisable de combustible pour la fusion nucléaire.



Marie Curie découvre la radioactivité du thorium et isole le radium.

4 La radioactivité

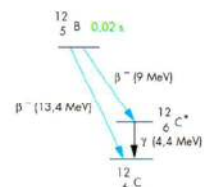
La radioactivité (découverte par Becquerel en 1896) est la propriété du noyau de certains atomes d'émettre des particules ou un rayonnement, spontanément et indépendamment de toute action extérieure (ou encore de capter un électron avec émission atomique subséquente de rayons X caractéristiques).

Emission de rayonnement 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.



Les noyaux de bore (¹²B) subissent une désintégration β⁻ qui les font passer aléatoirement, soit directement au carbone dans son état fondamental (¹²C), soit vers un état excité du carbone (¹²C*). Dans ce dernier cas, l'état fondamental est atteint après une émission de rayonnement γ.

6 Effet biologique des radiations

Toute radiation produit sur les êtres vivants un effet biologique (voir document en fin de chapitre). L'Homme a toujours été exposé aux radiations de son environnement naturel. Les principales sources de radiations sont les rayons cosmiques, la radioactivité naturelle des roches et du sous-sol, de même que certains isotopes radioactifs que nous possédons dans nos tissus humains. Cela produit une dose d'irradiation mesurée en rem (röntgen équivalent man) ou en Sv (sievert).

Le sievert correspond, pour les rayonnements β et γ, à une énergie de 1 J · kg⁻¹. La correspondance entre le rem et le sievert est : 1 Sv = 100 rem.

Cette dose d'irradiation dépend fortement du type de rayonnement, de son énergie et de son efficacité biologique relative (plus cette efficacité est grande, plus les radiations sont dangereuses) ; les émissions de particules α, quoique très rapidement absorbées ont une efficacité relative dix fois plus élevée que celle des particules β. Cela est dû, en partie, à leur masse élevée (noyau d'hélium).

La dose moyenne annuelle absorbée naturellement par l'Homme est d'environ 5 mSv (500 mrem) par an. La dose maximale admissible pour les personnes dites « professionnellement exposées » telles que celles travaillant dans les



Lors de la radiographie d'une main, la dose d'irradiation n'est environ 1 rem.

centrales nucléaires ou dans les laboratoires de recherche nucléaire a été fixée par les autorités de surveillance (Services de Radioprotection) des différents pays à 50 mSv par année. Ce facteur dix par rapport à la dose naturelle absorbée a été admis sans qu'on ait pu mettre en évidence un effet biologique irréversible pour des doses supérieures.

En effet, on ne connaît pas le seuil de danger des radiations; il faut donc se protéger de tout excès d'irradiation. A noter que les doses diagnostiques ou thérapeutiques (activités médicales) n'entrent pas dans le décompte de cette valeur maximale admissible.

On suppose que les différentes mutations observées dans l'évolution biologique de l'être humain, au cours de l'Histoire, sont dues, entre autres, aux effets des radiations naturelles cosmiques ou provenant des roches.

Sur le plan des effets biologiques, il faut faire la différence entre « irradiation » et « contamination ».

L'irradiation est provoquée, soit par une source extérieure à l'être humain (rayons cosmiques, roches radioactives, etc.), soit par une source interne telle que l'ingestion d'un isotope radioactif (consommation de champignons ayant accumulé des retombées radioactives, par exemple suite à l'accident de Tchernobyl).



L'accident de Tchernobyl a produit des poussières radioactives.

La contamination a lieu lorsque des poussières radioactives se déposent sur la peau, lorsque l'on respire ou ingère de telles poussières ou lors de la consommation d'aliments contaminés. La contamination est beaucoup plus dangereuse que l'irradiation car l'isotope radioactif est en contact direct avec différents organes de notre corps et peut même entrer dans le métabolisme des cellules augmentant ainsi ses effets dangereux.

A titre d'exemple, le tabac utilisé pour la confection de cigarettes contient, selon sa provenance, des traces de polonium qui représentent en moyenne une activité de 4 mBq de ²¹⁰Po sous forme de particules α (1 Bq = 1 désintégration par seconde).



Les cigarettes sont aussi radioactives!

Un calcul montre que la consommation journalière de 20 cigarettes impose au larynx une dose annuelle de 5 000 mrem ou 50 mSv!

Les organes internes, les gonades (organes sexuels) et les yeux sont bien plus sensibles aux radiations que la peau, par exemple.

7 Loi de désintégration

Il n'est pas possible de prévoir l'instant où le noyau d'un atome va se désintégrer. Le phénomène de désintégration est statistique (caractère stochastique); il est régi par une loi empirique qui admet que le nombre d'atomes désintégrés **dN** dans l'intervalle de temps **dt** est proportionnel à la population **N** d'atomes susceptibles de se désintégrer. La constante de proportionnalité λ (lambda) est appelée constante radioactive ou de désintégration. Cette valeur est une caractéristique du noyau considéré.

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

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:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Le nombre « e » est appelé « nombre d'Euler ». Il vaut: 2,7182...

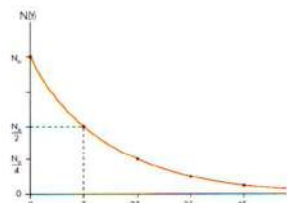
Ainsi, la décroissance radioactive est exponentielle.

On appelle période radioactive (ou temps de demi-vie noté $T_{1/2}$) l'intervalle de temps pendant lequel le nombre d'atomes radioactifs est réduit de moitié.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

$$\text{on en tire } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

La courbe exponentielle obtenue a l'allure du dessin ci-contre.



Représentation de la désintégration d'atomes radioactifs, en fonction du temps.

Remarque

L'inverse de la constante radioactive λ a la dimension d'un temps, elle se nomme vie moyenne τ (tau). C'est la durée nécessaire pour que le nombre d'atomes radioactifs soit réduit d'un facteur 1/e, soit environ 37 % de la valeur initiale.

L'activité **A** d'un échantillon radioactif est définie comme le nombre de désintégrations par seconde.

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$$

Cette activité, représentant la capacité d'une substance à se désintégrer, est mesurable. Son unité, historiquement basée sur la désintégration du radium 226, était le curie (symbole Ci, en l'honneur de Marie Curie), correspondant à $3,7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde (dps).

Actuellement, le système international (SI) donne comme unité d'activité le béquerel Bq.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde (dps)}$$

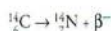
Cette unité est très petite (1 Ci correspond à $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq).

8 La datation archéologique par la méthode du carbone 14

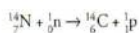
Le carbone naturel a trois isotopes importants:

$$^{12}\text{C} (98,89\%), \ ^{13}\text{C} (1,11\%), \ ^{14}\text{C} (\text{traces}).$$

Ce dernier est un isotope instable, dont la désintégration β⁻ est caractérisée par un temps de demi-vie (période) de 5730 ± 30 années. La réaction correspondante s'écrit:



Le pourcentage d'atomes de ¹⁴C dans le carbone total de la matière organique est une donnée relativement bien déterminée: la proportion de ¹⁴C dans la biosphère n'a pas varié au cours des âges. Le ¹⁴C est produit continuellement dans la couche supérieure de l'atmosphère par l'action des neutrons d'origine cosmique sur les atomes d'azote, ce qui peut se traduire par l'équation:



Le carbone se combine ensuite avec l'oxygène pour former du dioxyde de carbone radioactif, qui diffuse dans les couches les plus basses de l'atmosphère, puis s'intègre à la

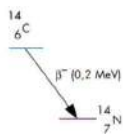


Schéma de désintégration du ¹⁴C.

biosphère par l'intermédiaire de la photosynthèse végétale. De là, il se transmet par la chaîne alimentaire aux organismes supérieurs, jusqu'à l'homme.

Les deux effets antagonistes, production dans la stratosphère et désintégration radioactive, font que le taux de ¹⁴C dans la biosphère est faible mais constant.

Nous pouvons dès lors supposer que la concentration en ¹⁴C dans tous les tissus végétaux vivants est la même, du fait que le dioxyde de carbone emprunté par les plantes à l'atmosphère contient une même proportion toujours constante de ¹⁴CO₂. A sa mort, l'organisme cesse d'absorber des composés carbonés: le ¹⁴C n'est donc plus renouvelé et sa concentration commence à décroître régulièrement sous l'effet de la désintégration. Dans la mesure où les composés contenant du ¹⁴C ne contaminent pas les restes d'un organisme, il suffit de mesurer la proportion de ¹⁴C par rapport au ¹²C pour évaluer la date de sa mort.

Considérons un échantillon de cette matière morte (bois, charbon, cadavre, ...) analysé t années après l'époque de la mort:

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T}}$$

$$\text{ou bien: } \ln N = \ln N_0 - 0,693 \cdot \frac{t}{T}$$

N_0 est le nombre de noyaux émetteurs présents dans l'échantillon au moment de la mort, et T la période du ¹⁴C.

Si les activités sont mesurées à l'aide d'un compteur, elles s'expriment par un nombre d'impulsions de courant (ou nombre de « coups ») en unité de temps. Le nombre initial d'impulsions (à l'instant $t = 0$) en une unité de temps, est aussi le nombre actuel caractérisant l'émission β⁻ d'une substance vivante, c'est-à-dire l'activité caractérisant l'équilibre en ¹⁴C mentionné ci-dessus.

Cette valeur est approximativement $14,9 \pm 0,2$ impulsions par minute et par gramme de carbone.

En utilisant un compteur d'une efficacité suffisante pour mesurer l'activité actuelle, et en tenant compte de la valeur de T, on peut déterminer l'époque de la mort de la matière analysée.

En général, la radioactivité de l'échantillon n'est plus mesurable avec une précision suffisante lorsqu'elle est tombée aux environs du 1/100 de sa valeur initiale, soit 0,15 désintégration par minute et par gramme de carbone. Cette limite est atteinte lorsque six périodes (soit environ 35 000 ans) se sont écoulées. Grâce à des appareils spéciaux (super spectromètres de masse et accélérateurs), on a réussi à repousser cette limite de datation au ¹⁴C jusqu'à 50 000 ans.



Chapitre 47. Les transformations de l'énergie électrique. Les lois de Kirchhoff

Un courant électrique ne s'établit pas spontanément dans un circuit : il est entretenu par un générateur dont le rôle est de fournir l'énergie nécessaire au déplacement des charges électriques (électrons) dans le circuit. Cette énergie « transportée » par le courant électrique (que l'on désignera dans la suite par l'expression « énergie électrique ») est transférée aux récepteurs du circuit qui la transforment afin de la rendre utilisable. On décrit dans ce chapitre les transformations de l'énergie électrique.

1 Générateurs et récepteurs

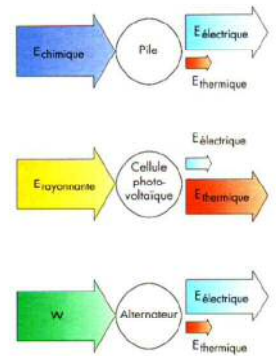
Les générateurs

Le courant électrique dans un fil métallique est un déplacement d'ensemble des électrons libres dans le fil. Durant leur mouvement, ces électrons libres subissent des « chocs » avec les atomes du fil et perdent leur énergie. Le rôle des générateurs est de « remplacer » constamment l'énergie dissipée lors des chocs afin de maintenir le courant électrique.

L'énergie que le générateur transfère au courant électrique est obtenue à partir d'une autre forme d'énergie qui dépend du type de générateur.

- Une pile ou une batterie transforme de l'énergie chimique en énergie électrique. Le courant électrique qui en résulte est un courant continu.
- Une cellule photovoltaïque transforme de l'énergie rayonnante en énergie électrique. Le courant électrique qui en résulte est un courant continu.
- Un alternateur transforme du travail W en énergie électrique. Le courant électrique qui en résulte est un courant alternatif.

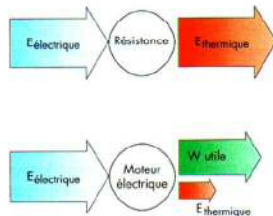
Durant ces transformations, une partie de l'énergie de départ est transformée en énergie thermique (chaleur).



Les récepteurs

Les récepteurs électriques sont des appareils qui transforment l'énergie électrique du courant en une part d'énergie thermique et le reste en une autre forme d'énergie utile. On donne ci-contre deux exemples de récepteurs électriques.

- Une *résistance* est un récepteur qui transforme toute l'énergie électrique du courant en énergie thermique. C'est le cas des radiateurs électriques ou des fers à repasser par exemple.
- Un *moteur électrique* est un récepteur qui transforme une partie de l'énergie électrique en énergie thermique (durant son utilisation le moteur chauffe) et le reste en travail utile.



2 Énergie du courant électrique

On considère deux points A et B d'un circuit électrique parcouru par un courant d'intensité I . On mesure entre A et B une différence de potentiel (tension) notée U .

Quel que soit le type de circuit compris entre A et B (fil, moteur, ...), la différence de potentiel U représente par définition le travail nécessaire pour déplacer une charge électrique de 1 C entre A et B.

L'énergie nécessaire au déplacement d'une charge quelconque q entre ces deux points est donnée par : $E = q \cdot U$.

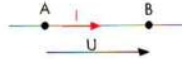
Par définition de l'intensité I du courant, la quantité de charge q transférée entre A et B pendant la durée Δt vaut : $q = I \cdot \Delta t$.

Il s'ensuit que l'énergie électrique transférée dans la portion de circuit AB pendant la durée Δt est donnée par :

$$E_{\text{électrique}} = U \cdot I \cdot \Delta t$$

On en déduit la puissance électrique disponible dans la portion de circuit AB :

$$P_{\text{électrique}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{\Delta t} = U \cdot I$$



3 Les récepteurs électriques

Il existe différents types de récepteurs que l'on distingue en fonction des formes d'énergie mises en jeu.

Exemple 1 : les résistances et l'effet Joule

Toute portion de circuit parcourue par un courant transforme au moins une partie de l'énergie électrique en énergie thermique; autrement dit, tout conducteur parcouru par un courant s'échauffe. Cet effet thermique du courant électrique est connu sous le nom de « *Effet Joule* ».

Une *résistance* est un récepteur électrique qui transforme toute l'énergie électrique en énergie thermique.

L'expérience révèle que la quantité de chaleur dissipée par une résistance parcourue par un courant d'intensité I pendant la durée Δt est :

- proportionnelle à la durée Δt ;
- proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

Ces propriétés se traduisent algébriquement par :

$$E_{\text{thermique}} = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$$

(Énergie thermique dissipée par effet Joule)

Le facteur de proportionnalité R (résistance) se mesure en ohms [Ω].

Remarque : le terme résistance désigne à la fois un récepteur électrique et une grandeur physique.

Le principe de *conservation de l'énergie* pour une résistance s'écrit :

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{thermique}}$$

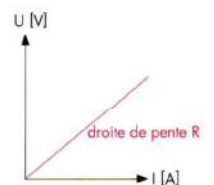
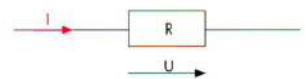
Cette relation peut s'écrire sous différentes formes équivalentes :

Equations caractéristiques d'une *résistance* :

Énergie : $U \cdot I \cdot \Delta t = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$

Puissance : $U \cdot I = R \cdot I^2$

Tension aux bornes d'une résistance : $U = R \cdot I$ (loi d'Ohm)



Relation tension - intensité pour une résistance.

Commentaires

Deux modèles permettent d'expliquer la transformation d'énergie électrique en énergie thermique.

- Les électrons se déplacent à vitesse constante dans le fil et la force électrique exercée sur chaque électron est équivalente à une force de frottement. Le mouvement des électrons est comparable au mouvement de billes coulant à vitesse constante dans de l'huile ou de l'eau. L'énergie potentielle électrique est transformée en chaleur par le travail des forces de frottement exercées sur les électrons, de la même manière que l'énergie potentielle de gravitation est transformée en chaleur par le travail des forces de frottement visqueux exercées sur les billes.
- Les électrons perdent leur énergie lors de collisions avec les atomes. Ces collisions augmentent l'amplitude de vibration des atomes et accroissent ainsi l'énergie interne, ce qui se manifeste au niveau macroscopique par une élévation de température de la résistance.

Lorsque sa température est plus élevée que celle de son environnement, la résistance cède de la chaleur à l'environnement. Rappelons que la chaleur est un transfert d'énergie dû uniquement à une différence de température. Dans des conditions stationnaires, l'énergie électrique transformée en énergie thermique par la résistance est continuellement transférée à l'environnement. Nous disons que l'énergie électrique est dissipée en chaleur par l'effet Joule.

Exemple 2: les moteurs et la tension contre-électromotrice

Un moteur transforme l'énergie électrique en une part de travail W_{utile} et le reste en énergie thermique par effet Joule.

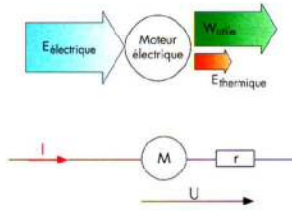
On considère un moteur alimenté sous une tension U et parcouru par un courant d'intensité I .

- La quantité d'énergie électrique fournie au moteur pendant la durée Δt vaut:

$$E_{\text{électrique}} = U \cdot I \cdot \Delta t$$

- La quantité d'énergie thermique dissipée dans le moteur pendant la durée Δt vaut:

$$E_{\text{thermique}} = r \cdot I^2 \cdot \Delta t$$



Exemple 3: les voltamètres et l'électrolyse

Un voltamètre est une cuve contenant un liquide conducteur appelé électrolyte (une solution d'eau salée par exemple). Deux électrodes de fer reliées à un générateur sont immergées dans le liquide. On applique une tension U entre les électrodes et le passage du courant électrique provoque diverses réactions chimiques au sein de l'électrolyte.

On appelle électrolyse l'ensemble des réactions chimiques ayant lieu à la surface de contact des électrodes et de l'électrolyte.

Une partie de l'énergie du courant électrique est transformée en énergie chimique et le reste est transformé en énergie thermique par effet Joule:

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{chimique}} + E_{\text{thermique}}$$

En procédant comme dans le cas du moteur, on définit la tension contre-électromotrice par:

$$U_0' = (U - r \cdot I)$$

La valeur de U_0' s'exprime en volts [V]. Cette valeur est la même que la quantité d'énergie chimique résultant du passage d'une charge de 1C. Le facteur r est la résistance interne du voltamètre; sa valeur varie avec la concentration de l'électrolyte.

- La quantité d'énergie transformée en énergie chimique pendant la durée Δt vaut:

$$E_{\text{chimique}} = U_0' \cdot I \cdot \Delta t$$

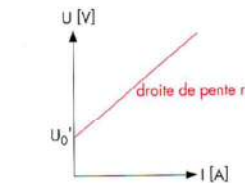
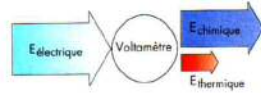
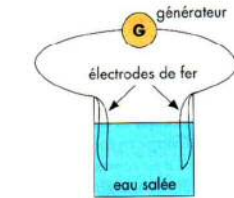
En utilisant les expressions des différentes formes d'énergie, le principe de conservation de l'énergie pour un voltamètre peut s'écrire sous différentes formes équivalentes:

Equations caractéristiques d'un voltamètre:

Energie: $U \cdot I \cdot \Delta t = U_0' \cdot I \cdot \Delta t + r \cdot I^2 \cdot \Delta t$

Puissance: $U \cdot I = U_0' \cdot I + r \cdot I^2$

Tension aux bornes d'un voltamètre: $U = U_0' + r \cdot I$



Relation tension - intensité pour un voltamètre.

Le facteur de proportionnalité r est la résistance interne du moteur et se mesure en ohms [Ω].

Le principe de conservation de l'énergie pour un moteur électrique s'écrit:

$$E_{\text{électrique}} = W_{\text{utile}} + E_{\text{thermique}}$$

ou

$$W_{\text{utile}} = E_{\text{électrique}} - E_{\text{thermique}}$$

On obtient en remplaçant les énergies électrique et thermique par leurs expressions:

$$W_{\text{utile}} = U \cdot I \cdot \Delta t - r \cdot I^2 \cdot \Delta t = (U - r \cdot I) \cdot I \cdot \Delta t = U_0' \cdot I \cdot \Delta t$$

Par définition, la quantité

$$U_0' = (U - r \cdot I)$$

est la tension contre-électromotrice du moteur.

La valeur de U_0' s'exprime en volts [V]. Cette valeur est la même que la quantité de travail disponible sur l'arbre du moteur lorsqu'il est traversé par une charge de 1C. U_0' varie en fonction du régime du moteur.

- La quantité de travail pendant la durée Δt vaut:

$$W_{\text{utile}} = U_0' \cdot I \cdot \Delta t$$

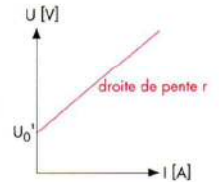
En utilisant les expressions des différentes formes d'énergie, le principe de conservation de l'énergie pour un moteur électrique peut s'écrire sous différentes formes équivalentes:

Equations caractéristiques d'un moteur:

Energie: $U \cdot I \cdot \Delta t = U_0' \cdot I \cdot \Delta t + r \cdot I^2 \cdot \Delta t$

Puissance: $U \cdot I = U_0' \cdot I + r \cdot I^2$

Tension aux bornes d'un moteur: $U = U_0' + r \cdot I$

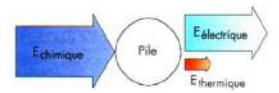


Relation tension - intensité pour un moteur électrique.

4 Les générateurs

Les transformations d'énergie réalisées par un générateur

Un générateur électrique est un appareil qui transforme une forme donnée d'énergie en énergie électrique transférée au circuit sur lequel il est connecté et en énergie thermique (durant son utilisation, le générateur chauffe). Une pile transforme de l'énergie chimique en énergie électrique et en énergie thermique.



La tension électromotrice d'une pile électrique

Le principe de conservation de l'énergie appliqué à une pile s'écrit:

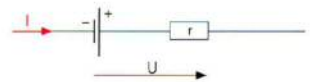
$$E_{\text{chimique}} = E_{\text{électrique}} + E_{\text{thermique}}$$

— $E_{\text{électrique}} = U \cdot I \cdot \Delta t$

où U est la tension mesurable aux bornes de la pile lorsqu'elle débite un courant d'intensité I pendant la durée Δt .

— $E_{\text{thermique}} = r \cdot I^2 \cdot \Delta t$
où r est la résistance interne de la pile.

— $E_{\text{chimique}} = E_{\text{électrique}} + E_{\text{thermique}}$
 $= U \cdot I \cdot \Delta t + r \cdot I^2 \cdot \Delta t$
 $= (U + r \cdot I) \cdot I \cdot \Delta t$
 $= U_0 \cdot I \cdot \Delta t$



Par définition, la quantité

$$U_0 = (U + r \cdot I)$$

est la tension électromotrice de la pile.

La valeur de U_0 s'exprime en volts [V]. Cette valeur est la même que la quantité d'énergie chimique transformée par la pile lorsqu'elle transfère une charge de 1C dans le circuit sur lequel elle est connectée.

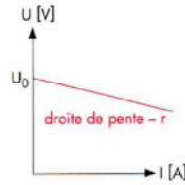
A partir des expressions des différentes formes d'énergie, le principe de conservation de l'énergie pour une pile électrique peut s'écrire sous différentes formes équivalentes :

Equations caractéristiques d'une pile :

Energie : $U \cdot I \cdot \Delta t = U_0 \cdot I \cdot \Delta t - r \cdot I^2 \cdot \Delta t$

Puissance : $U \cdot I = U_0 \cdot I - r \cdot I^2$

Tension aux bornes d'un moteur : $U = U_0 - r \cdot I$



Relation tension - intensité pour un générateur.

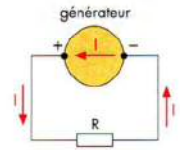
Piles et batteries

Une batterie est désignée en général par la valeur approximative de sa tension électromotrice. Chaque batterie est constituée d'une ou plusieurs cellules de base dont la tension électromotrice dépend des constituants chimiques utilisés. Les piles ont en général une tension électromotrice proche de 1,5 V (ou d'un multiple); les batteries des véhicules ont une tension électromotrice proche d'un multiple de 2 V; les accumulateurs Ni-Cd (piles rechargeables) ont une tension électromotrice proche d'un multiple de 1,2 V.

Dans des conditions d'utilisation normales, la tension électromotrice est indépendante de l'état de charge de la pile. La résistance interne d'une pile neuve (environ 1 Ω), d'une batterie chargée de voiture (environ 0,005 Ω) est en général négligeable vis-à-vis de la résistance globale du circuit. Cependant, la résistance interne tend à augmenter avec l'usage de la pile, ou sa décharge, ce qui diminue fortement la tension aux bornes lorsque la batterie fournit du courant. Une pile est hors d'usage lorsque sa résistance interne est devenue trop grande.

5 Sens du courant dans le circuit et dans le générateur

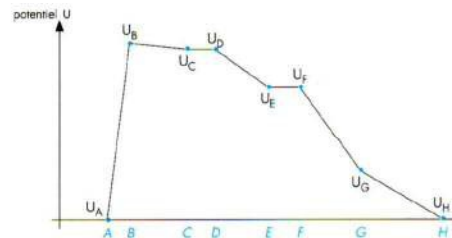
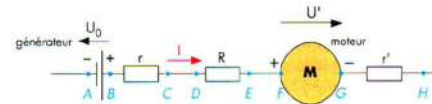
Historiquement, le sens du courant électrique a été arbitrairement choisi avant la découverte de l'électron. Malheureusement, le sens conventionnel du courant est opposé à celui des électrons. Dans le circuit, à l'extérieur du générateur, le courant circule conventionnellement de la borne de potentiel élevé (borne positive) à la borne de potentiel bas (borne négative). Dans tout récepteur, le courant circule conventionnellement de la borne positive vers la borne négative.



Le courant circule conventionnellement du + au - dans le circuit, et du - au + dans le générateur.

Le générateur joue un rôle analogue à celui d'une pompe qui « élève » de l'eau ou à celui d'un skilift qui hisse les skieurs du bas d'une piste jusqu'au sommet.

En suivant le sens du courant, le potentiel augmente d'une borne à l'autre du générateur alors qu'il diminue d'une borne à l'autre des récepteurs.



Accumulateurs Ni-Cd (ou piles rechargeables)

Une pile rechargeable peut être considérée comme un générateur lorsqu'elle se « décharge » dans un circuit ou comme un récepteur, lorsqu'elle est « chargée » par le circuit électrique.

- Lorsque la pile est utilisée comme générateur, le courant la traverse du - au +.
- Lorsque la pile est en train d'être rechargée, le courant va du + au - à l'intérieur de la pile, comme dans tout récepteur.

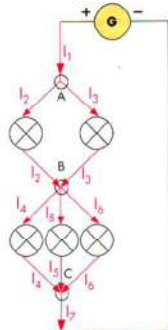
6 Les lois de Kirchhoff

Première loi de Kirchhoff ou loi des nœuds (conservation de la charge)

Un nœud est un point d'un circuit électrique où plusieurs fils se joignent. Dans le schéma ci-contre représentant un circuit constitué de plusieurs ampoules, les nœuds sont les points A, B et C.

Plusieurs circonstances peuvent se présenter :

- un courant arrive au nœud et se sépare en plusieurs courants qui repartent du nœud (point A);
- plusieurs courants arrivent au nœud et se rassemblent en un courant qui repart du nœud (point C);
- dans le cas général, plusieurs courants arrivent au nœud et se répartissent en plusieurs courants qui repartent du nœud (point B).



La première loi de Kirchhoff exprime le principe de conservation de la charge: il n'y a ni perte de charges électriques dans le circuit ni accumulation de charges électriques dans une portion de circuit.

Ainsi, la somme des intensités des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui repartent du nœud :

Loi des nœuds

Pour chaque nœud d'un circuit :

$$\sum I \text{ arrivant au nœud} = \sum I \text{ repartant du nœud}$$

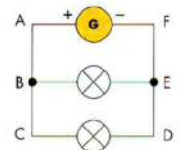
La loi des nœuds appliquée au circuit précédent se traduit par trois équations :

en A : $I_1 = I_2 + I_3$; en B : $I_2 + I_3 = I_4 + I_5 + I_6$;
 en C : $I_4 + I_5 + I_6 = I_7$

Deuxième loi de Kirchhoff ou loi des mailles (conservation de l'énergie)

Une maille est une portion fermée d'un circuit complexe. Le circuit de l'exemple ci-contre contient trois mailles différentes :

- première maille : ABEF;
- deuxième maille : ACDF;
- troisième maille : BCDE.



Considérons un circuit formé d'une maille contenant :

- une pile de tension électromotrice U_0 et de résistance interne r ;
- un moteur de tension contre-électromotrice U'_0 et de résistance interne r' ;
- une résistance R .

L'énergie chimique de la pile qui débite un courant d'intensité I pendant la durée Δt est donnée par :

$$E_{\text{chimique}} = U_0 \cdot I \cdot \Delta t$$

elle est transformée en :

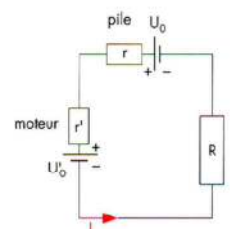
- énergie thermique par la résistance interne r de la pile : $E_{\text{thermique}} = r \cdot I^2 \cdot \Delta t$;
- travail par le moteur : $W = U'_0 \cdot I \cdot \Delta t$;
- énergie thermique par la résistance interne r' du moteur : $E'_{\text{thermique}} = r' \cdot I^2 \cdot \Delta t$;
- énergie thermique par la résistance R : $E''_{\text{thermique}} = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$;

Par conservation de l'énergie, on a :

$$U_0 \cdot I \cdot \Delta t = U'_0 \cdot I \cdot \Delta t + r \cdot I^2 \cdot \Delta t + r' \cdot I^2 \cdot \Delta t + R \cdot I^2 \cdot \Delta t$$

ou

$$U_0 = U'_0 + r \cdot I + r' \cdot I + R \cdot I$$



Cette propriété constitue la seconde loi de Kirchhoff. Elle peut être généralisée à n'importe quelle maille d'un circuit complexe comportant plusieurs générateurs et récepteurs.

Loi des mailles

Pour chaque maille d'un circuit:

$$\sum U_0 = \sum U'_0 + \sum R \cdot I$$

- $\sum U_0$ est la somme des tensions électromotrices de chaque générateur présent dans la maille;
- $\sum U'_0$ est la somme des tensions contre-électromotrices de chaque récepteur présent dans la maille;
- $\sum R \cdot I$ est la somme des produits de chaque résistance de la maille (y compris celle des générateurs et des récepteurs) par l'intensité du courant qui la traverse.

Chapitre 48. La relativité

Assis dans un train, à la gare, je regarde par la fenêtre et vois le train d'à côté bouger. Ma sensation est bizarre car je n'arrive pas à dire lequel des trains, le mien ou celui d'à côté, démarre. Pour le voyageur du train d'à côté, sa sensation est la même! Tout est donc une question de point de vue; chaque voyageur peut considérer que, relativement à lui, c'est l'autre qui bouge! C'est en cela que réside la notion de relativité des mouvements.

1 Le référentiel galiléen

Le principe de la relativité des mouvements est connu depuis 1638 et fut énoncé par Galilée. Imaginons un bateau qui rentre au port à une vitesse constante en longeant le quai. Le bateau, le marin et tout ce qu'il transporte est un système de référence que les physiciens appellent « référentiel galiléen ». Le principe de la relativité des mouvements n'est valable que dans un référentiel galiléen; un train, un avion, la Terre sont vus comme de tels référentiels dans la mesure où ils sont animés d'un mouvement rectiligne et uniforme, c'est-à-dire s'ils sont immobiles ou se déplacent l'un par rapport à l'autre en ligne droite et à vitesse constante. Si le mouvement est accéléré, le principe de la relativité galiléenne ne s'applique plus.



Des exemples de référentiels galiléens.

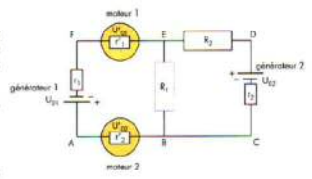
Mode d'emploi des lois de Kirchhoff

Les lois de Kirchhoff permettent de calculer les tensions et les intensités des courants dans un circuit complexe comprenant différents générateurs et récepteurs. Ce paragraphe donne une marche à suivre illustrée pour l'application des lois de Kirchhoff.

Problème

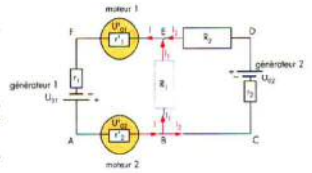
On considère un circuit contenant deux générateurs, deux moteurs et deux résistances. Les valeurs de toutes les tensions électromotrices, de toutes les tensions contre-électromotrices et de toutes les résistances sont connues.

Calculer les valeurs de toutes les intensités des courants dans le circuit.



Marche à suivre

1. Représenter par des flèches sur le schéma les différents courants dans le circuit:
 - le courant sort du générateur par la borne + et y retourne par la borne -;
 - s'il n'est pas possible de prévoir le sens de certains courants, choisir un sens arbitraire.
 Nommer ces courants.



2. Recenser le nombre de grandeurs à calculer; le nombre d'équations à établir par les lois de Kirchhoff doit être égal au nombre d'inconnues.

Dans notre problème, trois intensités sont à calculer; il faut donc trois équations.

3. Appliquer la loi des nœuds.

$$\text{En B ou en E: } I = I_1 + I_2$$

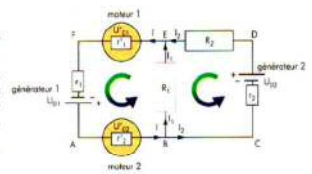
4. Appliquer la loi des mailles:

- le nombre de mailles à étudier est égal au nombre d'équations nécessaires pour compléter le système;
- pour chaque maille étudiée, choisir un sens de parcours; les intensités des courants parcourant la maille dans le même sens sont comptées positivement et les intensités des courants parcourant la maille dans l'autre sens sont comptées négativement.

$$\text{Maille ABEF: } U_{01} = U'_{01} + U'_{02} + r_1 \cdot I - r'_1 \cdot I + r'_2 \cdot I + R_1 \cdot I_1$$

$$\text{Maille BCDE: } U_{02} = r_2 \cdot I_2 + R_2 \cdot I_2 - R_1 \cdot I_1$$

5. Résoudre algébriquement le système d'équations (si l'on obtient une valeur négative pour une certaine intensité, cela signifie que le sens réel du courant correspondant est opposé au sens choisi initialement).



2 Le principe de relativité

Sur le bateau naviguant à vitesse constante, en haut du mât, un marin lâche un objet. Il observe que l'objet tombe verticalement au pied du mât, de la même manière que si le bateau était arrêté. Le comportement de l'objet est inchangé par le mouvement du bateau.

Cette expérience répétée dans n'importe quel référentiel galiléen donnera toujours le même résultat. En d'autres termes, les lois de la nature sont les mêmes partout dans la mesure où les objets se déplacent les uns par rapport aux autres à une vitesse constante ou nulle. C'est le principe de la relativité galiléenne.



3 La règle de Galilée

La règle de Galilée permet de déterminer la vitesse des objets situés dans des référentiels différents. En effet, selon le point de vue de l'observateur, la vitesse d'un objet ne sera pas la même. Pour déterminer cette vitesse, Galilée applique une règle très simple: celle de la composition des vitesses.

La composition des vitesses

- Une première voiture roule à 80 km/h par rapport au sol. Une autre voiture la dépasse à 100 km/h. Du point de vue du conducteur de la première voiture, la vitesse apparente de la deuxième voiture par rapport à lui est de 20 km/h. La vitesse apparente dans ce cas est égale à la différence des vitesses des voitures.
- Si la première voiture croise une autre voiture qui roule à 100 km/h par rapport au sol, alors du point de vue du conducteur de la première voiture, la vitesse apparente de la deuxième voiture par rapport à lui est de 180 km/h. La vitesse apparente dans ce cas est égale à l'addition des vitesses des voitures.



Dans les deux cas, la balle tombe au pied du mât.



Des exemples de référentiels galiléens.

Il arrive qu'un mobile se déplace sur un « support » qui est lui-même en mouvement.

C'est le cas, par exemple, d'un bateau qui se déplace dans le courant d'un fleuve. Bien que le bateau soit orienté perpendiculairement à la rive, le courant le déporte constamment et sa trajectoire n'est pas perpendiculaire à la rive.

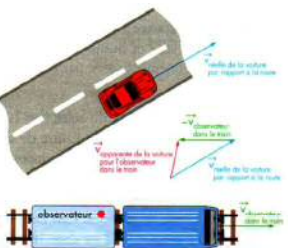
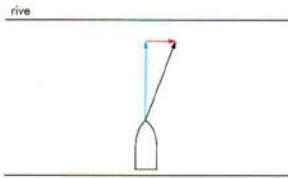
On détermine la vitesse du bateau par rapport à la rive (vitesse réelle) par addition vectorielle de la vitesse du bateau par rapport à l'eau et de la vitesse de l'eau par rapport à la rive.

Un observateur n'est pas forcément immobile. C'est le cas d'une personne dans un train en marche qui observe le mouvement d'une voiture sur une route qui passe sous les voies.

La vitesse « réelle » de la voiture à la direction de la route; son intensité est indiquée par le compteur de la voiture. C'est sa vitesse par rapport au sol.

Pour l'observateur dans le train, la vitesse « apparente » de la voiture se détermine de la façon suivante: on soustrait au vecteur représentant la vitesse « réelle » de la voiture (par rapport au sol) le vecteur représentant la vitesse du train (vitesse de l'observateur par rapport au sol).

L'observateur voit la voiture se déplacer avec la vitesse apparente représentée en rouge sur le schéma.



4 Le principe de Galilée et la lumière

Imaginons une sonde spatiale s'éloignant de la Terre à une vitesse de 10 km/s. Elle émet de la lumière (vitesse de la lumière: $c = 299\,792\,458$ km/s) en direction de la Terre. Selon la règle de Galilée, si on mesure la vitesse de la lumière émise par la sonde, on devrait obtenir une valeur de $c - 10$ km/s. Si la sonde s'approchait de la Terre, on devrait mesurer $c + 10$ km/s. Toutefois, l'observateur terrestre constaterait que la vitesse de la lumière dans les

Cette expérience répétée de nombreuses fois avec une précision toujours accrue a toujours donné un résultat nul. Aucune différence n'a été mesurée, quelle que soit l'orientation du système.

Les conclusions de cette expérience sont que l'éther n'existe pas, qu'il n'existe pas de référentiel absolu et que la lumière n'a pas besoin de support pour se propager. Einstein interpréta les résultats de cette expérience comme étant la preuve que la vitesse de la lumière reste toujours la même, que l'observateur ou la source de lumière soit en mouvement ou pas.

6 Les principes de la relativité restreinte

En 1905, Albert Einstein formula les deux principes de la relativité restreinte.

Le premier principe: toutes les lois de la physique sont les mêmes dans n'importe quel référentiel galiléen.

Le second principe: la vitesse de la lumière est toujours égale à c (299 792 458 km/s dans le vide), quelle que soit la vitesse du corps qui émet cette lumière.

Ces deux principes semblent contradictoires. En effet, parmi les lois qui satisfont au premier principe figure celle de l'addition des vitesses. Or appliquer cette loi à la lumière va à l'encontre du deuxième principe qui stipule que la vitesse de la lumière est constante. Einstein a pu lever cette contradiction en abandonnant nos conceptions de l'espace et du temps. La loi de composition des vitesses emprunte à la mécanique classique deux hypothèses non justifiées:

- l'intervalle de temps entre deux événements est indépendant du mouvement du système de référence;
- la distance spatiale de deux points d'un corps rigide est indépendante du mouvement du système de référence.

Si l'on rejette ces deux hypothèses, la contradiction disparaît car la loi de composition des vitesses n'est plus valable.

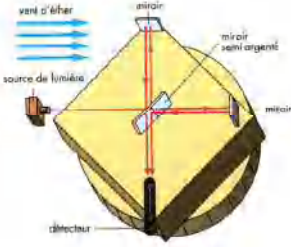
deux cas est toujours égale à c . On ne peut pas ajouter ou soustraire la vitesse de la source lumineuse à la vitesse de la lumière. La vitesse de la lumière est une frontière de la nature absolument infranchissable. C'est ce principe de relativité des mouvements associé à des connaissances constatées ou mesurées sur la lumière qui guida les travaux d'Einstein dans l'énoncé de sa théorie de « la relativité restreinte ».

5 L'expérience de Michelson et Morley

En 1887, Albert Michelson et Edward Morley tentent de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à un référentiel absolu appelé « éther ». Cet éther était également supposé être le support dont la lumière a besoin pour se déplacer, comme les ondes sonores ont besoin de l'air pour se propager. On imaginait l'éther comme une substance invisible, une sorte de gelée presque immatérielle et immobile qui remplissait tout l'espace. Le raisonnement suivi par Michelson et Morley est le suivant:

Dans son mouvement autour du Soleil ($v = 100\,000$ km/h), la Terre subit, à un moment où l'autre de son orbite, un vent d'éther qui souffle dans le sens opposé. Si on émet un rayon de lumière parallèlement au mouvement de la Terre, le rayon va contre le vent d'éther. Selon les règles de Galilée, la vitesse du rayon devrait être diminuée de la vitesse du vent d'éther. S'il va dans le sens opposé au mouvement de la Terre, la vitesse du rayon devrait être augmentée par celle du vent d'éther.

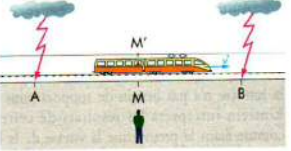
Le système imaginé par Michelson et Morley est un système optique monté sur un bloc flottant sur un bain de mercure; ceci permet de faire pivoter le système en évitant les vibrations parasites (voir schéma). Les rayons émis à partir de la source lumineuse sont séparés par un miroir semi-argenté. Les deux rayons sont alors réfléchis sur des miroirs et parcourent la même distance avant d'être réunis au niveau du détecteur. Suivant la position du système, les rayons devraient être portés ou freinés par le vent d'éther. Cette différence de vitesse doit se traduire par des déplacements significatifs des franges d'interférence de l'image dans le détecteur.



Dans sa course autour du Soleil, la Terre doit provoquer l'apparition d'un « vent d'éther », pensaient les physiciens avant Einstein.

La relativité de la simultanéité

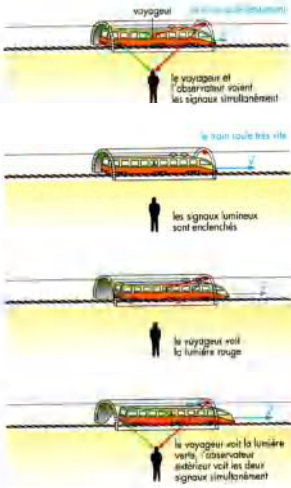
Un homme est au bord d'une voie ferrée, exactement au milieu M de deux points A et B très éloignés l'un de l'autre. Au même instant, un train passe à une vitesse v (très grande) et un voyageur se trouve dans la position M' qui coïncide avec la position M. Deux éclairs se produisent alors simultanément par rapport à la voie ferrée en A et en B. L'homme au bord de la voie ferrée dira que les deux éclairs ont eu lieu simultanément car il les voit en même temps, le temps mis par la lumière pour lui parvenir étant le même. Le voyageur, par contre, verra l'éclair issu de B avant celui issu de A. En effet, durant le temps que met la lumière de l'éclair ayant eu lieu en A pour lui parvenir, il aura parcouru une certaine distance en direction de B; le point M' où il se situera sera plus proche de B que de A. Le voyageur ne considérera donc pas les éclairs comme simultanés. La simultanéité est donc relative. Elle dépend du référentiel de l'observateur. L'intervalle de temps entre deux événements est dépendant du mouvement du système de référence.



Si les éclairs sont simultanés pour l'homme sur le quai, ils ne le sont pas pour le voyageur assis dans le train qui percevra l'éclair en B avant l'éclair en A.

La relativité de la distance spatiale

Un train est dans un tunnel qui mesure exactement la longueur du train. A chaque extrémité du tunnel, on installe un système lumineux. Celui qui est à l'entrée du tunnel émet une lumière verte à l'instant où la queue du train est à sa hauteur alors que celui qui est à la sortie du tunnel émet une lumière rouge à l'instant où l'avant du train est à sa hauteur. Lorsque le train avance lentement par rapport à la vitesse de la lumière, le voyageur assis au milieu du train et l'observateur extérieur perçoivent simultanément les lumières verte et rouge. Le train et le tunnel ont donc la même longueur. Imaginons le train se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière à travers le tunnel. Pour l'observateur extérieur, les deux lumières lui parviennent simultanément; le tunnel et le train ont donc la même longueur. Le voyageur dans le train se déplace vers la sortie du tunnel et la lumière rouge. Il s'éloigne de l'entrée du tunnel et de la lumière verte. Il percevra donc la lumière rouge avant la lumière verte. Ce constat signifie pour lui que le train a atteint la sortie du tunnel avant que la queue du train ne soit entrée dans le tunnel. En conséquence, comme le train dans lequel il se trouve mesure toujours la même longueur (il peut le vérifier), il se doit de conclure que le

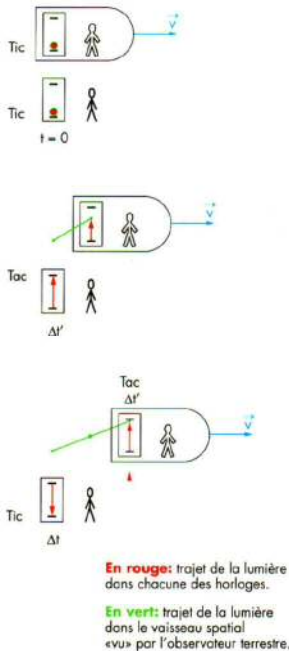


tunnel a rétréci. La distance spatiale est donc relative et dépend du référentiel de l'observateur. La distance spatiale de deux points d'un corps rigide est dépendante du mouvement du système de référence.

7 Le temps se dilate, les longueurs se contractent

Imaginons une horloge à lumière munie de deux miroirs parallèles placés verticalement face à face. Un flash de lumière rebondit successivement sur chaque miroir, le miroir du bas produisant un « tic » et celui du haut un « tac ». A partir de la distance entre les miroirs et de la vitesse de la lumière, on peut en déduire le temps que met la lumière pour parcourir le trajet. Cette horloge va permettre de mieux comprendre la notion de relativité du temps.

On équipe un vaisseau spatial transparent d'une telle horloge et on la synchronise avec une autre horloge que l'on garde sur Terre. Mettons en route les deux horloges et faisons circuler le vaisseau spatial à une vitesse proche de celle de la lumière. A l'instant où l'horloge du vaisseau spatial est exactement à la verticale de l'horloge terrestre, les deux horloges émettent un « tic ». Après un certain temps, la lumière des horloges atteint le second miroir et émet un « tac ». Pour l'observateur sur Terre tout comme pour le voyageur dans le vaisseau, la durée entre un « tic » et un « tac » a été le même (Δt). Toutefois, pour l'observateur terrestre, la durée mise par l'horloge du vaisseau pour faire « tic-tac » a été plus longue que celle mesurée sur sa propre horloge. En effet, à ses yeux le trajet effectué par la lumière dans le vaisseau spatial est oblique et donc plus long que le trajet vertical de sa propre horloge (voir schéma). Comme la vitesse de la lumière est constante, il se sera écoulé une durée plus longue entre le « tic » et le « tac » de l'horloge dans le vaisseau. L'horloge du vaisseau retardera donc par rapport à celle restée sur Terre. Remarquons que pour le voyageur, la réciproque est aussi vraie. Lui aussi aura l'impression que l'horloge restée sur Terre retarde, car de son point de vue, c'est la Terre qui se déplace à grande vitesse.



Reportons dans un graphique les positions successives de la lumière des deux horloges et celle du vaisseau du point de vue de l'observateur terrestre (voir graphique). Pour produire un « tic-tac », l'horloge du vaisseau a nécessité une durée Δt (courbe verte) et franchi une distance $c \cdot \Delta t$. Le vaisseau, quant à lui, a parcouru une distance $v \cdot \Delta t$ (courbe bleue). La hauteur de l'horloge dans le vaisseau qui est perpendiculaire au déplacement du vaisseau n'est pas affectée par sa vitesse. En appliquant le théorème de Pythagore, l'horloge dans le vaisseau a une hauteur égale à :

$$\sqrt{(c^2 - v^2)} \cdot \Delta t$$

L'horloge restée sur Terre a produit un « tic-tac » en $\Delta t'$ secondes et a parcouru une distance $c \cdot \Delta t'$ égale à la hauteur de l'horloge (courbe rouge). Les horloges ayant la même hauteur, on a alors l'égalité :

$$c \cdot \Delta t' = \sqrt{(c^2 - v^2)} \cdot \Delta t$$

que l'on peut écrire :

$$\Delta t' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \Delta t$$

Cette dernière expression montre que, du point de vue de l'observateur terrestre, la durée d'un « tic-tac » sur Terre est inférieure à la durée d'un « tic-tac » de l'horloge dans le vaisseau spatial, le contenu de la racine étant obligatoirement inférieur à 1.

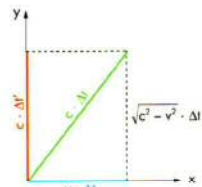
L'écoulement du temps de l'horloge du vaisseau se trouve dilaté par rapport à l'écoulement du temps sur Terre. L'horloge du vaisseau fonctionne plus lentement. L'expression qui décrit ce phénomène est la suivante :

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

On constate que pour des vitesses proches de celle de la lumière, pour un observateur extérieur, l'écoulement du temps apparent de l'objet en mouvement tend vers l'infini.

On remarque également que si la vitesse du vaisseau dépasse la vitesse de la lumière, le contenu de la racine devient négatif et son résultat fait partie des nombres imaginaires. C'est une des raisons pour laquelle on considère la vitesse de la lumière comme un mur infranchissable.

On peut montrer également que la longueur d'une règle rigide qui se déplace à une vitesse v dans le sens de sa longueur est modifiée du point de vue d'un observateur



extérieur. Un raisonnement analogue à celui sur la dilatation du temps conduit à montrer que les longueurs se contractent selon la règle :

$$L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot L'$$

où L' est la longueur de la règle dans un référentiel au repos et L la longueur apparente de la règle en mouvement.

La dilatation des temps conduit nécessairement à la contraction des longueurs.

8 Des preuves expérimentales

Les résultats précédents sont surprenants et l'on ne peut se contenter « d'expériences par la pensée ». Une première preuve expérimentale de la réalité de la relativité restreinte fut apportée par l'observation des rayons cosmiques qui sont essentiellement composés de protons. Ces protons se déplacent dans l'espace à des vitesses proches de celle de la lumière. Lorsqu'ils pénètrent dans notre atmosphère, ils entrent en collision avec les molécules d'air. Lors de ces collisions, les rayons cosmiques produisent des particules appelées muons.

Des expériences semblables réalisées dans les accélérateurs produisent également des muons. En mesurant la durée de vie moyenne des muons en laboratoire, on obtient 1,5 milliardième de seconde. Cela veut dire qu'après 1,5 milliardième de seconde, il ne reste que la moitié des muons produits par les collisions, après 3 milliardièmes de seconde il n'en reste qu'un quart, etc.

Il en va de même pour les muons produits par les rayons cosmiques. Comme ces derniers ont une vitesse proche de celle de la lumière (300 000 km/s), la moitié des muons parcourent une distance de 450 m, le quart 900 m, le huitième 1350 m. Créés à 15 000 m d'altitude, les muons cosmiques ne devraient jamais atteindre les détecteurs placés par l'homme au niveau de la mer. Or, beaucoup de muons y parviennent ! Des mesures précises montrent que du point de vue d'un observateur terrestre, un muon existe en réalité environ 9 fois plus longtemps qu'en laboratoire. Cette différence provient, comme l'a prévu Einstein, de la



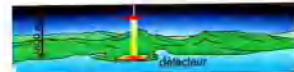
Ce que voit l'observateur terrestre : le temps de vie du muon s'est dilaté.

vitesse des muons. Pour un observateur terrestre, la durée de vie des muons se dilate.

Du point de vue du muon, sa durée de vie est toujours de 1,5 milliardième de seconde. Il « voit » la Terre se rapprocher à une vitesse proche de celle de la lumière. Pour qu'un nombre de muons en concordance avec les résultats expérimentaux puissent atteindre le sol avant de se désintégrer, la surface ne doit pas être éloignée de plus de 1600 m. La Terre subit donc une formidable contraction des distances ; les 15 000 m d'atmosphère se contractent à une épaisseur de 1600 m, des montagnes hautes de 3000 m n'ont, pour le muon, que la hauteur d'une colline de 330 m.

Ce phénomène de dilatation du temps est du reste exploité par les physiciens qui étudient des particules produites lors de collisions dans des accélérateurs de particules comme le CERN. Certaines de ces particules (les pions, les kaons, ...) se désintègrent spontanément plus de 100 fois plus vite que les muons. En raison du phénomène de la dilatation du temps, ces particules peuvent parcourir des distances supérieures à 100 m (au lieu d'un mètre environ du point de vue des particules) et ainsi être utilisées pour d'autres expériences.

Une autre expérience permet de vérifier les prédictions d'Einstein. Elle fut réalisée en 1971. Deux horloges sont parfaitement synchronisées ; l'une d'entre elles fut installée dans un avion et l'autre laissée sur place. L'avion fait le tour de la Terre dans le sens de sa rotation puis revient à son point de départ. A l'arrivée, le temps indiqué par l'horloge embarquée dans l'avion retarde très légèrement par rapport à celle restée sur place ; ce retard mesuré correspond exactement à la valeur calculée. Si l'avion avait fait le tour de la Terre dans l'autre sens, l'horloge embarquée aurait légèrement avancé par rapport à celle restée sur place.



Ce que voit le muon : les longueurs de la Terre se sont contractées.



Les deux horloges sont synchronisées.



L'avion fait le tour de la Terre dans le sens de sa rotation.



L'horloge dans l'avion retarde par rapport à celle restée sur place.

9 La relativité de la masse inerte

Le deuxième principe de la relativité restreinte indique que la vitesse de la lumière est constante et qu'il n'est pas possible pour un corps matériel ($m \neq 0$) de l'atteindre. Selon la seconde loi de Newton, la force est égale à la masse multipliée par son accélération ($F = m \cdot a$). La masse est ainsi une mesure de l'inertie d'un corps, c'est-à-

dire la résistance qu'il oppose à l'accélération qu'on veut lui communiquer. Selon cette loi, si on applique une force constante à un objet, il finira tôt ou tard par atteindre voire dépasser la vitesse de lumière.

La contradiction provient du fait que l'on mélange des concepts newtoniens et des concepts relativistes. Dans le raisonnement newtonien, on suppose que la masse inerte reste constante et égale à la masse qui représente la quantité de matière. Si cette dernière ne change pas (l'objet est toujours constitué de la même quantité d'atomes), il n'en va pas de même de la masse inerte. Quand un objet se déplace par rapport à un observateur sur la Terre, sa masse inerte augmente avec sa vitesse. Quand la vitesse s'approche de la vitesse de la lumière, sa masse inerte augmente fortement. A la vitesse de la lumière, la masse inerte serait infinie et il faudrait une force infinie pour l'accélérer.

Mathématiquement, on exprime cette loi de la manière suivante:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

où m_0 est la masse inerte de l'objet au repos, v la vitesse de déplacement par rapport au référentiel au repos et m la masse inerte en mouvement.

10 Les jumeaux de Langevin

En 1911, Paul Langevin imagina un exemple étonnant de la dilatation du temps connu sous le nom de « paradoxe des jumeaux ». Alain et Paul sont des vrais jumeaux et ont 20 ans. Alain l'aventurier décide d'entreprendre un voyage vers Véga située à 26 années-lumière de la Terre à bord d'une superfusée qui file à 287 000 km/s (96% de la vitesse de la lumière). Paul reste sur Terre. Une fois près de Véga, Alain fait demi-tour et revient sur Terre. Paul l'attend au spatio-drome et reconnaît à peine son frère. En effet, Alain a 35 ans alors que Paul a 72 ans. Les deux jumeaux n'ont plus le même âge.

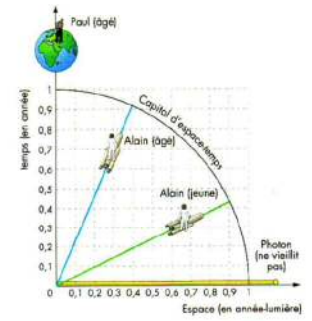
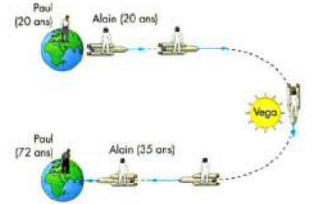
Le paradoxe des jumeaux de Langevin apparaît lorsqu'on se place du point de vue d'Alain l'aventurier. En effet, pour

au repos		$m = 1 \text{ kg}$
		$m_{\text{inerte}} = 1 \text{ kg}$
		$m = 1 \text{ kg}$
		$v = 250\,000 \text{ km/s}$
		$m_{\text{inerte}} = 1,8 \text{ kg}$
		$m = 1 \text{ kg}$
		$v = 299\,000 \text{ km/s}$
		$m_{\text{inerte}} = 13 \text{ kg}$
		$m = 1 \text{ kg}$
		$v = 299\,791 \text{ km/s}$
		$m_{\text{inerte}} = 387 \text{ kg}$

lui, c'est la Terre qui s'éloigne à 96% de la vitesse de la lumière. D'après lui, c'est Paul qui devrait être âgé de 35 ans et lui-même de 72 ans. Donc chacun des deux jumeaux devrait être à la fois plus jeune et plus âgé que l'autre, ce qui n'est évidemment pas possible.

Si le fait qu'un des jumeaux puisse vieillir plus rapidement que l'autre soit compréhensible en raison de la relativité du temps, le paradoxe des jumeaux nous semble totalement absurde. Toutefois, ce paradoxe se base sur un principe de symétrie qui n'est vrai que si chaque vaisseau (la superfusée et la Terre) se déplace selon un mouvement rectiligne à vitesse constante. Les deux vaisseaux n'ont en effet pas des mouvements symétriques; la superfusée d'Alain a dû accélérer depuis la Terre, ralentir pour tourner autour de Véga, réaccélérer pour entamer son retour vers la Terre et enfin freiner pour atterrir. Paul, quant à lui, n'a pas eu à subir toutes ces variations de vitesses. Les voyages d'Alain et de Paul ne sont pas symétriques et la conclusion qu'impose cet état de fait est qu'un seul des jumeaux a vieilli plus que l'autre. C'est bien Paul qui aura 72 ans et Alain l'aventurier 35 ans.

La démonstration mathématique est relativement lourde et dépasse le cadre de ce livre. Les notions d'espace-temps développées dans le cadre de la théorie de la relativité générale d'Einstein (parfois appelée théorie de la gravitation) sont à la base du raisonnement qui permet de démontrer mathématiquement la solution à ce paradoxe. On peut toutefois approcher cette démonstration à l'aide d'une représentation graphique (voir ci-contre). Sur ce graphique, l'espace-temps est simplifié à une dimension d'espace et une dimension de temps. Les extrémités de ces axes sont reliées par un arc de cercle qui représente l'espace-temps, sorte de capital à disposition. Soit on ne dépense que du temps et il n'y a plus d'espace à disposition, soit on dépense un peu des deux. Le photon quant à lui est la seule particule susceptible de ne dépenser que de l'espace et pas de temps car il est le seul à pouvoir se déplacer à la vitesse de la lumière; il est éternel et ne vieillit pas (aussi longtemps qu'il ne rencontre pas d'obstacle!). Au bout d'un an, il aura parcouru une année-lumière d'espace mais sans dépenser de temps. Sur Terre, Paul est immobile; il ne dépense que du temps et pas d'espace. Pour lui le temps s'écoule à sa vitesse maximale. Au bout d'un an, Paul aura vieilli d'un an et n'aura pas parcouru d'espace. Pour Alain, l'aventurier, l'espace qu'il va parcourir et le temps qu'il va dépenser dépendent de sa vitesse. Plus sa vitesse s'approchera de celle de la lumière, plus il consommera d'espace et moins il dépensera de temps. Par exemple, si sa



vitesse vaut les 40% de la vitesse de la lumière, il parcourra 0,4 année-lumière d'espace et 0,9 année de temps (soit environ 11 mois alors que Paul aura vieilli d'une année). S'il voyage à 90% de la vitesse de la lumière, il consommera 0,9 année-lumière d'espace et 0,4 an (environ 5 mois) de temps.

Le principe de la relativité d'Einstein, tout comme le principe de la relativité de Galilée, proclame la relativité du mouvement rectiligne et uniforme. C'est pourquoi on l'appelle principe de la relativité restreinte. Durant dix ans, de 1906 à 1916, Einstein s'est appliqué à étendre ce principe au mouvement accéléré. Ces recherches ont abouti en 1916 au principe général et à la théorie de la relativité générale.

Chapitre 49. Hydrodynamique

Dans la vie quotidienne, on est souvent témoin d'effets liés au mouvement de fluides. Ainsi, lorsqu'on arrose son jardin, on constate qu'il est possible d'augmenter la portée du jet en pinçant le tuyau.

Lors d'un match de football ou de tennis, on apprécie les trajectoires inattendues que prend la balle lorsque le joueur la frappe en lui donnant de l'« effet »; ces trajectoires sont liées à la manière dont l'air s'écoule autour de la balle.

Le domaine de la physique qui traite de l'écoulement des fluides est l'hydrodynamique. Quelques notions de base en sont données dans ce chapitre.

1 Ecoulement d'un fluide

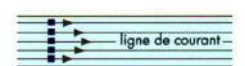
Lorsqu'on observe l'écoulement d'un fluide, il est parfois possible d'en isoler par la pensée un petit volume, appelé élément de fluide et d'en suivre sa trajectoire; on constate que suivant les cas, le mouvement peut être plus ou moins complexe.

Le type d'écoulement le plus simple est l'écoulement stationnaire: dans ce cas, la distribution des vitesses des éléments de fluide ne varie pas au cours du temps. Cela signifie que tous les éléments de fluide qui se succèdent au même point y passent avec la même vitesse (bien que deux éléments de fluide différents passant au même instant en des points différents puissent avoir des vitesses différentes). Ainsi, la « carte » des vitesses d'écoulement, représentées par des vecteurs sur les schémas ci-contre, garde le même aspect à n'importe quel instant. Il est possible d'obtenir un écoulement stationnaire en faisant couler de l'eau dans un tuyau d'arrosage à condition de ne pas modifier l'ouverture du robinet durant l'écoulement.

On peut représenter un écoulement en dessinant les lignes de courant; ces lignes sont, en chaque point du fluide, tangentes aux vitesses d'écoulement. Dans le cas d'un écoulement stationnaire, elles coïncident avec les trajectoires des éléments de courant.



Écoulement stationnaire: la « carte » des vitesses est la même à chaque instant.

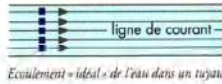


Écoulement laminaire de l'eau dans un tuyau (ce schéma correspond à la réalité).

Les éléments d'un fluide qui s'écoulent dans un tuyau ont une vitesse plus grande au centre que près des bords, jusqu'à être nulle pour les couches en contact avec le tuyau. Le liquide se présente sous la forme de «lames» qui glissent les unes sur les autres : on dit que l'écoulement est laminaire.

Dans la suite, il ne sera pas tenu compte de cette variation de vitesse en différents points d'une même section du tuyau; la situation sera idéalisée en considérant une vitesse «moyenne» à travers toute la section.

L'écoulement d'une rivière est beaucoup plus complexe: au pied d'une chute ou derrière un rocher qui affleure, les éléments de fluide suivent des mouvements compliqués et irréguliers qui s'enchevêtrent en tourbillons: ce type d'écoulement est dit turbulent.



Écoulement « idéal » de l'eau dans un tuyau.



L'écoulement de la rivière devient turbulent au passage de la chute.

2 Le débit

Une caractéristique de l'écoulement d'un fluide est son débit: lorsqu'on ouvre plus ou moins le robinet d'eau courante, on modifie le débit de l'écoulement.

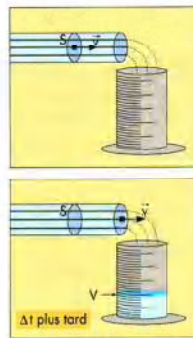
Débit de volume

L'expérience suivante illustre la définition du débit de volume dans le cas d'un écoulement d'eau dans un tuyau. On recueille dans un cylindre gradué, pendant une durée Δt , l'eau à la sortie du tuyau; on en détermine ainsi le volume V écoulé pendant Δt . Par définition, le débit de volume d_v à travers une section du tuyau est la quantité définie par:

$$d_v = \frac{V}{\Delta t}$$

L'unité de volume est le [m³] et celle de la durée est la [s]. Par conséquent, le débit de volume s'exprime en [m³/s] et sa valeur représente le volume de fluide écoulé en 1 seconde.

Le débit de volume dépend de la vitesse d'écoulement. Dans le cas où la section S du tuyau est constante, on peut facilement exprimer le débit de volume en fonction de la vitesse d'écoulement.



Détermination du débit de volume.

3 Equation de continuité

L'équation de continuité traduit la propriété de conservation de la masse du fluide durant son écoulement. Pour l'illustrer, on considère l'exemple de l'écoulement stationnaire d'un fluide dans un tuyau en deux tronçons successifs de sections différentes S_1 et S_2 . Comme le circuit ne comporte pas de source de fluide et n'a pas de fuite, la quantité de fluide est conservée: pendant qu'une certaine quantité pénètre dans le premier tronçon, une quantité égale en est chassée dans le second. Autrement dit, le débit de masse est le même, qu'il soit mesuré à travers n'importe quelle section, indifféremment dans le premier tronçon ou dans le second:

$$d_{m \text{ tronçon } 1} = d_{m \text{ tronçon } 2}$$

Si le fluide est compressible, comme un gaz, il est possible que sa masse volumique n'ait pas partout la même valeur; en notant respectivement par ρ_1 et ρ_2 les masses volumiques du fluide dans le premier et le second tronçon du tuyau, et par v_1 et v_2 les vitesses correspondantes, l'équation ci-dessus prend la forme:

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2$$

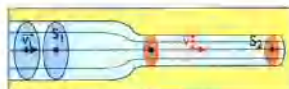
C'est l'«équation de continuité».

Dans le cas d'un fluide incompressible, la masse volumique a partout la même valeur et l'équation de continuité prend la forme particulière:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Cette relation montre que dans ce cas, la vitesse d'écoulement est inversement proportionnelle à la section du tuyau: **la vitesse est d'autant plus grande que la section est petite.**

On constate d'autre part, sur le schéma, que dans la partie de petite section, où la vitesse est grande, les lignes de courant sont serrées. Ainsi, **plus les lignes de courant sont serrées, plus la vitesse d'écoulement est grande.** Ce critère ne permet pas de déterminer la valeur de la vitesse d'écoulement mais il permet de comparer de façon fiable les vitesses en différents endroits.



Le débit de masse est le même à travers chaque section d'un tuyau, même si son diamètre varie.

Avant de sortir du tuyau, le liquide recueilli dans le cylindre gradué était préalablement contenu sur une longueur Δx dans le tuyau et son volume V est déterminé par:

$$V = S \cdot \Delta x$$

Or, Δx représente la distance parcourue par un élément de fluide pendant Δt ; on peut l'exprimer à partir de la vitesse v par:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t$$

Finalement, le volume recueilli vaut:

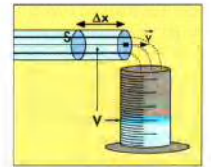
$$V = S \cdot v \cdot \Delta t$$

et le débit de volume est donné par

$$d_v = \frac{V}{\Delta t} = \frac{S \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} = S \cdot v$$

L'unité de la section est le [m²] et celle de la vitesse le [m/s]; on retrouve le [m³/s] comme unité du débit de volume.

Cette relation exprime que, pour un débit donné, **plus la section du tuyau est grande, plus la vitesse d'écoulement est petite.**



Débit de volume et vitesse d'écoulement.

Débit de masse

Pour déterminer le débit de masse correspondant à un débit de volume donné, il faut encore déterminer la masse m de liquide recueilli. Le débit de masse d_m est défini par:

$$d_m = \frac{m}{\Delta t}$$

Son unité est le [kg/s].

Dans le cas des liquides, la masse volumique ρ a partout la même valeur; la masse m est donnée par:

$$m = \rho \cdot V$$

et on en déduit une relation entre le débit de masse et le débit de volume:

$$d_m = \frac{m}{\Delta t} = \frac{\rho \cdot V}{\Delta t} = \rho \cdot d_v$$

ou

$$d_m = \rho \cdot S \cdot v$$

d_m : débit de masse en [kg/s]

ρ : masse volumique en [kg/m³]

d_v : débit de volume en [m³/s]

4 Equation de Bernoulli

L'équation de Bernoulli est une expression de la conservation de l'énergie pour l'écoulement d'un fluide idéal, c'est-à-dire sans frottements. Bien que dans la réalité, l'écoulement d'un fluide est toujours influencé par des forces de frottement interne, dues à la viscosité du fluide, ou à des frottements du fluide avec les parois du tuyau dans lequel il s'écoule, les raisonnements qui suivent et les propriétés qui en découlent sont encore valables.

Pour décrire les raisonnements qui mènent à l'équation de Bernoulli, on considère l'écoulement stationnaire d'un fluide dans un tuyau horizontal en deux tronçons successifs de sections différentes S_1 et S_2 . On isole par la pensée la partie du fluide mise en évidence en bleu foncé sur le schéma.

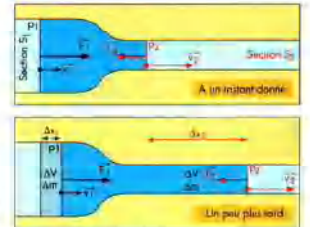


Illustration de l'équation de Bernoulli pour un tuyau horizontal.

Le liquide à gauche de la partie considérée la «pousse» avec une force d'intensité $F_1 = p_1 \cdot S_1$, où p_1 est la pression à cet endroit du fluide.

Le liquide à droite de la partie considérée la «retient» avec une force d'intensité $F_2 = p_2 \cdot S_2$, où p_2 est la pression à cet endroit du fluide.

Pendant une courte durée Δt , le fluide avance sur une longueur Δx_1 correspondant au volume $\Delta V = \Delta x_1 \cdot S_1$ dans le premier tuyau; la masse déplacée vaut $\Delta m = \rho \cdot \Delta V$ où ρ est la masse volumique du fluide.

Pendant la même durée Δt , il avance sur une longueur Δx_2 correspondant au même volume $\Delta V = \Delta x_2 \cdot S_2$ et à la même masse Δm dans le second tuyau.

Globalement, la partie intermédiaire reste inchangée.

Le travail effectué par le reste du liquide sur la partie considérée vaut:

$$W = F_1 \cdot \Delta x_1 - F_2 \cdot \Delta x_2 = p_1 \cdot S_1 \cdot \Delta x_1 - p_2 \cdot S_2 \cdot \Delta x_2 = (p_1 - p_2) \cdot \Delta V$$

Ce travail extérieur est converti en énergie cinétique; en effet, l'énergie cinétique du fluide considéré varie car la vitesse n'est pas la même dans les deux tuyaux. Cette variation est donnée par:

$$\Delta E_{cin} = \frac{\Delta m \cdot v_2^2}{2} - \frac{\Delta m \cdot v_1^2}{2} = \frac{\rho \cdot \Delta V}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

Et finalement, en égalant W et ΔE_{cin} , on obtient:

$$(p_1 - p_2) \cdot \Delta V = \frac{\rho \cdot \Delta V \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{2}$$

ou
$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

Cette relation constitue l'équation de Bernoulli dans le cas particulier d'un écoulement horizontal. Il en découle, lorsqu'on compare les vitesses et les pressions en deux points du fluide le long d'une même ligne de courant, que **plus la vitesse d'écoulement est grande, plus la pression est petite** et réciproquement.

Dans le cas général, où les deux points considérés ne sont pas à la même altitude, il faut encore tenir compte du travail de la force de pesanteur, donc de la variation d'énergie potentielle de gravitation qui en résulte. L'équation devient:

$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2$$

où h_1 et h_2 représentent les altitudes respectives des points considérés relativement à une altitude de référence.

Les termes de l'équation de Bernoulli représentent une forme d'énergie par unité de volume ou une « densité d'énergie »; leurs valeurs s'expriment en pascal [Pa].

La quantité $p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h$ représente la densité d'énergie du fluide; pour un fluide idéal, elle est constante le long d'une ligne de courant.

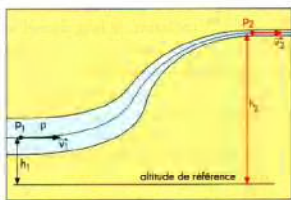
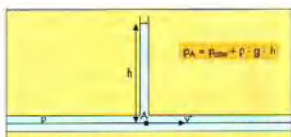


Illustration de l'équation de Bernoulli dans le cas général.

5 Variation de la pression dans un fluide visqueux en écoulement

Différents dispositifs permettent de déterminer la pression en un point A d'un fluide qui s'écoule dans un tuyau. L'un d'eux consiste en un tube manométrique, vertical, connecté au tuyau dans lequel circule le fluide. Durant l'écoulement, on constate que le fluide monte dans le tube



Détermination de la pression en un point du fluide.

En répétant l'expérience avec un tuyau muni d'un tronçon central de plus petite section, on observe en cet endroit une plus forte diminution de la pression: les niveaux dans les manomètres ne sont plus alignés en A, B et C comme dans le cas d'un tuyau de section constante, mais le niveau du manomètre central est en B'. Cette fois-ci, la vitesse dans la portion centrale est plus grande que dans les portions de grande section et l'effet observé confirme la propriété énoncée précédemment: **une augmentation de la vitesse du fluide provoque une diminution de la pression.**



L'augmentation de la vitesse dans le tuyau de petite section entraîne une diminution de la pression.

6 Quelques exemples d'application

Vérification expérimentale de l'équation de Bernoulli

On réalise un écoulement stationnaire dans un tuyau horizontal muni de tubes manométriques et alimenté par un réservoir d'eau (non représenté sur le schéma); la section S_1 des tronçons extrêmes est plus grande que la section S_2 du tronçon central.

L'expérience consiste à déterminer les pressions et les vitesses d'écoulement dans chaque tuyau, puis de calculer les quantités correspondantes figurant dans l'équation de Bernoulli et de comparer leurs valeurs.

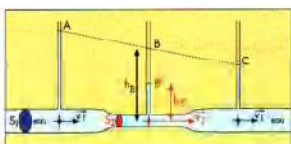
Les valeurs citées sont données à titre indicatif et sans incertitudes, pour illustrer une application numérique de l'équation de Bernoulli.

Détermination du débit

On recueille, à la sortie du tuyau, un volume V d'eau dans un cylindre gradué pendant la durée Δt

$$V = 287 \text{ cm}^3 = 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\Delta t = 10 \text{ s} \quad d_t = \frac{V}{\Delta t} = 2,87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$



Dispositif expérimental pour la vérification de l'équation de Bernoulli.

et son niveau supérieur se stabilise à une hauteur h . La pression au point A est alors donnée par:

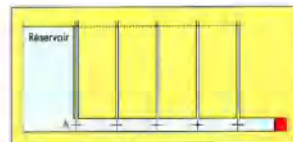
$$p_A = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$$

- p_A : pression au point A en [Pa]
- p_{atm} : pression atmosphérique en [Pa]
- ρ : masse volumique du fluide en [kg/m³]
- h : hauteur de fluide dans le tube manométrique en [m]
- g : intensité de la gravitation; $g = 9,81 \text{ N/kg}$

EXPERIENCE

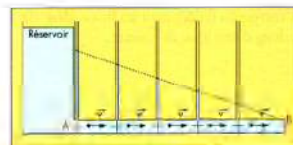
Dans cette expérience, un réservoir d'eau est relié à un tuyau horizontal de section constante, le long duquel sont disposés plusieurs tubes manométriques. On peut ainsi déterminer la pression du liquide en différents points du tuyau.

Si le liquide est immobile, l'extrémité du tuyau étant bouchée, on constate que les niveaux d'eau dans tous les tubes manométriques sont à la même altitude que celui du réservoir. La pression est la même en chaque point du tuyau.



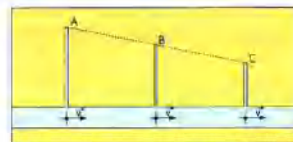
Égalité de la pression le long du tuyau dans le cas d'un liquide immobile.

Pour établir un écoulement stationnaire dans le tuyau, on enlève le bouchon et on alimente le réservoir afin que son niveau supérieur reste à la même altitude durant l'expérience. On constate alors que les hauteurs des colonnes d'eau dans les tubes manométriques sont de plus en plus petites au fur et à mesure qu'on s'approche de la sortie du tuyau, jusqu'à être nulles dans le dernier tube. De plus, les niveaux d'eau dans les tubes manométriques sont alignés sur une droite: la pression diminue linéairement le long du tuyau, jusqu'à la valeur de la pression atmosphérique à son extrémité.



Diminution de la pression le long du tuyau dans le cas d'un écoulement stationnaire.

Par la conservation du débit, et comme la section du tuyau est constante, la vitesse d'écoulement à la même valeur en chaque point du tuyau. Or, d'après l'équation de Bernoulli, la pression devrait aussi être égale en chaque point, ce qui n'est pas le cas. On explique cette divergence par le fait que les frottements dissipent une partie de l'énergie du fluide en chaleur. Par conséquent, l'énergie du fluide par unité de volume diminue au cours de son écoulement. En examinant les trois termes figurant dans l'équation de Bernoulli, on constate que seule la pression peut diminuer, ce qui est conforme à l'observation; en effet, dans les conditions de l'expérience, la vitesse est constante et l'altitude ne change pas car le tuyau est horizontal.



Dans un tuyau de section constante, la pression décroît linéairement.

Détermination des vitesses d'écoulement

On détermine les vitesses d'écoulement à partir de la relation $d_v = S \cdot v$.

Tuyau de grande section: $S_1 = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

$$v_1 = \frac{d_v}{S_1} = 0,745 \text{ m/s}$$

Tuyau de petite section: $S_2 = 2,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

$$v_2 = \frac{d_v}{S_2} = 1,014 \text{ m/s}$$

Détermination des pressions

Durant l'écoulement, les niveaux d'eau dans les tubes manométriques sont respectivement en A, B' et C.

La pression dans la partie centrale est déterminée directement à partir de la mesure h_B de la colonne d'eau dans le tube correspondant. La pression dans le tuyau de grande section est plus difficile à déterminer puisque, sous l'effet de la viscosité, elle décroît le long du tuyau (niveaux A et C). On en détermine une valeur moyenne, correspondant au niveau fictif B (aligné sur A et C), de hauteur h_B dans le tube du milieu.

$$p_{atm} = 0,950 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad \rho_{eau} = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad g = 9,81 \text{ N/kg}$$

Tuyau de grande section:
 $h_B = 0,269 \text{ m} \quad p_1 = p_{atm} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h_B = 0,976 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Tuyau de petite section:
 $h_B = 0,248 \text{ m} \quad p_2 = p_{atm} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h_B = 0,974 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Vérification de la loi de Bernoulli

Comme le tuyau est horizontal, les termes de l'équation de Bernoulli qui correspondent à l'énergie potentielle n'entrent pas en compte.

Tuyau de grande section: $p_1 + \frac{\rho_{eau} \cdot v_1^2}{2} = 0,979 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

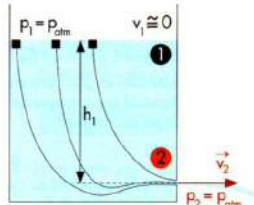
Tuyau de petite section: $p_2 + \frac{\rho_{eau} \cdot v_2^2}{2} = 0,979 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

La comparaison de ces deux valeurs confirme l'équation de Bernoulli.

La loi de Torricelli

Un réservoir de grande section, rempli d'eau, est muni d'un petit orifice par lequel le liquide s'écoule; on veut déterminer la vitesse v_2 à laquelle le liquide sort par l'orifice.

- La section du réservoir étant beaucoup plus grande que celle de l'orifice, on peut estimer que la vitesse v_1 à laquelle le niveau baisse est quasiment nulle.
- L'expérience se déroulant dans l'air, la pression p_1 sur la surface libre du réservoir et la pression p_2 à la sortie du jet sont égales à la pression atmosphérique p_{atm} .
- Si h_1 désigne l'altitude du niveau d'eau dans le réservoir relativement à la position de l'orifice, l'équation de Bernoulli



L'expérience de Torricelli.

$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2$$

prend la forme simplifiée:

$$\rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

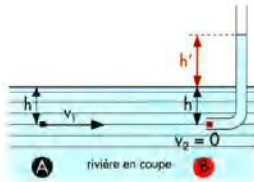
de laquelle on tire la vitesse de l'eau à la sortie:

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1}$$

Cette relation est connue sous l'appellation de «théorème de Torricelli».

La sonde de Pitot

Cet appareil est utilisé, dans l'aviation, pour mesurer la vitesse de l'avion par rapport à l'air ambiant dans lequel il vole. Il permet aussi de mesurer la vitesse de l'eau dans une rivière par exemple: lorsqu'on immerge la sonde dans une rivière, à la profondeur h , le niveau d'eau monte dans le tube et se stabilise à une certaine hauteur h' dépendant de la vitesse d'écoulement de l'eau de la rivière.



Sonde de Pitot.

En A, relativement loin de la sonde:

- la vitesse v_1 est la vitesse d'écoulement de la rivière qu'on cherche à déterminer;
- la pression est donnée par: $p_1 = p_{atm} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h$

Chapitre 50. Thermodynamique

1 Introduction

La thermodynamique est une théorie qui traite des relations entre les phénomènes thermiques et mécaniques. Il y a deux manières d'aborder l'étude de la physique macroscopique lorsque l'énergie intervient sous forme de chaleur.

La plus ancienne, développée surtout dans la première moitié du XIX^e siècle par des hommes comme Carnot, Clausius, William Thomson (devenu plus tard lord Kelvin), Robert Mayer et Joule, est celle de la thermodynamique classique. Elle est basée sur des principes et des lois qui sont des déductions et des généralisations d'un grand nombre d'expériences effectuées sur des systèmes macroscopiques où seules des variables comme la température, le volume et la pression servent à décrire les propriétés d'un système.

La seconde manière est celle de la thermodynamique statistique. Dans ce cas, on part des propriétés atomiques de la matière pour déduire des lois portant sur les systèmes macroscopiques. Les premiers travaux dans ce domaine portent sur la théorie cinétique des gaz (Maxwell puis Boltzmann et Gibbs) qui permet, en effectuant des moyennes sur des coordonnées microscopiques comme la vitesse des particules, d'obtenir des coordonnées macroscopiques comme le volume, la pression et la température.

La thermodynamique permet d'expliquer les principes de fonctionnement d'une machine à vapeur, d'un moteur à essence ou d'une pompe à chaleur. Elle est également à la base de la modélisation des phénomènes météorologiques.



Les principes de fonctionnement de la machine à vapeur et la météorologie sont décrits par la thermodynamique.

En B, à l'entrée de la sonde:

- comme le niveau d'eau dans le tube est stable, la vitesse v_2 à l'intérieur du tube est nulle;
- la pression est donnée par: $p_2 = p_{atm} + \rho_{eau} \cdot g \cdot (h + h')$.

Les points A et B étant dans un plan horizontal, les termes de l'équation de Bernoulli qui correspondent à l'énergie potentielle n'entrent pas en compte.

L'équation de Bernoulli

$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2$$

prend la forme particulière:

$$p_{atm} + \rho_{eau} \cdot g \cdot h + \frac{\rho_{eau} \cdot v_2^2}{2} = p_{atm} + \rho_{eau} \cdot g \cdot (h + h')$$

de laquelle on tire la vitesse d'écoulement:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h'}$$

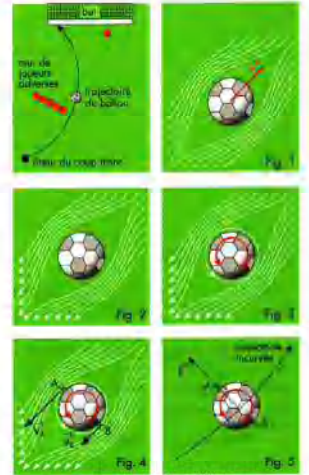
Le coup franc de Platini

Certains joueurs de football, comme Michel Platini ou David Beckham ont un talent particulier pour tirer les coups francs; ils réussissent à donner au ballon une trajectoire qui contourne le mur de joueurs adverses et finit dans la lucarne du but. Ce talent tient à la manière de «brosser» le ballon en le frappant de côté; ainsi, en plus d'être propulsé vers l'avant, le ballon tourne sur lui-même et suit une trajectoire incurvée.

- Si le ballon est joué sans effet particulier, il avance à la vitesse v dans l'air (figure 1); les filets d'air s'écoulent de façon symétrique de part et d'autre du ballon (figure 2).
- Si le ballon est «brossé», il entraîne, dans son mouvement de rotation sur lui-même, la couche d'air en contact avec lui (figure 3).

Cette rotation de l'air s'ajoute à son écoulement autour du ballon en A et s'y oppose en B; la vitesse de l'air est plus grande en A qu'en B (figure 4).

Par conséquent, la pression de l'air est plus petite en A qu'en B et il en résulte une force pressante latérale sur le ballon qui incurve sa trajectoire (figure 5).



Le coup franc de Michel Platini.

2 Quelques concepts thermodynamiques

Prenons l'exemple d'un corps chaud et d'un corps froid en contact thermique: le corps chaud se refroidit et le corps froid se réchauffe, jusqu'à ce qu'ils soient tous deux à la même température. L'égalisation est due à un flux d'énergie du corps chaud au corps froid. Quand ce flux cesse, les deux corps sont en équilibre thermique. Ce fait peut être constaté expérimentalement en utilisant un troisième corps.

«Quand deux corps sont en équilibre thermique avec un troisième corps, ils sont en équilibre thermique entre eux». Cet énoncé est appelé parfois le principe zéro de la thermodynamique.

Le calcul du temps et de la manière que met un système pour atteindre un état d'équilibre est un problème extrêmement complexe qui ne sera pas abordé ici.

L'état d'équilibre d'un système est défini à partir de quelques variables macroscopiques qui définissent toutes les autres propriétés macroscopiques du système. Ces dernières sont appelées fonctions d'état. Par exemple, l'état d'un fluide homogène est entièrement déterminé par sa masse, son volume et sa pression. Sa température est une fonction d'état.

Pour les gaz parfaits, l'équation d'état est:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

- p : pression en [Pa]
- V : volume en [m³]
- n : nombre de moles de gaz
- R : constante des gaz parfaits (8,31 J · mol⁻¹ · K⁻¹)
- T : température en [K]

On peut réécrire cette équation en faisant apparaître le nombre N de molécules de gaz:

avec $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ molécules par mole (nombre d'Avogadro)

$$\text{alors } n = \frac{N}{N_A} \text{ et } p \cdot V = N \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T = N \cdot k \cdot T$$

où $k = \frac{R}{N_A}$ est la constante de Boltzmann

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

L'intérêt d'écrire l'équation d'état sous cette forme est de faire apparaître la quantité kT qui a les dimensions d'une énergie. A la température ordinaire ($T = 300 \text{ K}$), kT vaut environ $4 \cdot 10^{-21}$ joule.



Le thé va se refroidir et le lait se réchauffer pour atteindre un équilibre thermique. L'inverse n'a jamais été observé!

3 Notion de chaleur

L'énergie d'interaction

Pour comprendre la notion d'énergie d'interaction, on peut se baser sur l'idée de deux masses en mouvement, liées par un ressort selon le schéma ci-contre.

Ces deux particules, de masses m_1 , m_2 et de vitesses \vec{v}_1 , \vec{v}_2 , sont liées par un ressort de raideur k , de longueur au repos ℓ_0 et de longueur ℓ une fois déformé. L'énergie potentielle du système vaut :

$$E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} k (\ell - \ell_0)^2$$

L'énergie totale du système, que l'on appellera énergie d'interaction E_{int} , est la somme de l'énergie potentielle du ressort et de l'énergie cinétique E_{cin} des particules :

$$E_{\text{int}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} k (\ell - \ell_0)^2$$

Si le système est isolé, c'est-à-dire non soumis à des forces d'origine extérieure, cette énergie totale est constante.

Energie interne d'un système de particules

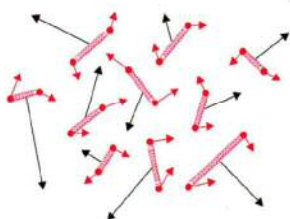
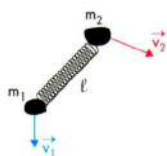
Dans toute matière, les particules (atomes, molécules, ...) qui la composent sont animées de vibrations (pour les solides) ou de mouvements désordonnés pour les liquides et les gaz. A ces mouvements est associée l'énergie cinétique E_{cin} de l'ensemble. Des forces d'interaction peuvent exister entre les atomes ou les molécules représentées par l'énergie d'interaction E_{int} (type ressort comme ci-dessus). Pour un système isolé, l'énergie interne U du système est, par définition, égale à :

$$U = E_{\text{cin}} + E_{\text{int}}$$

La chaleur

Supposons un système non isolé qui peut échanger de l'énergie avec l'extérieur. S'il évolue d'un état initial 1 à un état final 2, on dit qu'il subit une transformation. Au cours de cette transformation, l'énergie interne du système évolue de U_1 à U_2 et sa variation vaut :

$$\Delta U = U_2 - U_1$$



→ les flèches rouges représentent le mouvement des atomes et les ressorts leur force de liaison; on y associe l'énergie d'interaction E_{int}
 → les flèches en noir représentent le mouvement des molécules; on y associe l'énergie cinétique E_{cin} .

Lorsque la transformation ramène le système à son état initial, on dit qu'il effectue un cycle. Dans ce cas :

$$U_2 = U_1 \text{ et } W + Q = 0$$

Remarque

Si le système est en mouvement, soit par translation, rotation ou autre mouvement plus complexe, on doit faire intervenir une énergie cinétique macroscopique E_{cin} telle que :

$$W + Q = (E_{\text{cin}2} + U_2) - (E_{\text{cin}1} + U_1)$$

C'est le cas par exemple d'un gaz qui se détend dans une tuyère.

Lorsque la transformation a lieu à volume constant, le travail des forces de pression est nul et l'expression se réduit à :

$$\Delta U = Q$$

Enthalpie

Une transformation d'un gaz à pression constante est nommée isobare. Lors d'une telle transformation, le travail effectué est déterminé par la loi des gaz :

$$W = p \cdot V$$

Si le gaz passe d'un volume V_1 à V_2 , le travail des forces de pression extérieure est donné par :

$$W = -p(V_2 - V_1)$$

L'énergie interne du système s'écrit (premier principe de la thermodynamique) :

$$U_2 - U_1 = -p(V_2 - V_1) + Q$$

ou : $(U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1) = Q$

Cette expression conduit à utiliser une fonction caractéristique du système que l'on appelle **enthalpie H** et qui est reliée à l'énergie interne U par l'égalité :

$$H = U + pV$$

H est une fonction d'état; elle représente une énergie exprimée en joules. Sa variation est nulle dans le cas d'un cycle et indépendante du chemin suivi.



Les gaz qui se détendent dans une tuyère de fusée est un exemple d'un système en mouvement.



Début de gel de la mer en terre Adélie. L'enthalpie permet de calculer l'énergie échangée lors d'un changement de phase.

Au cours de la transformation, les forces extérieures effectuent un travail W (travail des forces de pressions, des forces électriques, ...) qui peut être déterminé par les lois de la mécanique et de l'électricité. Dans de nombreux cas, ce travail W ne rend pas compte de la variation de l'énergie interne. Pour satisfaire au principe de conservation de l'énergie, il faut concevoir une forme d'énergie autre que le travail : c'est la chaleur Q .

La variation d'énergie interne d'un système peut être due, simultanément ou séparément, à un travail extérieur W ou à un échange de chaleur Q :

$$W + Q = \Delta U = U_2 - U_1$$

Premier principe de la thermodynamique

Le principe de la conservation de l'énergie est appelé premier principe de la thermodynamique.

Considérons un système limité par des parois imperméables à la chaleur. Ces parois sont dites adiabatiques. On fait passer un tel système d'un état 1 à un état 2 en lui fournissant un travail W .

Les premiers travaux sur les changements d'états des systèmes isolés sont dus à Joule (1843); il réalise deux expériences distinctes en fournissant à un système isolé une quantité de chaleur, d'une part en agitant vigoureusement un liquide et, d'autre part, en faisant passer un courant dans une résistance placée dans le liquide. Le travail fourni au système produit une variation de l'énergie interne :

$$W = \Delta U = U_2 - U_1$$

Si l'on considère un système qui n'est plus isolé, on peut comme précédemment faire passer le système de l'état 1 à l'état 2; mais en général, le travail fourni n'est pas égal à l'augmentation d'énergie interne ΔU . La différence : $Q = \Delta U - W$ est la quantité de chaleur fournie au système. L'équation ci-dessus qu'on écrit généralement :

$$\Delta U = Q + W$$

est l'expression du premier principe de la thermodynamique.

Par convention, les valeurs algébriques de W et Q sont comptées positivement si elles sont fournies au système et négativement si le système les fournit à l'extérieur.



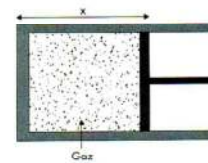
Le liquide du calorimètre reçoit un travail électrique et permet de vérifier le premier principe de la thermodynamique.

Si la transformation a lieu à pression constante, $\Delta U + p\Delta V$ représente la chaleur reçue par le système et qui a été transformée en travail : $p\Delta V$, auquel s'ajoute une certaine quantité d'énergie interne U du système. Dans ce cas, la différence entre l'enthalpie de l'état final et celle de l'état initial est égale à la chaleur de réaction.

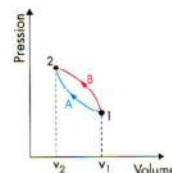
L'enthalpie est surtout utilisée pour calculer l'énergie échangée lors d'un changement d'état ou une réaction chimique.

4 Notion de cycle

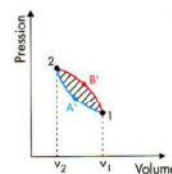
Du point de vue physique, le travail est un transfert d'énergie qui s'observe macroscopiquement, tandis que la chaleur se conçoit à partir de considérations microscopiques. Pour bien montrer la différence entre ces transferts d'énergie, considérons un gaz dans un cylindre isolé dont l'une des extrémités est un piston. Quand on comprime le gaz, le travail s'observe macroscopiquement en considérant la variation de volume. Pendant la compression, les molécules subissent des chocs élastiques sur les parois du piston mobile et gagnent de l'énergie; elles redistribuent celle-ci au cours des chocs avec les autres molécules. Cette augmentation de l'agitation moléculaire a pour conséquence un réchauffement du gaz.



Compression d'un gaz dans un cylindre isolé.



Le travail pour aller de 1 à 2 n'est pas le même suivant que l'on suit le chemin A ou le chemin B.



L'aire hachurée représente le travail reçu par le système au cours d'un cycle.

Quand on passe d'un état 1 à un état 2, la variation d'énergie interne ΔU est définie et il en est de même de la somme $Q + W$. Par contre, Q et W ne sont pas définis séparément et dépendent de la manière dont on passe de l'état 1 à l'état 2, c'est-à-dire du chemin suivi (voir schéma ci-contre).

Supposons maintenant qu'on passe de l'état 1 à l'état 2 en suivant le chemin A, puis qu'on revienne en 1 en suivant le chemin B' (voir schéma ci-contre). Le travail reçu par le système au cours de ce cycle est représenté par l'aire hachurée : $W_A - W_B = -\int p dV \neq 0$.

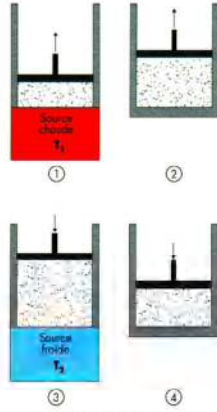
La variation de l'énergie interne, au contraire, ne dépend pas du chemin suivi : $\int dU = 0$. C'est ce qui caractérise une fonction d'état. Au cours du cycle, on est parti du point 1 où l'énergie interne avait la valeur U_1 pour revenir au point 1 où elle avait la même valeur.

Cycle de Carnot

Le cycle de Carnot désigne une transformation quasi statique (c'est-à-dire proche de l'équilibre thermique) au cours de laquelle le système échange de la chaleur avec deux sources de températures T_1 et T_2 (avec $T_1 > T_2$).

Dans l'ordre chronologique, ce cycle comporte quatre opérations successives et distinctes (voir schéma et diagramme ci-contre).

- 1) une opération isotherme à la température T_1 (l'état initial du gaz est représenté par le point A) au cours de laquelle le système échange une certaine quantité de chaleur Q_1 avec la source de chaleur chaude; la pression décroît alors que le volume augmente (segment AB);
- 2) une opération adiabatique qui interrompt le contact thermique avec la source chaude (point B); la température baisse, la détente se poursuit plus rapidement (segment BC) jusqu'à ce que le système atteigne la température T_2 ;
- 3) le contact thermique est alors établi (point C); une opération isotherme à la température T_2 au cours de laquelle le gaz est comprimé (segment CD); le système échange avec la source froide une certaine quantité de chaleur Q_2 comptée négativement (car elle est cédée par le gaz à la source);
- 4) on interrompt le contact thermique avec la source froide (point D) de telle façon que la compression adiabatique (segment DA) ramène le système au contact thermique avec la source chaude dans des conditions identiques à l'état du système initial.



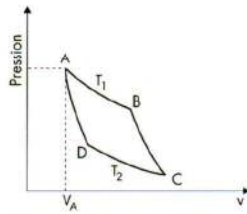
Les quatre opérations du cycle de Carnot.

Au cours d'un tel cycle, le gaz fournit au milieu extérieur un travail représenté par l'aire du cycle ABCD. Comme chacune des opérations est réversible, ce cycle peut être décrit en sens inverse. Il permet alors d'enlever une certaine quantité de chaleur à la source froide et d'ajouter une quantité de chaleur à la source chaude, au prix d'un certain travail fourni par le milieu extérieur.

Le cycle décrit dans le sens ABCD est producteur de travail et peut servir de modèle simple à une machine thermique alors que celui décrit dans le sens ADCB peut servir de modèle à une machine frigorifique ou une pompe à chaleur.

Les machines réelles ne sont jamais parfaitement réversibles mais doivent satisfaire le principe de conservation de l'énergie qui s'écrit, pour le cycle de Carnot:

$$W + Q_1 + Q_2 = 0$$



Cycle de Carnot représenté dans un diagramme $p = f(v)$.

On peut donc dire qu'un cycle de Carnot joue le rôle d'une machine thermique lorsque le système qui est le siège des transformations fournit du travail au milieu extérieur, c'est-à-dire lorsque $W < 0$. Cela a pour conséquence que

$$Q_1 + Q_2 > 0.$$

Selon le sens choisi ici, le travail est positif. La variation d'énergie interne le long du cycle est nulle et le gaz n'échange de la chaleur avec l'extérieur que pendant les transformations isothermes AB et CD.

Après quelques savants calculs, on peut obtenir finalement la relation:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Cette relation s'appelle l'égalité de Clausius pour le cycle de Carnot du gaz parfait.

5 Les machines thermiques

Une machine thermique est un dispositif dans lequel un fluide (gaz ou liquide) passe d'un état initial à un état final identique. On dit, par définition, qu'elle fonctionne selon un cycle fermé au cours duquel elle échange du travail et de la chaleur avec le milieu extérieur.

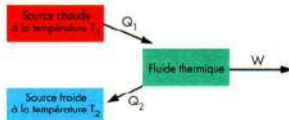
Le moteur thermique

Une machine thermique fournissant du travail au milieu extérieur lors du cycle décrit par le fluide est un moteur thermique.

Sadi Carnot, en 1824, a énoncé un principe selon lequel un fluide thermique qui subit un cycle de transformation fournissant du travail doit nécessairement échanger de la chaleur avec au moins deux sources de chaleur à des températures différentes.

Le fluide reçoit une quantité de chaleur Q_1 de la source chaude (à la température absolue T_1) et restitue une

quantité de chaleur Q_2 à la source froide (à la température absolue T_2 telle que $T_2 < T_1$). Une partie de la quantité de chaleur prélevée à la source chaude est transformée en travail W fourni par le fluide (voir schéma ci-contre).



Bilan énergétique d'un moteur thermique

Au cours du cycle, le bilan énergétique s'écrit: $Q_1 = Q_2 + W$
ou: $W = Q_1 - Q_2$

Remarque: Un travail moteur étant par essence positif, on justifie bien que $Q_2 < Q_1$.

Le rendement thermique η (éta) d'un moteur thermique est défini par la relation:

$$\eta = \frac{\text{travail fourni par le fluide}}{\text{quantité de chaleur reçue}} = \frac{W}{Q_1}$$

Le rendement peut donc s'écrire: $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$

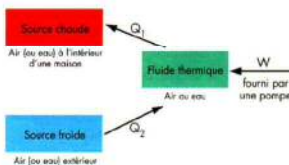
On peut démontrer que le rendement peut aussi s'exprimer par la relation:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Ce rendement est donc nécessairement inférieur à l'unité et le rendement d'un moteur thermique est donc limité par l'échange de chaleur avec la source froide. On obtient évidemment la valeur du rendement théorique maximal d'un moteur thermique satisfaisant au cycle de Carnot.

Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur fonctionne selon le principe inverse d'un moteur thermique: en prélevant un travail W au milieu extérieur et une quantité de chaleur Q_2 à la source froide, elle cède une quantité de chaleur Q_1 à la source chaude. Il s'ensuit un réchauffement de la source chaude.



6 Deuxième principe de la thermodynamique

Pour pouvoir prédire les relations entre phénomènes mécaniques et phénomènes calorifiques, le principe de conservation de l'énergie est insuffisant car il ne donne pas d'indication sur le sens dans lequel se déroulent les phénomènes naturels. Par exemple, réchauffer son bain en y plongeant un sac de glaçons ne serait pas contraire au principe de conservation de l'énergie; l'eau du bain deviendrait plus chaude et les glaçons plus froids. Pourtant, une telle observation n'a jamais été faite! Cet exemple montre la nécessité d'admettre un principe qui permet de prévoir le sens des transformations irréversibles. Ce principe est le second principe de la thermodynamique ou principe de Carnot. Clausius en donna l'énoncé suivant:

«Le passage de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud n'a jamais lieu spontanément ou n'a jamais lieu sans compensation.»

Spontanément ou sans compensation veut dire qu'une telle transformation n'est possible que si elle est liée à une modification qui a lieu en même temps dans le milieu extérieur. Ce principe limite les possibilités de transformation de la chaleur en travail. La chaleur ne peut être transformée en travail que si une autre quantité de chaleur passe de la source chaude à la source froide; un certain gaspillage est inéluctable. Lord Kelvin énonça ainsi ce principe:

«A l'aide d'un système qui décrit un cycle et qui n'est en contact qu'avec une source de chaleur, il est impossible de recueillir du travail.»

D'après cet énoncé, pour convertir de la chaleur en travail mécanique, il faut disposer d'une chute de température, c'est-à-dire de deux sources de chaleur.

L'entropie

Pour un système doté d'une certaine énergie, l'entropie est une mesure des difficultés qu'a cette énergie pour produire un travail utile. Lorsque l'entropie augmente, la quantité d'énergie disponible diminue.

L'entropie est définie comme étant la chaleur fournie de façon réversible au cours d'une transformation quasi statique rapportée à la température du système:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$



Sadi Carnot (1796-1832) auteur des *Reflexions sur la puissance motrice du feu* (1824).

S est aussi une fonction d'état. Pour les deux transformations adiabatiques du cycle de Carnot, $\Delta S = 0$. La variation d'entropie qui accompagne les transformations isothermes aux températures T_1 et T_2 sont respectivement:

$$\Delta S_1 = \frac{Q_1}{T_1} \text{ et } \Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2}$$

Pour ces deux transformations adiabatiques, $\Delta S = 0$ et la variation d'entropie au cours du cycle étant nulle, ceci implique bien que:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Le second principe permet bien de généraliser à un système décrivant un cycle de Carnot l'égalité de Clausius obtenue ci-dessus.

On parle souvent de l'entropie de l'Univers. En thermodynamique, ce qu'on appelle l'Univers, c'est l'ensemble du système et de la partie du milieu extérieur qui échangent de l'énergie. L'ensemble formant un système isolé, on peut dire que:

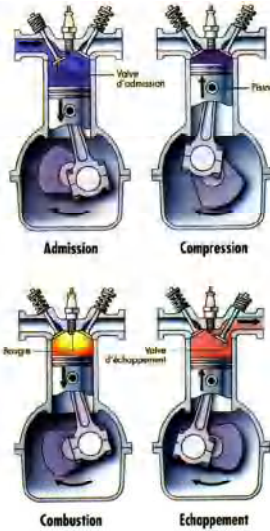
- l'entropie de l'Univers ne peut jamais diminuer en fonction du temps;
- si l'Univers est le siège d'une transformation réversible, son entropie reste constante;
- s'il est le siège d'une transformation irréversible, son entropie augmente en fonction du temps.

On peut noter que, puisque dans les transformations irréversibles des systèmes isolés l'entropie augmente, alors au cours de ces transformations, il y a création d'entropie.

Le moteur à combustion

L'une des principales applications de la thermodynamique est le moteur à combustion interne. Les premiers à avoir été commercialisés sont les moteurs à gaz et les moteurs à pétrole. Leur principe de fonctionnement suit un cycle à quatre temps (ou cycle d'Otto).

- 1^{er} temps: l'admission où le mélange air-combustible entre dans la chambre de combustion;
- 2^e temps: la compression où le piston remonte dans le cylindre;
- 3^e temps: la combustion où l'étincelle produite par la bougie brûle le mélange gazeux et pousse le piston vers le bas;
- 4^e temps: l'échappement où les gaz brûlés sont évacués.



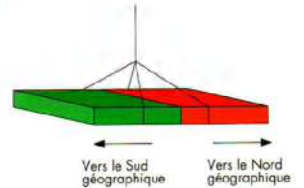
Chapitre 51. Electromagnétisme

Le magnétisme se manifeste par exemple lorsqu'un aimant attire un clou ou de la limaille de fer. Cette propriété, mise en évidence avec certains minerais de fer comme la magnétite, est connue depuis l'Antiquité. Le mot magnétisme, choisi pour désigner ce phénomène, vient de la cité d'Asie Mineure: Magnésie. C'est, en cet endroit que le phénomène a été observé pour la première fois.

Le magnétisme est un phénomène distinct de la gravitation. On verra, par contre, que les phénomènes liés à l'électricité et au magnétisme ont la même cause: la charge électrique. Ces deux phénomènes sont réunis sous l'appellation plus générale d'électromagnétisme.

1 Mise en évidence du phénomène

EXPERIENCE On suspend à un fil vertical un petit aimant droit libre de pivoter dans un plan horizontal. On constate qu'il s'aligne spontanément suivant un axe Nord-Sud. Un tel aimant constitue une boussole.



Le côté de l'aimant qui s'oriente vers le Nord géographique est appelé pôle (magnétique) Nord; le côté opposé est appelé pôle (magnétique) Sud.

Le pôle Nord de l'aimant est souvent peint en rouge.

EXPERIENCE On prend deux aimants que l'on approche l'un de l'autre. Si le pôle Sud d'un des aimants est placé en face du pôle Nord de l'autre aimant, on constate qu'ils s'attirent. Si deux pôles de même type (les deux pôles Nord ou les deux pôles Sud) sont placés l'un en face de l'autre, on constate que les deux aimants se repoussent.



Attraction entre pôles différents.

Les pôles de types différents s'attirent; ceux de même type se repoussent.

EXPERIENCE Si l'on saupoudre de la limaille de fer à proximité d'un aimant, on constate qu'elle vient s'agglutiner sur ses pôles.

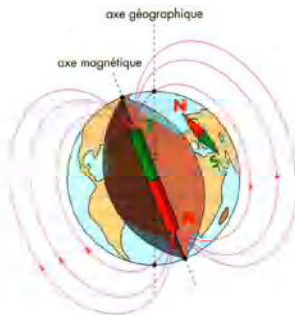
Les effets du magnétisme se manifestent seulement sur certaines substances comme le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel, ...

Interprétation

Les expériences précédentes mettent en évidence l'existence d'une force magnétique créée par un aimant. Cette force s'exerce sur un autre aimant ou sur de la limaille de fer. Dans la première expérience, la Terre elle-même joue le rôle d'un aimant dont les pôles magnétiques se situent à proximité des pôles géographiques. Le pôle Nord magnétique de la Terre coïncide à peu près avec son pôle Sud géographique.

On interprète l'existence de cette force de la façon suivante:

- un aimant crée un champ magnétique dans son voisinage;
- ce champ magnétique exerce une force magnétique sur un autre aimant ou sur certains métaux.



2 Représentation du champ magnétique

Le champ magnétique créé, par exemple, par un aimant peut être détecté avec une boussole:

- la direction du champ magnétique créé autour de l'aimant est donnée par la direction que prend spontanément l'aiguille aimantée de la boussole;
- par convention, le sens du champ magnétique créé autour de l'aimant est orienté du pôle Sud de l'aiguille de la boussole vers son pôle Nord.

On représente un champ magnétique par un vecteur noté B respectant les propriétés ci-dessus.

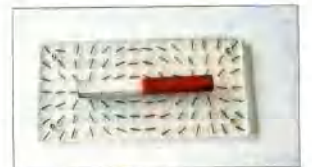
En déplaçant une boussole autour d'un aimant posé sur une surface horizontale, on peut déterminer la direction et le sens du champ magnétique en chaque point. On représente aussi un champ magnétique par le dessin de ses lignes de champ. Ce sont des lignes qui sont tangentes en chaque



Esquisse des lignes de champ obtenue avec de la limaille de fer.

point au champ magnétique et orientées dans le sens de ce champ. L'esquisse des lignes de champ peut être obtenue en saupoudrant de la limaille de fer autour de l'aimant.

L'intensité B d'un champ magnétique s'exprime en tesla [T]. Elle se mesure avec un appareil appelé teslamètre. Le champ magnétique proche de la surface de la Terre est de l'ordre de 10^{-5} T à l'Equateur.



Esquisse des lignes de champ obtenue avec de petits barreaux ferreux.

3 La cause du champ magnétique

L'existence de forces électriques attractives ou répulsives s'explique par la présence dans la matière de charges électriques de deux sortes: positives et négatives.

On est tenté, concernant le magnétisme, de faire le même genre d'hypothèse en postulant l'existence de «charges» magnétiques de type Nord et de «charges» magnétiques de type Sud. Cette hypothèse est toutefois remise en cause lorsqu'on tente de briser un aimant pour isoler ces deux sortes de «charges» magnétiques. En effet, chaque morceau obtenu, aussi petit soit-il, présente à la fois les deux pôles Nord et Sud. Il est ainsi impossible d'isoler d'éventuelles «charges» magnétiques et il faut chercher ailleurs la cause du champ magnétique.

EXPERIENCE On place un fil électrique relié à un générateur au-dessus d'une boussole de sorte que le fil soit parallèle à l'aiguille aimantée. Lorsqu'on enclenche le courant, on constate que l'aiguille dévie en s'orientant à peu près perpendiculairement au fil. Lorsqu'on arrête le courant, l'aiguille reprend sa position initiale.

Cette expérience a été réalisée pour la première fois en 1819 par le physicien danois Hans Christian Oersted (1777-1851) et fait le lien entre l'électricité et le magnétisme: un courant électrique crée un champ magnétique.

Comme un courant électrique est un mouvement d'ensemble de charges électriques (une partie des électrons du fil), il semble raisonnable d'énoncer la propriété suivante:

un champ magnétique est créé par des charges électriques en mouvement.



Esquisse des lignes de champ obtenue avec des aiguilles aimantées.



Expérience d'Oersted. Aucun courant ne circule dans le fil au-dessus de l'aiguille de la boussole.



Expérience d'Oersted. Un courant circule dans le fil au-dessus de l'aiguille de la boussole.

Une confirmation de cette propriété est donnée par l'expérience suivante.

EXPÉRIENCE On dispose d'un réseau de petits barreaux aimantés mobiles autour de leur pivot et d'une baguette de plastique préalablement chargée par frottement avec une peau de chat.

Si la baguette est maintenue immobile à proximité des barreaux aimantés, ceux-ci ne bougent pas; il n'y a pas d'effet magnétique.

Si on déplace la baguette dans un mouvement de va et vient au-dessus des barreaux aimantés, on constate qu'ils pivotent autour de leur axe: le mouvement de la baguette chargée crée un effet magnétique.



Lorsqu'on déplace la baguette chargée dans un mouvement de va et vient, les barreaux aimantés bougent.

Les aimants

Dans toute substance, le mouvement des électrons autour du noyau des atomes constitue des déplacements de charges responsables d'un champ magnétique.

Dans la plupart des cas, ces champs sont orientés de façon quelconque et le champ magnétique résultant est nul.

Dans un aimant, ces champs ont sensiblement la même orientation et le champ magnétique résultant n'est pas nul.

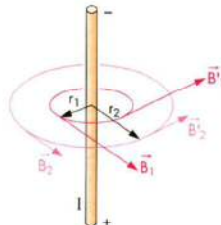
4 Le champ magnétique produit par un courant électrique

Les résultats mentionnés dans ce paragraphe découlent de la loi de Biot-Savart ou du théorème d'Ampère qui ne sont pas des sujets traités dans ce livre. Il est toutefois utile de connaître ces résultats que l'on peut par ailleurs vérifier expérimentalement.

Champ magnétique produit par un fil rectiligne

Un long fil rectiligne parcouru par un courant d'intensité I produit dans son voisinage un champ magnétique ayant les caractéristiques suivantes:

- sa direction est normale au fil;
- son sens est indiqué sur le schéma ci-contre; on peut le déterminer par la « règle du tire-bouchon »: on enfonce un tire-bouchon imaginaire le long du fil et dans le



Les vecteurs représentent le champ magnétique en différents points.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

La constante μ_0 est appelée « perméabilité magnétique du vide » ou plus simplement « constante d'induction »:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [T \cdot m \cdot A^{-1}]$$

B intensité du champ magnétique en [T]

I intensité du courant dans le fil en [A]

r distance entre le fil et le point de mesure en [m].

Les lignes de champ sont des cercles centrés sur le fil et dans un plan perpendiculaire au fil.

Champ magnétique au centre d'une boucle de courant

On considère une boucle de rayon R parcourue par un courant d'intensité I . Le champ magnétique au centre de la boucle a les caractéristiques suivantes:

- sa direction est perpendiculaire au plan de la boucle;
- son sens est indiqué sur le schéma ci-contre; on peut le déterminer par la « règle du tire-bouchon »: on enfonce un tire-bouchon perpendiculairement au plan de la boucle en faisant tourner ses poignées dans le sens conventionnel du courant dans la boucle; dans ces conditions, le tire-bouchon s'enfonce dans le sens du champ magnétique.
- son intensité est proportionnelle à l'intensité I du courant et inversement proportionnelle au rayon R de la boucle:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$$

B intensité du champ magnétique en [T]

μ_0 « perméabilité magnétique du vide » ou plus simplement « constante d'induction » en [T · m · A⁻¹]

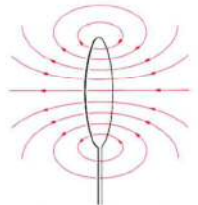
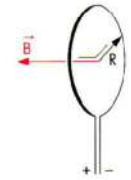
I intensité du courant dans la boucle en [A]

R rayon de la boucle en [m].

Les lignes de champ sont représentées sur le schéma.

Dans le cas d'une bobine constituée de N spires, l'intensité du champ magnétique au centre vaut:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot R}$$



Configuration des lignes magnétiques produites par un anneau dans lequel circule un courant I. Les lignes magnétiques sont toujours fermées.

Champ magnétique dans un solénoïde

Un solénoïde est constitué d'un long fil enroulé sur un cylindre de longueur l et de rayon R ($l \gg R$); on désigne par N le nombre d'enroulements de fil.

On constate, lorsque le solénoïde est parcouru par un courant d'intensité I , qu'à l'extérieur du solénoïde le champ magnétique est très faible alors qu'il est quasiment uniforme à l'intérieur.

A l'intérieur, le champ magnétique a les caractéristiques suivantes:

- sa direction est le long de l'axe du solénoïde;
- son sens s'obtient de la même façon que pour une boucle circulaire;
- son intensité est donnée par:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{l}$$

B intensité du champ magnétique en [T]

μ_0 « perméabilité magnétique du vide » ou plus simplement « constante d'induction » en [T · m · A⁻¹]

N nombre de spires du solénoïde

I intensité du courant dans le solénoïde en [A]

l longueur du solénoïde en [m].



Solénoïde.

Bobines de Helmholtz

On considère deux bobines identiques de rayon R , constituées de N spires, disposées à la distance R l'une de l'autre et parcourues par un courant d'intensité I dans le même sens.

On constate expérimentalement que le champ magnétique créé entre les deux bobines est quasiment uniforme. On calcule son intensité par:

$$B = \frac{8 \cdot \sqrt{5} \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{25 \cdot R}$$

B intensité du champ magnétique en [T]

μ_0 « perméabilité magnétique du vide » ou plus simplement « constante d'induction » en [T · m · A⁻¹]

N nombre de spires de chaque bobine

I intensité du courant dans les bobines en [A]

R rayon des bobines et distance entre les bobines en [m].



Bobines de Helmholtz.

Les bobines disposées de cette façon sont appelées bobines de Helmholtz. On les utilise en laboratoire pour créer des champs magnétiques uniformes.

sens du courant; dans ces conditions, le sens de la rotation des poignées du tire-bouchon indique le sens du champ magnétique.

- son intensité est proportionnelle à l'intensité I du courant et inversement proportionnelle à la distance r du fil:

5 Effet du champ magnétique sur une charge en mouvement; la force de Lorentz

On constate expérimentalement qu'une charge électrique immobile dans un champ magnétique ne subit aucune force. Par contre, si cette particule est en mouvement, elle peut être déviée de sa trajectoire initiale durant son passage dans un champ magnétique.

Une champ magnétique exerce une force sur une particule chargée en mouvement; cette force est appelée force de Lorentz.

EXPÉRIENCE On envoie des particules chargées à la vitesse v dans un champ magnétique dont on connaît la direction et le sens. La déviation des particules est mise en évidence par leur impact visible sur un écran.

On fait les constatations suivantes:

- Si la vitesse initiale de la particule a la même direction que le champ magnétique, sa trajectoire n'est pas déviée;
- Si la vitesse initiale de la particule est perpendiculaire au champ magnétique, elle subit une déviation latérale; sa trajectoire est une portion de cercle dans un plan perpendiculaire au champ magnétique.

- La direction de la force de Lorentz est à chaque instant perpendiculaire à la vitesse de la particule (car dans tout mouvement circulaire uniforme, la force est perpendiculaire à la vitesse) et perpendiculaire au champ magnétique;
- le sens de la force de Lorentz est indiqué sur les schémas ci-contre.

On constate de plus que:

- l'intensité de la force de Lorentz est proportionnelle à la vitesse v des particules et à leur charge électrique q :

$$\frac{F_{Lorentz}}{q \cdot v} = \text{constante}$$

Par définition, la constante est l'intensité B du champ magnétique.

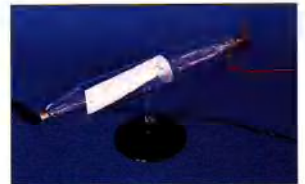
On peut écrire: $F_{Lorentz} = q \cdot v \cdot B$

$F_{Lorentz}$ intensité de la force de Lorentz en [N]

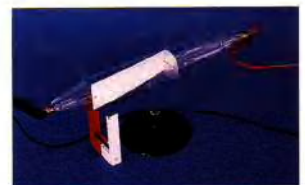
q charge électrique de la particule en [C]

v vitesse de la particule en [m · s⁻¹]

B intensité du champ magnétique en [T].



Le faisceau d'électrons ne subit aucune déviation.



Le champ magnétique de l'aimant induit une déviation du faisceau.

L'intensité B d'un champ magnétique s'exprime en tesla [T] en hommage à l'ingénieur yougoslave Nicholas Tesla (1856-1943). Elle se mesure avec un appareil appelé teslamètre.

Un champ magnétique de 1 T exercerait une force de 1 N sur une particule de 1 C se déplaçant à 1 m/s dans une direction perpendiculaire au champ magnétique.

Le champ magnétique proche de la surface de la Terre est de l'ordre de 10^{-5} T à l'Equateur. Le champ magnétique à la surface du Soleil est de l'ordre de 0,01 T et de 0,1 T à l'intérieur des taches solaires. Il peut atteindre 10⁸ T à la surface d'une étoile à neutrons.

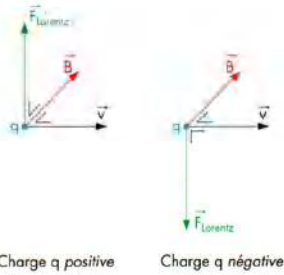
Les champs magnétiques les plus intenses créés en laboratoire sont de l'ordre de 10 T, ceux que l'on trouve à l'intérieur d'un moteur électrique en fonctionnement sont de l'ordre de 1 T.

Les propriétés observées dans l'expérience permettent de définir vectoriellement la force de Lorentz par le produit vectoriel :

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

De façon générale, si la vitesse \vec{v} de la particule forme un angle θ quelconque avec la direction du champ magnétique \vec{B} , l'intensité de la force de Lorentz vaut :

$$F_{\text{Lorentz}} = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$$



Charge q positive Charge q négative



Charge q positive

6 Mouvement d'une charge électrique dans un champ magnétique

Un champ magnétique dévie la trajectoire d'une particule chargée électriquement. Dans les tubes des téléviseurs, par exemple, des électrons sont accélérés par un champ électrique, puis déviés par un champ magnétique pour former les images par luminescence lorsqu'ils frappent la surface interne de l'écran.

L'expérience ci-dessous est une autre illustration de l'effet d'un champ magnétique sur une charge électrique en mouvement.

EXPERIENCE Une particule de masse m et de charge q est envoyée à la vitesse \vec{v} perpendiculaire à un champ magnétique \vec{B} . Elle suit un mouvement circulaire uniforme de rayon r car la force de Lorentz qu'elle subit est constamment perpendiculaire à sa vitesse.

Par les lois du MCU, on a :

$$F_{\text{Lorentz}} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad \text{d'autre part :} \quad F_{\text{Lorentz}} = q \cdot v \cdot B$$

En égalant ces deux expressions, on obtient le rayon de la trajectoire :

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

La période T du mouvement est le temps nécessaire à la particule pour faire un tour :

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v}{v \cdot q \cdot B} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

T période en [s]

r rayon de la trajectoire en [m]

v vitesse de la particule en [m · s⁻¹]

m masse de la particule en [kg]

q charge électrique de la particule en [C]

B intensité du champ magnétique en [T].

On constate dans l'expression algébrique ci-dessus que la période est indépendante de la vitesse de la particule.

Si la vitesse \vec{v} n'est pas perpendiculaire au champ magnétique \vec{B} , la charge q suit une trajectoire hélicoïdale, qui résulte de la composition d'un mouvement circulaire uniforme et d'un mouvement rectiligne uniforme.

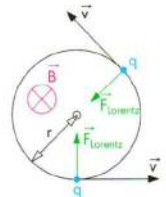
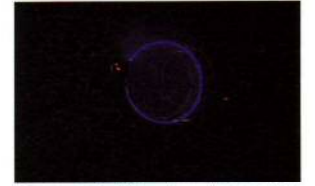


Schéma de la trajectoire d'une particule de charge q positive.



Trajectoire circulaire d'électrons dans un champ magnétique.



Trajectoire hélicoïdale d'électrons dans un champ magnétique.

7 Effet d'un champ magnétique sur un courant électrique ; la force de Laplace

EXPERIENCE Un fil rectiligne de longueur ℓ , relié à un générateur, est placé dans un champ magnétique ; le fil et le champ magnétique sont disposés **perpendiculairement**. On constate que lorsque le courant circule dans le fil, une force appelée force de Laplace s'exerce sur le fil.

Une **champ magnétique exerce une force sur un courant électrique**.

Les caractéristiques de la force de Laplace sont les suivantes :

- sa direction est perpendiculaire au fil et perpendiculaire au champ magnétique ;
- son sens est indiqué sur le schéma ci-contre ;
- son intensité est proportionnelle à l'intensité I du courant et à la longueur ℓ du fil :

$$\frac{F_{\text{Laplace}}}{I \cdot \ell} = \text{constante}$$

La constante est en fait l'intensité B du champ magnétique ; on obtient :

$$\vec{F}_{\text{Laplace}} = I \cdot \vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

F_{Laplace} intensité de la force de Laplace en [N]

I intensité du courant électrique en [A]

ℓ longueur du fil en [m]

B intensité du champ magnétique en [T].

Pour obtenir une expression vectorielle de la force de Laplace satisfaisant les propriétés ci-dessus, on définit un vecteur $\vec{\ell}$ orienté dans le sens du courant électrique dans le fil et de même longueur que le fil. La force de Laplace s'exprime vectoriellement par :

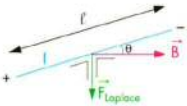
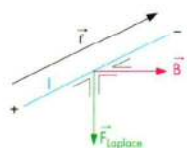
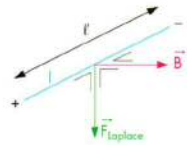
$$\vec{F}_{\text{Laplace}} = I \cdot \vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

De façon générale, si le fil forme un angle θ quelconque avec la direction du champ magnétique \vec{B} , l'intensité de la force de Laplace vaut :

$$F_{\text{Laplace}} = I \cdot \ell \cdot B \cdot \sin \theta$$



Aucun courant ne circule dans le fil rectiligne. Un courant circule dans le fil rectiligne.



8 Force entre deux courants rectilignes

EXPERIENCE Deux longs fils parallèles de longueur ℓ sont placés côte à côte, à la distance r l'un de l'autre. Lorsqu'on fait passer des courants d'intensité I_1 et I_2 dans les fils, on fait les constatations suivantes :

- si les deux fils sont parcourus par des courants de même sens, ils s'attirent ;
- si les deux fils sont parcourus par des courants de sens opposés, ils se repoussent.

Le premier fil crée dans son voisinage un champ magnétique noté B_1 sur le schéma ; son intensité, à l'endroit où se trouve le second fil vaut :

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Ce champ magnétique exerce sur le second fil une force de Laplace, notée F_2 sur le schéma et dont l'intensité vaut :

$$F_2 = I_2 \cdot \ell \cdot B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

F_2 intensité de la force de Laplace exercée sur le second fil en [N]

μ_0 « perméabilité magnétique du vide » ou plus simplement « constante d'induction » en [T · m · A⁻¹]

I_1 intensité du courant dans le premier fil en [A]

I_2 intensité du courant dans le second fil en [A]

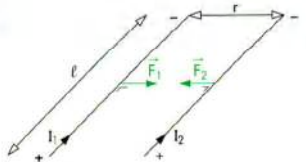
ℓ longueur des fils en [m]

r distance entre les fils en [m].

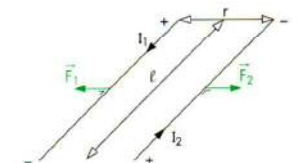
On établit, par le même procédé, qu'une force de même intensité s'exerce sur le premier fil. Il s'agit d'une paire de forces d'action et de réaction. Selon la 3^e loi de Newton, ce sont des forces opposées (même direction, même intensité, sens opposés).

Définition de l'ampère

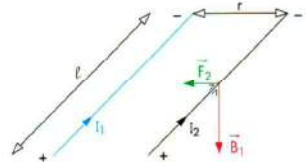
L'expérience précédente est l'étalon pour la définition de l'ampère. Un ampère est l'intensité du courant qui, maintenu dans deux fils parallèles, de longueur infinie et distants de 1 m provoque une force de $2 \cdot 10^{-7}$ N par mètre de fil.



Courants de même sens : attraction.



Courants de sens opposés : répulsion.



Chapitre 52. Induction électromagnétique

Un courant électrique crée un champ magnétique. On peut alors se poser la question inverse : « un champ magnétique peut-il créer un courant électrique dans un circuit ? » C'est pour répondre à cette question que Michael Faraday (1791 - 1867) entreprit en Angleterre des expériences qui aboutirent à la description du phénomène d'induction électromagnétique ; ses résultats furent publiés en 1831. Des expériences semblables furent conduites indépendamment et à la même époque par le physicien américain Joseph Henry qui publia ses résultats plus tard. L'induction électromagnétique tient une place importante dans notre vie quotidienne puisque la quasi totalité de l'électricité utilisée dans le monde est produite de cette façon.

1 Les expériences de Faraday

Faraday réalisa différentes expériences en utilisant, entre autres, des piles, des bobines de fil, un galvanomètre et des aimants. Les quatre expériences décrites ci-dessous en sont des adaptations qui mettent en évidence les aspects nécessaires à la compréhension du phénomène.

EXPERIENCE Un microampèremètre est connecté à une bobine conductrice. Si un aimant est maintenu immobile près de la bobine, le microampèremètre ne détecte aucun courant dans la bobine.

On constate qu'un champ magnétique stationnaire ne produit aucun courant dans la bobine.

EXPERIENCE On reprend l'expérience précédente, mais on déplace l'aimant en le faisant, par exemple, osciller à l'extrémité d'un fil rigide. On constate que le microampèremètre détecte un courant électrique dans la bobine lorsque l'aimant s'en approche et un courant de sens opposé lorsqu'il s'en éloigne.

Dans ce cas, l'intensité du champ magnétique à travers la bobine n'est pas constante : elle augmente lorsque l'aimant s'en approche et diminue lorsqu'il s'en éloigne.



- Les vecteurs \vec{B} et \vec{S} déterminent un angle aigu θ .

Par définition, le flux Φ_B du champ magnétique à travers la surface S est le produit scalaire :

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \theta$$

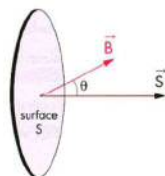
Le flux du champ magnétique s'exprime en weber [Wb] ; $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$.

Le flux dépend de l'intensité B du champ magnétique, de la section S de la bobine et de son orientation relativement au champ magnétique (angle θ). En utilisant la notion de flux, le phénomène d'induction électromagnétique peut alors être caractérisé par l'énoncé suivant :

un courant induit est créé dans une bobine située dans un champ magnétique si le flux du champ magnétique à travers la bobine varie.

Remarques

- Le flux peut être défini pour tout type de champ : gravitationnel, électrique, magnétique, ...
- La définition du flux peut être généralisée au cas d'une surface quelconque et d'un champ magnétique non uniforme ; il faut alors avoir recours au calcul intégral.



3 Tension induite La loi d'induction de Faraday

Comme tout courant électrique, un courant induit est entre-tenu par une tension électromotrice appelée tension induite : U_{ind} . Cette tension peut être mesurée par un voltmètre.

EXPERIENCE Un voltmètre est branché aux bornes d'une bobine (contenant N spires de section S) placée dans le champ magnétique uniforme créé par des bobines de Helmholtz de rayon R_H (voir fin du chapitre « Electromagnétisme »).

Un ampèremètre indique l'intensité du courant dans les bobines de Helmholtz. Cette intensité est initialement nulle ; on l'augmente de façon régulière pendant une durée Δt jusqu'à la valeur I_H .



On constate qu'une variation de l'intensité du champ magnétique produit un courant électrique dans la bobine. Ce courant est appelé courant induit.

EXPERIENCE Un aimant immobile est placé près d'une bobine souple qu'on déforme ; on constate que le microampèremètre détecte un courant induit pendant la déformation de la bobine. Dans ce cas, la section de la bobine varie durant l'opération. Le courant induit circule dans un sens si on diminue la section de la bobine et dans le sens opposé si on l'augmente.

On constate qu'il y a apparition d'un courant induit dans la bobine pendant qu'on modifie sa section.

EXPERIENCE Un aimant immobile est placé près d'une bobine que l'on fait pivoter autour d'un de ses diamètres. On constate que le microampèremètre détecte un courant induit qui circule alternativement dans un sens puis dans l'autre. Dans ce cas, l'orientation de la bobine change durant l'opération.

On constate qu'il y a apparition d'un courant induit dans la bobine si son orientation par rapport au champ magnétique change.



Bobine qu'on pivote devant un aimant.

En résumé, un courant induit est créé dans une bobine située dans un champ magnétique si l'une ou l'autre des conditions ci-dessous est satisfaite :

- l'intensité du champ magnétique varie ;
- la section de la bobine varie ;
- l'orientation de la bobine relativement au champ magnétique varie.

Ce phénomène est appelé induction électromagnétique.

2 La notion de flux

On considère une surface plane S , par exemple la section de l'une des spires de la bobine utilisée dans les expériences précédentes, placée dans un champ magnétique uniforme représenté par le vecteur \vec{B} .

- La surface plane peut être représentée par un vecteur \vec{S} de norme égale à la valeur S de la surface et perpendiculaire à celle-ci.

Pendant l'expérience, on lit sur le voltmètre la valeur de la tension induite dans la bobine.

On constate que la valeur (absolue) de la tension induite dans la bobine est :

- constante durant l'opération ;
- plus grande si le flux varie rapidement que s'il varie lentement.

Cette expérience nous permet de déduire que la valeur (absolue) de la tension induite dans une bobine dépend de la vitesse de variation du flux.

Pour une spire, on l'exprime par la relation :

$$|U_{ind}| = \left| \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \right|$$

Pour une bobine de N spires, on l'exprime par la relation :

$$|U_{ind}| = N \cdot \left| \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \right|$$

Remarques

On obtient une tension induite de 1 V si le flux varie au taux constant de 1 Wb/s.

Si la variation de flux est irrégulière, la tension induite dans chaque spire de la bobine n'est pas constante. Sa valeur est donnée à chaque instant par la dérivée du flux par rapport au temps :

$$|U_{ind}| = \left| \frac{d\Phi_B}{dt} \right|$$

Calcul du champ magnétique créé par les bobines de Helmholtz

Pour : $R_H = 0.2 \text{ m}$
 $N_H = 154 \text{ spires}$
 $I_H = 0.84 \text{ A}$
 $B = \frac{8 \cdot \mu_0 \cdot N_H \cdot I_H}{5 \cdot R_H \cdot \sqrt{5}}$

On calcule : $B = 5.8 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

Calcul de la variation de flux dans la bobine

Le flux magnétique à travers chaque spire de la bobine augmente jusqu'à la valeur Φ_B . Le flux étant initialement nul, cette valeur est égale à l'augmentation $\Delta \Phi_B$ du flux durant l'opération.

Pour : $S = 2.82 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
 $\Delta \Phi_B = B \cdot S \cdot \cos \theta$

On calcule : $\Delta \Phi_B = 1.64 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$

Calcul de la tension induite

Pour : $N = 12000$
 $\Delta t = 4.9 \text{ s}$

$$|U_{ind}| = N \cdot \left| \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \right|$$

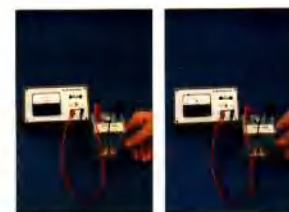
On calcule : $|U_{ind}| = 4.0 \text{ mV}$

Valeur lue sur le voltmètre durant l'expérience

$$U_{ind} = 4.2 \text{ mV} \pm 0.5 \text{ mV}$$

4 Tension induite La loi de Lenz

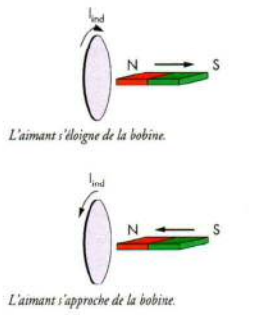
EXPERIENCE Un microampèremètre est branché sur une bobine conductrice. On déplace un aimant perpendiculairement au plan de la bobine et on note le sens du courant induit indiqué par l'affichage de valeurs positives ou négatives de l'intensité du courant.



Comme le montrent les figures ci-contre, on constate que le sens du courant induit n'est pas le même si l'aimant s'éloigne ou s'approche de la bobine.

Pour trouver un critère permettant de définir le sens du courant induit, on fait l'analyse suivante dans le cas où l'aimant s'approche de la bobine.

- Le mouvement de l'aimant provoque une augmentation du champ magnétique à travers la bobine.
- L'augmentation ΔB du champ magnétique crée un courant induit dans la bobine.
- Le courant induit dans la bobine crée simultanément un champ magnétique noté \vec{B}_{ind} .
- On constate que \vec{B}_{ind} est de sens opposé à $\Delta \vec{B}$.

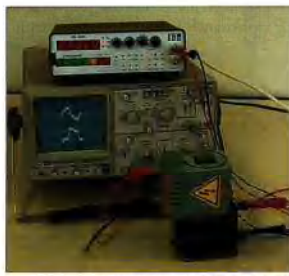
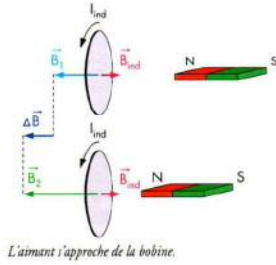


On en déduit la loi de Lenz:

la tension induite est telle que le courant induit s'oppose à la cause qui lui a donné naissance.

Autrement dit:

- si le courant induit est dû à l'augmentation de flux d'un champ magnétique \vec{B} , son sens est tel que le champ magnétique \vec{B}_{ind} est de sens opposé à \vec{B} ;
- si le courant induit est dû à la diminution de flux d'un champ magnétique \vec{B} , son sens est tel que le champ magnétique \vec{B}_{ind} est de même sens que \vec{B} .



Une bobine alimentée par une tension triangulaire (trace supérieure) induit une tension carrée dans la seconde bobine (trace inférieure). On remarque que la tension induite est l'opposé (loi de Lenz) de la dérivée par rapport au temps de la tension appliquée.

5 La loi de l'induction

La loi de Faraday exprime la valeur absolue de la tension induite alors que la loi de Lenz définit son sens.

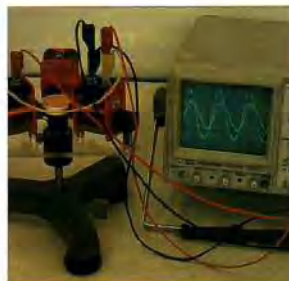
On regroupe ces deux lois dans la loi de l'induction qui fournit toutes les caractéristiques de la tension induite dans un circuit:

$$U_{ind} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

Le signe "-" indique l'opposition du courant induit à la cause qui l'a créé.

Une bobine tournant dans un champ magnétique constitue un générateur: elle peut entretenir un courant électrique dans un circuit fermé auquel elle est branchée. Ce type de générateur est appelé alternateur.

Pour des raisons techniques, dans les alternateurs qui équipent toutes les centrales électriques, c'est le champ magnétique produit par des électroaimants qui tourne, alors que la bobine est fixe.



Alternateur de démonstration.



Alternateur de centrale électrique.

7 Caractéristiques de la tension du réseau

La tension disponible sur une prise d'appartement est une tension sinusoïdale:

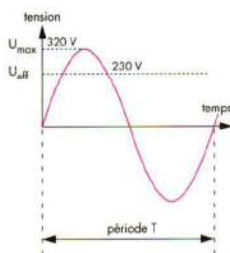
$$U(t) = U_{max} \cdot \sin \omega t$$

Elle satisfait les normes européennes énumérées ci-dessous.

- Sa valeur maximale vaut environ 320 V.
- Sa période T, c'est-à-dire la durée séparant deux passages successifs par la même valeur vaut T = 0,02 s.
- Sa fréquence f ou ν (nu) est l'inverse de la période: elle représente le nombre de périodes par seconde et s'exprime en hertz [Hz]. Elle vaut 50 Hz.
- Sa pulsation ω est liée à la vitesse angulaire de rotation de l'alternateur; elle vaut ω = 2 · π · f = 314 s⁻¹.
- Comme la tension varie au cours du temps, la puissance fournie à un récepteur branché sur une prise (par exemple un fer à repasser) varie aussi.

On appelle tension efficace U_{eff} aux bornes de la prise la tension constante qui fournirait au récepteur la même quantité d'énergie sur une assez longue durée d'utilisation. Pour une tension sinusoïdale, $U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$. La tension efficace aux bornes d'une prise vaut environ 230 V. Autrement dit, un fer à repasser branché sur une prise dissipe, sur une assez longue durée, autant de chaleur que s'il était branché sur une tension constante de 230 V.

Un voltmètre indique la tension efficace aux bornes de la prise.



Tension aux bornes d'une prise.

6 Les alternateurs

EXPERIENCE Les extrémités d'une boucle conductrice de surface S, placée dans un champ magnétique uniforme, sont connectées à un oscilloscope par l'intermédiaire de bagues et de balais. L'oscilloscope indique la tension aux extrémités de la boucle en fonction du temps en traçant sur un écran la courbe correspondante.

On fait tourner la boucle à la vitesse angulaire ω constante autour d'un axe perpendiculaire au champ.

Comme l'orientation de la boucle relativement au champ magnétique varie, il apparaît une tension induite dans la boucle. On constate sur l'oscilloscope que cette tension varie sinusoïdalement en fonction du temps.

- Si l'on suppose qu'à l'instant t = 0, le champ magnétique \vec{B} est perpendiculaire au plan de la boucle, l'angle θ déterminé par le vecteur surface \vec{S} de la boucle et le champ magnétique est donné en fonction du temps t par:

$$\theta = \omega \cdot t$$

- Le flux ϕ_B du champ magnétique à travers la boucle est donné en fonction du temps par:

$$\phi_B(t) = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

- La tension induite détectée par l'oscilloscope s'obtient en dérivant le flux par rapport au temps:

$$U_{ind}(t) = - \frac{d\phi_B(t)}{dt} = \omega \cdot B \cdot S \cdot \sin \omega t$$

Si l'on remplace la boucle par une bobine de N spires, on a:

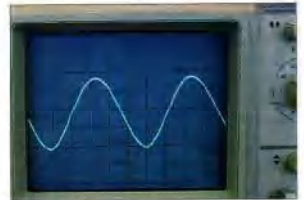
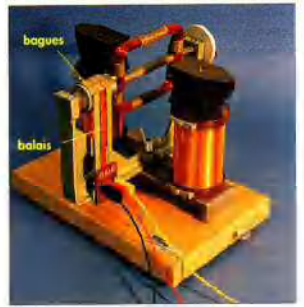
$$U_{ind}(t) = - N \cdot \frac{d\phi_B(t)}{dt} = N \cdot \omega \cdot B \cdot S \cdot \sin \omega t$$

La tension induite dans la bobine varie alternativement entre une valeur maximale positive:

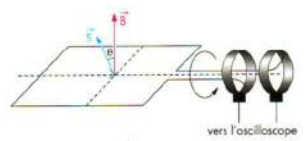
$$U_{max} = N \cdot \omega \cdot B \cdot S$$

et une valeur minimale négative:

$$U_{min} = - N \cdot \omega \cdot B \cdot S$$



Ecran d'oscilloscope.



vers l'oscilloscope

8 Les courants de Foucault

Lorsqu'on fait tomber une plaque d'aluminium entre les pôles d'un aimant, on constate qu'elle est fortement ralentie.

Ce phénomène s'explique de la façon suivante:

- Le champ magnétique crée une force de Lorentz sur les électrons libres de la plaque métallique.
- Il y a apparition de courants induits, appelés courants de Foucault, dans la plaque métallique.
- Des forces de Laplace agissent sur les portions des courants de Foucault se trouvant dans le champ magnétique de l'aimant. Selon la loi de Lenz, elles s'opposent au mouvement de la plaque.



Plaque d'aluminium.

Cet effet de freinage est utilisé dans les ralentisseurs magnétiques des poids lourds, obligatoires en Suisse.

Le freinage est moins efficace si la plaque d'aluminium est évidée car la densité surfacique des courants de Foucault est moindre; il devient quasiment nul sur un peigne.



Plaque évidée et peigne.

9 Les transformateurs

Un transformateur est un appareil dont le fonctionnement est basé sur le phénomène d'induction. Il permet d'élever ou d'abaisser une tension.

Les transformateurs sont utilisés dans les réseaux de distribution du courant électrique.

La tension efficace de 27 000 V produite par les alternateurs d'une centrale peut être élevée à 380 000 V dans les lignes de transport.

Dans les appareils « domestiques », la tension efficace de 230 V d'une prise est abaissée à quelques volts pour alimenter un ordinateur.

Un transformateur est constitué d'un cadre ou d'un noyau de fer sur lequel sont enroulés deux bobines.

Le premier enroulement contenant N_1 spires (enroulement primaire) est relié à une source de tension alternative (un transformateur ne peut pas fonctionner avec une tension constante).

Le second enroulement, appelé enroulement secondaire, contient N_2 spires. Un récepteur électrique peut être connecté au secondaire.

Le rôle du cadre ou du noyau de fer est de « canaliser » les lignes de champ magnétique de sorte qu'il y ait le même flux Φ à travers n'importe quelle section du cadre ou du noyau; de plus, il augmente l'intensité du champ.

Le fonctionnement d'un transformateur fait intervenir une cascade de phénomènes dont l'analyse détaillée est complexe. On en donne ici une description simplifiée mettant en évidence le phénomène principal:

le courant variable dans le primaire crée un champ magnétique dont le flux à travers n'importe quelle section du cadre ou du noyau varie. Cette variation de flux à travers les spires du secondaire entraîne une tension induite à ses bornes. Bien que les deux circuits soient séparés, la variation de la tension U_1 du circuit primaire engendre une tension U_2 dans le secondaire.

Dans le cas d'un transformateur idéal (pour lequel la résistance du primaire est négligeable et le circuit secondaire est ouvert) les tensions U_1 et U_2 satisfont la relation:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Cette relation est approximative dans la plupart des cas mais elle se vérifie pour les transformateurs utilisés dans le réseau de distribution du courant; dans ce cas, la puissance électrique du primaire est presque intégralement transmise au secondaire.

On limite les courants de Foucault dans le cadre ou le noyau en lui donnant une structure feuilletée (plaques fines séparées par un isolant); on évite ainsi un échauffement important du cadre ou du noyau par effet Joule.

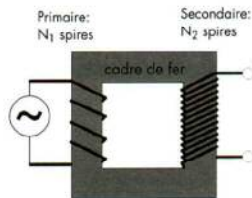


Schéma d'un transformateur de démonstration.



Transformateur à noyau utilisé en radio.

10 La distribution du courant électrique

Le courant électrique est produit par les alternateurs d'une centrale électrique sous une tension efficace de l'ordre de 27 000 V.

Il existe plusieurs types de centrales (données de 1999):

- Les centrales nucléaires qui transforment l'énergie nucléaire de l'uranium; en Suisse, il existe 5 centrales nucléaires qui produisent environ 35% de l'électricité.
- Les centrales à accumulation qui transforment l'énergie potentielle de l'eau retenue dans des lacs artificiels; elles produisent en Suisse environ 36% de l'électricité.
- Les centrales au fil de l'eau qui transforment l'énergie cinétique du courant des rivières; elles produisent en Suisse environ 25% de l'électricité.
- Les centrales thermiques qui transforment l'énergie chimique du charbon, du gaz ou du fuel; elles produisent en Suisse environ 3% de l'électricité.
- La centrale solaire photovoltaïque de Mont Soleil; elle produit en Suisse environ 1% de l'électricité.

Le courant électrique est amené de la centrale à l'utilisateur par l'intermédiaire de lignes à haute tension; cette pratique permet de limiter la dissipation d'énergie par effet Joule dans les lignes de transport. (Source OFEL)

Considérons un récepteur électrique (par exemple une machine à laver) de puissance $P = 1000$ W, alimenté sous la tension d'utilisation $U = 230$ V. Le courant est amené de la centrale par une ligne de transport de résistance $R = 5 \Omega$ ($2,5 \Omega$ pour l'aller et $2,5 \Omega$ pour le retour).

- En supposant que le courant soit transporté directement sous la tension d'utilisation U ,

l'intensité du courant dans la ligne de transport vaut:

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

et la puissance dissipée par effet Joule vaut:

$$P_{\text{Joule}} = R \cdot I^2 = \frac{R \cdot P^2}{U^2} = \text{environ } 100 \text{ W}$$



Centrale nucléaire (Gosgen).



Barrage d'une centrale à accumulation (Emosson).



L'ancienne centrale thermique de Chavillon.



Hélice d'une centrale au fil de l'eau (Brügg, Bienne).

- En réalité, la tension est élevée par un transformateur à la centrale; le courant est transporté sous haute tension U' qui est ensuite abaissée par un transformateur à la tension d'utilisation U . En admettant que la puissance est intégralement transmise par le transformateur, l'intensité du courant dans la ligne de transport vaut:

$$I' = \frac{P}{U'}$$

Dans notre exemple, pour une tension de transport de 100 000 V, la puissance dissipée vaut:

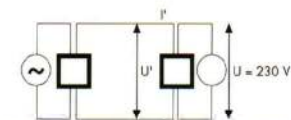
$$P'_{\text{Joule}} = R \cdot I'^2 = \frac{R \cdot P^2}{U'^2} = \text{environ } 0,5 \text{ mW}$$

La puissance dissipée par effet Joule est inversement proportionnelle au carré de la tension de transport; en doublant la tension de transport, la puissance dissipée par effet Joule est divisée par quatre.

En réalité, la distribution du courant se fait sous plusieurs niveaux de tension:

- Les lignes à très haute tension (230 000 V et 400 000 V) pour le transport du courant sur de très grandes distances; elles constituent le réseau international de transport de courant.
- Les lignes à haute tension (50 000 V à 150 000 V) correspondant à l'alimentation régionale en courant. Elles constituent le réseau primaire.
- Les lignes à moyenne tension (10 000 V à 35 000 V) permettant l'alimentation des zones urbaines ou rurales. Elles constituent le réseau secondaire.
- Les lignes à basse tension (moins de 1000 V) distribuant localement le courant sous la tension d'utilisation (230 V ou 400 V).

Les tensions sont élevées ou abaissées en différents postes de couplage et de transformation sur lesquels les réseaux sont interconnectés.



Ligne THT.



Ligne HT.

Ligne BT.



Poste de transformation du réseau international.

Chapitre 53. Sécurité en électricité

1 L'homme en tant que conducteur électrique

La constitution de tout être vivant, par la peau et le système cardio-vasculaire, constitue un circuit électrique résistant. Mis sous tension, le corps humain se comporte comme un récepteur électrique, il est donc traversé par un courant électrique qui peut provoquer de graves brûlures ou la mort.

EXPERIENCE On peut facilement mesurer la résistance électrique du corps humain avec un ohmmètre. Il suffit pour cela de serrer fermement entre les doigts des deux mains l'extrémité des câbles de mesures. On réalise successivement l'expérience avec les doigts secs puis avec les doigts mouillés.

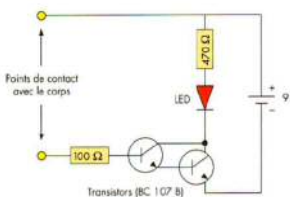
EXPERIENCE Il est aussi possible de construire un appareil très simple utilisé pour tester la conductivité d'une ou plusieurs personnes se tenant la main.

Empiriquement, on admet que la résistance globale du corps humain se calcule de la façon suivante:



$$R = 2 \cdot R_p + R_i$$

R_p = résistance de la peau ou résistance de contact
 R_i = résistance interne du corps



La résistance de contact R_p dépend de différents facteurs et peut être très variable selon que la peau est sèche, humide, fine ou grumeleuse; elle dépend aussi de la grandeur de la surface de contact et de la tension. Le tableau ci-dessous résume quelques valeurs de résistance de contact en fonction de la tension appliquée:

Etat de la peau	Tension = 1 V	10 V	20 V	50 V	100 V	300 V
sèche	21 000 Ω	2 400 Ω	1 600 Ω	1 000 Ω	700 Ω	500 Ω
normale	8 500 Ω	1 000 Ω	650 Ω	400 Ω	300 Ω	200 Ω
humide	1 700 Ω	200 Ω	130 Ω	80 Ω	60 Ω	40 Ω

La résistance de contact baisse avec l'augmentation de tension et de l'humidité de la peau.

La résistance interne du corps dépend avant tout de la longueur du parcours du courant. Les variations d'un individu à l'autre sont relativement faibles. On admet généralement la valeur de 500 Ω par membre, pour une tension de 230 V.

2 Effet du courant électrique sur le corps humain

L'effet du courant électrique sur l'être humain dépend de l'intensité du courant, du chemin parcouru et de la durée d'électrocution. Les valeurs ci-dessous sont applicables à un courant alternatif de fréquence 50 Hz, si le cheminement du courant passe par le cœur (main-main ou main-pied).

à partir d'1 mA	Seuil d'attention, léger picotement à l'endroit en contact.
de 5 à 15 mA	Sensation de crampes légères, il est possible de lâcher la source.
de 15 à 30 mA	Tétanisation des muscles, il n'est plus possible de lâcher la source.
de 30 à 50 mA	Très forte téanisation des muscles, difficultés respiratoires, la mort par électrocution intervient 3 à 4 minutes plus tard, si la source n'est pas neutralisée.
au-dessus de 50 mA	Fibrillation cardiaque après quelques secondes, mort par électrocution.

Pour éviter ces dangers, il ne faut jamais:

- Modifier les fusibles ou les tableaux électriques de quelque manière que ce soit.
- « Bricoler » les installations électriques (rallonges, prises multiples...) sans se renseigner sur la manière correcte de s'y prendre. En particulier, installer une fiche à deux contacts sur un appareil prévu pour avoir une mise à terre sur le troisième conducteur, car on met sa vie en danger dès qu'il y a un mauvais ou un faux contact dans l'appareil.
- Utiliser des appareils trop anciens ou défectueux.
- Installer, dans une salle de bains, des appareils électriques branchés sur le réseau, dont le cordon est assez long pour permettre leur utilisation depuis la baignoire ou la douche.
- Ignorer les prescriptions d'utilisation des appareils électriques (la puissance maximale des ampoules utilisables dans une lampe par exemple).
- S'approcher des lignes électriques (haute tension ou lignes d'alimentation des chemins de fer).
- Faire des farces avec du courant électrique.



Un exemple de ce que l'on ne devrait pas voir!



Ne pas s'approcher des lignes électriques, danger de mort!



Un code de couleurs permet de reconnaître le courant admissible par un fusible: 6 A-vert; 10 A-rouge; 16 A-gris; 20 A-bleu, etc.

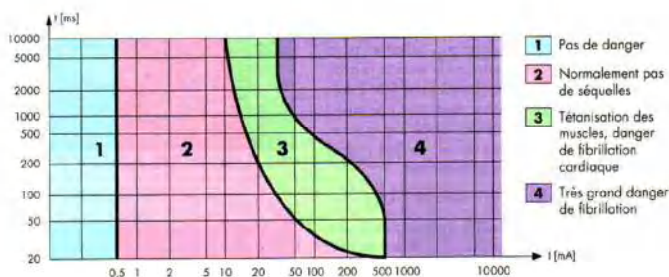
3 Les appareils de protection: fusible, disjoncteur

Afin d'éviter un échauffement des lignes d'alimentation électrique, le courant est limité par divers appareils, en fonction de la puissance admissible dans les lignes. Pour le réseau domestique (éclairage et autres de courant faible puissance), le courant maximal admissible vaut 10 A. Les alimentations d'appareils particuliers (cuisinière, four, machine à laver, etc.) sont limitées à des courants de 15 à 25 A.

Fusible

Le fusible est un appareil, branché en série dans un circuit, qui limite le courant à une valeur prédéterminée. Il est constitué d'un corps isolant (porcelaine ou verre) creux traversé par un mince fil conducteur qui s'échauffe lors du passage du courant électrique et fond lorsque le courant dépasse la valeur nominale.

L'influence de la durée d'électrocution est illustrée par le graphique suivant:



L'intensité du courant traversant le corps humain dépend en outre d'autres facteurs tels que: qualité des vêtements, conductibilité du sol, mise à terre éventuelle.

Ainsi, si la tension appliquée est de 230 V, l'intensité du courant sera d'environ 55 mA. Cette valeur peut avoir des conséquences mortelles, si la durée d'électrocution dépasse une période cardiaque (env. 0,8 s.). En cas d'humidité élevée, la résistance globale peut chuter à 1 000 Ω, ce qui conduit, pour la même tension appliquée, à une intensité de courant d'env. 200 mA. Cette intensité de courant est significativement mortelle.

Les dangers directs

- Le courant électrique produit de la chaleur et peut brûler des parties du corps.
- Le courant électrique agit sur les muscles et peut paralyser (on dit aussi « téaniser ») le cœur (arrêt cardiaque) ou la cage thoracique (arrêt respiratoire) ou les deux.
- Le courant électrique peut provoquer des réactions chimiques dans le sang (électrolyse) qui détruisent les substances vitales.

Les dangers indirects

- Les blessures ou les chutes lors d'une secousse électrique (sur une échelle par exemple).
- L'incendie; ce danger est l'un des plus importants.
- L'explosion d'un gaz combustible provoquée par un arc électrique.

Un anneau de calibrage est vissé au fond de la douille du fusible et limite la valeur de fusible à utiliser. A noter qu'un fusible de calibre donné supporte pendant un court instant (quelques secondes) un courant plus important que sa valeur nominale. Il existe de plus des fusibles lents (symbole T) et rapides (symbole F ou FF).

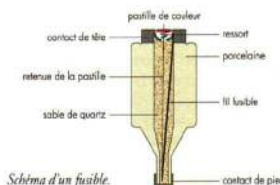


Schéma d'un fusible.

Disjoncteur

Le disjoncteur joue le même rôle que le fusible. Son avantage réside dans le fait qu'il peut être réarmé indéfiniment après avoir disjuncté.

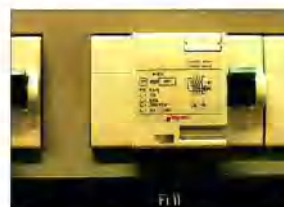
Le disjoncteur fonctionne selon deux programmes distincts: par échauffement (bilame) et par augmentation de champ magnétique (bobine) en cas de court-circuit; ces deux composants sont montés en série, le bilame coupe le circuit par échauffement relativement lent, la bobine, par augmentation rapide du champ magnétique en cas de court-circuit, réagit plus rapidement.



Disjoncteurs.

Disjoncteur à courant de défaut ou FI

Le FI fonctionne comme un disjoncteur rapide (0,02 à 0,2 s) réagissant à un faible courant de l'ordre de: 10 à 30 mA. Les deux conducteurs (phase et neutre) traversent une bobine torique en série avec un électroaimant. Lorsque la différence de courant entre phase et neutre dépasse 10 à 30 mA, selon le type de FI, la bobine torique est le siège d'un courant induit qui alimente l'électroaimant, qui coupe rapidement le circuit d'alimentation. De ce fait, un appareil, mal isolé ou défectueux, n'est plus alimenté après un délai de 0,02 à 0,2 s.



Disjoncteur FI.




En cas de contact du corps humain avec la phase, le disjoncteur FI agit seulement si le corps est aussi en contact avec un sol mouillé, une baignoire, un radiateur... **En effet, le disjoncteur ne se déclenche pas** si le corps touche en même temps phase et neutre d'une même prise.

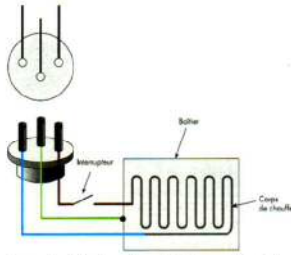
Conducteur de mise à terre

Le réseau domestique (230 V) est constitué de trois conducteurs: phase, neutre (retour du courant) et mise à terre. Le rôle de ce troisième conducteur, ne participant pas au fonctionnement de l'appareil branché, est uniquement protecteur. Le conducteur de mise à terre est branché sur le boîtier de l'appareil et relie ce boîtier directement à la terre.

Ainsi, un défaut d'isolation (phase en contact avec le boîtier) n'aura aucune conséquence pour un utilisateur en contact avec l'appareil lors de son fonctionnement: passant principalement par le chemin le moins résistant, le courant traversant l'individu devient très faible et ne présente plus de danger; de plus, cela crée un court-circuit qui déclenche généralement le disjoncteur ou fait «sauter» un fusible.

Quelques symboles figurant sur les appareils

-  L'appareil a été contrôlé du point de vue de la **sécurité**, de la **qualité** et de la **normalisation**.
-  L'appareil a été contrôlé du point de vue de la **sécurité**.
-  L'appareil est doté d'une **double isolation**.



Lorsque le grille-pain est branché, si le corps de chauffage ou un des fils d'alimentation entre en contact avec le boîtier métallique, cela crée un court-circuit, déclenche le disjoncteur ou fait fondre le fusible. On évite ainsi de s'électrocuter en touchant le grille-pain. Pour les appareils à carcasse en plastique, la mise à terre est inutile et leurs fiches d'alimentation n'ont que deux fils.

Chapitre 54. Les ondes mécaniques

Les ondes occupent une place importante dans notre vie quotidienne; lorsque nous voyons un objet, nos yeux perçoivent une onde lumineuse issue de cet objet et lorsque nous entendons un son, nos oreilles reçoivent une onde sonore émise par une source. Les télécommunications utilisent des ondes de même nature que les ondes lumineuses. On utilise des ondes pour mesurer la vitesse des voitures ou la vitesse du sang dans les artères. Certaines chauves-souris détectent les obstacles et leur proie grâce à des ondes. Ce premier chapitre traite des ondes qui, pour se propager, nécessitent un support matériel (solide, liquide ou gaz).

1 Exemples

Une corde de varappe est déroulée sur une surface horizontale. Il est possible de la perturber en donnant une secousse à l'une de ses extrémités. On voit alors une «bosse» se propager le long de la corde.



Un long ressort est étiré horizontalement. Il est possible de le perturber en pinçant avec les doigts quelques spires à l'une de ses extrémités. Lorsqu'on libère ces spires, on voit un «frémissement» se propager le long du ressort.



Onde dans une corde.

Dans un boulier de Newton, plusieurs billes d'acier suspendues à des fils sont alignées horizontalement. On soulève la première bille et on la laisse frapper la suivante. On constate que la dernière bille est éjectée alors que les autres restent immobiles. L'énergie fournie à la première bille au début de l'opération a été transmise à la dernière par une onde qui s'est propagée dans les billes intermédiaires.



Onde dans un ressort.

Ces trois situations montrent des exemples d'ondes progressives.

- Une onde progressive est :
- une perturbation qui se propage de proche en proche;
 - un transfert d'énergie sans qu'il y ait de déplacement global de matière.

Les «tronds dans l'eau», que l'on peut créer sur la surface d'un lac en lâchant un caillou, sont une forme d'onde. Le mot «onde» est, à l'origine, un synonyme de vague. Les

ondes sonores sont des perturbations qui se propagent dans l'air. Tous les exemples précédents décrivent des ondes dans un milieu matériel et sont appelées ondes mécaniques. En raison des frottements, ces phénomènes tendent à s'atténuer; leur énergie se transforme finalement en chaleur.

Les ondes telles que la lumière appartiennent à la famille des ondes électromagnétiques; elles ont la particularité de pouvoir se propager même dans le vide.

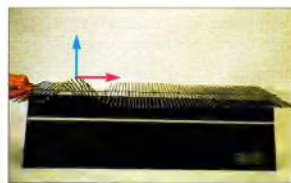
2 Ondes transversales; ondes longitudinales

Une échelle de perroquet est constituée d'une série de barreaux parallèles soudés en leur milieu sur un fil métallique. A l'équilibre, tous les barreaux sont horizontaux. On peut créer une onde en soulevant le premier barreau; une «bosse» se propage le long de l'échelle.



Boulier de Newton.

- Le mouvement global de l'onde se déroule horizontalement le long de l'échelle.
- Au passage de l'onde, chaque barreau se soulève verticalement puis redescend et finit par retrouver sa position d'équilibre. Le mouvement local de chaque barreau se déroule dans une direction verticale.



Onde transversale dans une échelle de perroquet; la flèche rouge indique le mouvement global; la flèche bleue indique le mouvement local.

Dans cet exemple, la direction du mouvement global de l'onde (horizontale) et la direction du mouvement local d'un barreau (verticale) sont perpendiculaires. On dit alors qu'il s'agit d'une onde **transversale**.

Pour l'onde dans un ressort, les choses se passent différemment.

- Le mouvement global de l'onde se déroule horizontalement le long du ressort.
- Au passage de l'onde, les spires du ressort se resserrent puis reprennent leur disposition initiale. Leur mouvement local se déroule aussi dans une direction horizontale.



Onde longitudinale dans un ressort; la flèche rouge indique le mouvement global; la flèche bleue indique le mouvement local.

Dans cet exemple, la direction du mouvement global de l'onde (horizontale) et la direction du mouvement local de chaque spire (horizontale) sont les mêmes. On dit alors qu'il s'agit d'une onde **longitudinale**.

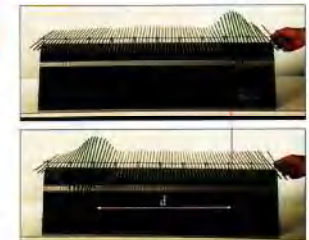
Les ondes électromagnétiques sont toujours des ondes transversales. Les ondes mécaniques sont parfois longitudinales (ondes sonores dans l'air), parfois transversales (vagues à la surface de l'eau).

3 Vitesse de propagation

Comme pour tout mouvement, la vitesse de propagation d'une onde se détermine à partir de la distance parcourue d et de la durée du parcours Δt par :

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

La valeur de la vitesse de propagation dépend du milieu dans lequel se propagent les ondes: la vitesse du son, par exemple, n'a pas la même valeur dans l'air et dans l'eau. Les expériences suivantes illustrent l'influence du milieu de propagation sur la vitesse des ondes.



Pendant la durée Δt qui sépare les deux photos, la perturbation s'est propagée sur la distance d .

On dispose de deux échelles de perroquet qui diffèrent par la longueur de leurs barreaux. Par abus de langage, on appelle «milieu lourd», l'échelle dont les barreaux sont les plus longs et «milieu léger» celle dont les barreaux sont les plus courts.



Milieu «lourd».

En comparant les vitesses de propagation d'une onde dans ces deux échelles, on constate que la vitesse de propagation dans le milieu «léger» est plus grande que dans le milieu «lourd».



Milieu «léger».

Cette constatation s'applique aussi aux ondes transversales dans une corde. Pour distinguer une corde «lourde» d'une corde «légère», on définit la masse linéaire μ d'une corde de masse m et de longueur ℓ est par définition la quantité

$$\mu = \frac{m}{\ell}$$

- μ : masse linéaire de la corde en [kg/m]
- m : masse de la corde en [kg]
- ℓ : longueur de la corde en [m]

Ainsi, plus la masse linéaire d'une corde est grande, plus la vitesse de propagation des ondes est petite.

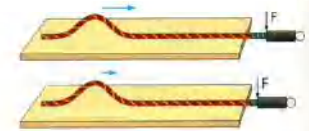


Variation d'amplitude au passage d'un milieu dans l'autre.

La tension de la corde joue aussi un rôle dans la vitesse de propagation: on observe que plus une corde est tendue, plus la vitesse de propagation des ondes est grande.

Des mesures soignées de la vitesse de propagation v d'une onde dans une corde montrent que pour des ondes de petite amplitude, le carré de la vitesse est :

- proportionnel à la tension F de la corde;
- inversement proportionnel à la masse linéaire μ de la corde.



Ces propriétés se traduisent par la relation algébrique

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

- v vitesse de propagation en [m/s]
- F tension de la corde en [N]
- μ masse linéaire de la corde en [kg/m]

4 Réflexion des ondes

On envoie une onde progressive dans une échelle de perroquet. On constate qu'après avoir atteint le dernier barreau, l'onde est renvoyée en sens inverse le long de l'échelle. Il s'agit du phénomène de **réflexion** qui se produit à la limite d'un milieu dans lequel une onde se propage. La première onde est l'onde **incidente** et la seconde est l'onde **réfléchie**.

Deux cas limites de réflexion peuvent se présenter.

- Dans le cas où le dernier barreau est maintenu fixe, on constate que l'onde réfléchie est **renversée**: si l'onde incidente a la forme d'une « bosse », l'onde réfléchie a la forme d'un « creux ».
- Dans le cas où le dernier barreau est laissé libre, on constate que l'onde réfléchie **n'est pas renversée**: si l'onde incidente a la forme d'une « bosse », l'onde réfléchie garde la forme d'une « bosse ».



Réflexion d'une onde avec renversement de l'onde réfléchie.



Réflexion d'une onde sans renversement de l'onde réfléchie.

5 Réflexion et transmission d'une onde au passage de deux milieux

On relie deux échelles de perroquet différentes et on crée une onde à l'extrémité libre de l'une d'elles. Lorsque l'onde **incidente** atteint la jonction des deux échelles, on constate qu'elle se sépare en une onde **réfléchie** dans la première échelle et une onde **transmise** dans la seconde. L'énergie transportée par l'onde incidente se répartit entre l'onde réfléchie et l'onde transmise.

On constate dans tous les cas que **l'onde transmise n'est jamais renversée**.

Deux cas peuvent se présenter pour la disposition de l'onde réfléchie.

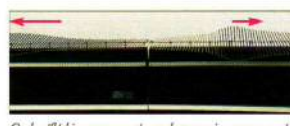
- Si l'onde se propage du milieu « lourd » et « lent » vers le milieu « léger » et « rapide », l'onde réfléchie n'est pas renversée.
- Si l'onde se propage du milieu « léger » et « rapide » vers le milieu « lourd » et « lent », l'onde réfléchie est renversée.



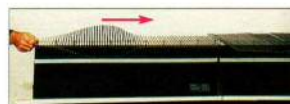
Echelles de perroquet couplées.



Onde incidente.



Onde réfléchie non renversée; onde transmise non renversée.



Onde incidente.



Onde réfléchie renversée; onde transmise non renversée.

6 Les ondes périodiques

En excitant le premier barreau d'une longue échelle de perroquet par une suite d'impulsions identiques et à intervalles de temps réguliers, on voit une série de « bosses » identiques avancer et se succéder le long de l'échelle. On a créé une onde périodique. Si, sur une photographie à un instant donné, la courbe formée par les extrémités des barreaux est identique à celle d'une fonction « sinus », on parle d'ondes sinusoïdales ou harmoniques.

L'**amplitude A** de l'onde désigne le déplacement maximal des barreaux relativement à leur position d'équilibre. Elle s'exprime en mètres.

La **longueur d'onde λ** est la distance entre deux bosses consécutives (ou plus généralement entre deux points successifs qui se trouvent dans le même état de vibration). Elle s'exprime en mètres.

La **période T** de l'onde désigne la durée qui s'écoule entre deux passages successifs d'une « bosse » en un point donné; c'est également la durée d'une oscillation complète (aller et retour) de chaque barreau autour de sa position d'équilibre. Elle s'exprime en secondes.

Il découle des définitions précédentes que pendant une période T, chaque « bosse » avance exactement d'une longueur d'onde λ . Par conséquent, la **vitesse v de propagation** de l'onde, appelée vitesse de phase, est donnée par l'expression:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

- v vitesse de propagation en [m/s]
- λ longueur d'onde en [m]
- T période en [s]

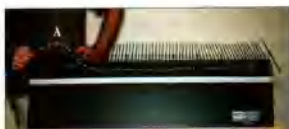
La **fréquence f** de l'onde représente le nombre d'oscillations complètes de chaque barreau pendant 1 s. Elle s'exprime en hertz [Hz]. Si la période vaut par exemple 1/2 s, chaque barreau effectue 2 oscillations complètes par seconde; la fréquence de l'onde vaut dans ce cas 2 Hz. La valeur de la fréquence est l'inverse de la période:

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

- f fréquence en [Hz] = [s⁻¹]
- T période en [s]



Onde périodique: amplitude A et longueur d'onde λ .



Onde périodique. Entre la première et la troisième photo, il s'est écoulé exactement une période. La bosse en A sur la première photo avance d'une longueur d'onde λ et se retrouve en B sur la dernière photo. Le barreau rouge qui occupe la position la plus haute sur la première photo descend entre les photos 1 et 2 puis remonte entre les photos 2 et 3 pour retrouver sa position la plus haute sur la photo 3.

On peut aussi exprimer la vitesse de l'onde à partir de sa fréquence:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

- v vitesse de propagation en [m/s]
- λ longueur d'onde en [m]
- T période en [s]
- f fréquence en [Hz]

7 Interférences

On donne une impulsion simultanément au premier et au dernier barreau d'une échelle de perroquet. On crée ainsi deux ondes qui se propagent en sens inverses et sont envoyées l'une contre l'autre. A l'endroit où les deux ondes se rencontrent, elles se chevauchent; on dit qu'il y a **interférence**. Ensuite, les deux ondes se séparent et retrouvent leur forme initiale.

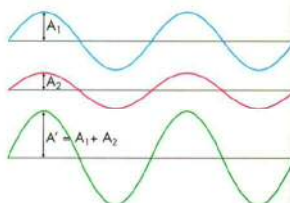
Bien qu'il soit plus difficile à visualiser, ce phénomène existe aussi pour des ondes périodiques.



Interférences de deux ondes progressives.

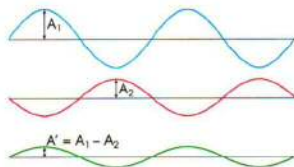
Suivant la disposition des ondes au point de rencontre, on considère plusieurs cas d'interférence. Les schémas ci-contre représentent des ondes périodiques; la troisième est chaque fois le résultat de la superposition des deux premières.

- Si une « bosse » de la première onde rencontre une « bosse » de la seconde, les deux ondes se renforcent. On dit qu'elles sont en phase et l'interférence est **constructive**. Le résultat de ce type d'interférence est une onde dont l'amplitude est la somme des amplitudes des deux ondes individuelles.



Interférence constructive: $A' = A_1 + A_2$

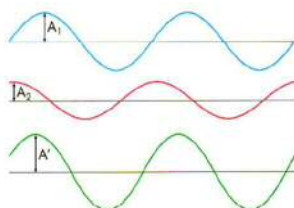
- Si une « bosse » de la première onde rencontre un « creux » de la seconde, les deux ondes s'atténuent. On dit qu'elles sont en opposition de phase et l'interférence est **destructive**. Le résultat de ce type d'interférence est une onde dont l'amplitude est la différence des amplitudes des deux ondes individuelles. Les deux ondes s'annulent si leurs amplitudes sont égales.



Interférence destructive: $A' = A_1 - A_2$

- Dans la plupart des cas, on observe une situation intermédiaire: l'interférence est partiellement constructive ou partiellement destructive.

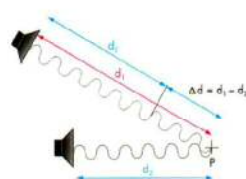
Imaginons deux haut-parleurs émettant en phase deux sons purs identiques (même amplitude, même fréquence f et même longueur d'onde λ). En certains points de l'espace entourant les haut-parleurs, l'interférence des deux ondes est constructive et on perçoit en ces points un son d'intensité maximale. En d'autres points, l'interférence est destructive et on ne perçoit plus de son.



Interférence dans un cas général: $A_1 - A_2 < A' < A_1 + A_2$

Pour atteindre un point P, l'onde émise par le premier haut-parleur parcourt la distance d_1 et l'onde émise par le deuxième haut-parleur parcourt la distance d_2 . Le type d'interférence (constructive ou destructive) en P dépend de la différence de trajet $\Delta d = d_1 - d_2$.

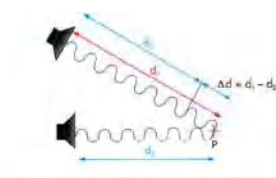
- Si cette différence de trajet Δd est un multiple entier de la longueur d'onde, les deux ondes atteignent le point P en phase et l'interférence est constructive. L'intensité sonore est maximale en ce point.



Interférence constructive en P; maximum d'intensité sonore.

Interférence constructive si
 $\Delta d = m \cdot \lambda$
 où m est un entier positif ou nul

- Si cette différence de trajet Δd est un multiple entier de la longueur d'onde augmenté d'une demi-longueur d'onde, les deux ondes atteignent le point P en opposition de phase et l'interférence est destructive. L'intensité sonore est minimale en ce point.



Interférence destructive en P; minimum d'intensité sonore.

Interférence destructive si
 $\Delta d = (m + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$
 où m est un entier positif ou nul

Les deux extrémités de la corde étant fixes, elles doivent correspondre à des nœuds. En se référant à cette condition d'existence des ondes stationnaires, on peut décrire les différents modes possibles de vibration de la corde.

- Le **mode fondamental** ou **harmonique d'ordre n = 1** est le plus simple. Il est constitué de deux nœuds (aux extrémités) et d'un ventre.



Mode fondamental.

La longueur d'onde λ_1 vaut le double de la longueur L de la corde:

$$\lambda_1 = 2 \cdot L$$

La fréquence correspondante est donnée à partir de la vitesse de propagation:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2 \cdot L}$$

En exprimant la vitesse de propagation en fonction de la tension F et de la masse linéaire μ de la corde, on obtient finalement:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

- L'**harmonique d'ordre n = 2** contient trois nœuds et deux ventres.



Deuxième harmonique.

La longueur d'onde λ_2 est égale à la longueur L de la corde:

$$\lambda_2 = L$$

La fréquence correspondante est donnée à partir de la vitesse de propagation:

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L}$$

On obtient finalement:

$$f_2 = \frac{2}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

- L'**harmonique d'ordre n = 3** contient quatre nœuds et trois ventres.



Troisième harmonique.

Par une analyse similaire, on obtient la fréquence correspondante:

$$f_3 = \frac{3}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

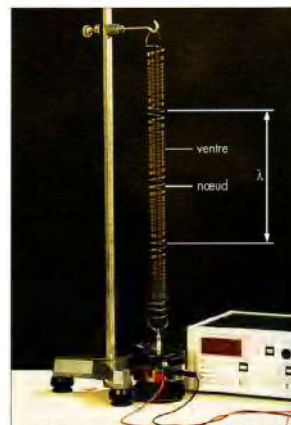
8 Les ondes stationnaires

On crée une onde périodique dans un élastique tendu en excitant en permanence une de ses extrémités à l'aide d'un vibreur, l'autre extrémité étant fixée à un support. Cette onde est réfléchiée dans l'élastique lorsqu'elle atteint son extrémité fixe. Par conséquent, une onde incidente et une onde réfléchiée coexistent en permanence et le résultat obtenu provient de l'interférence de ces deux ondes.



Ondes stationnaires dans un élastique tendu.

Dans la plupart des cas, le résultat obtenu est indescriptible. Mais, en modifiant la fréquence du vibreur, on constate que pour quelques fréquences bien choisies, certains points de l'élastique oscillent avec une très grande amplitude alors que d'autres restent immobiles; de plus, on ne voit plus les ondes se propager le long de l'élastique. On a alors obtenu une onde **stationnaire**. Les fréquences particulières pour lesquelles le phénomène se produit constituent la gamme des fréquences de **résonance**.



Ondes stationnaires dans un ressort.

Les points qui ne vibrent pas sont appelés **nœuds**; en ces points, l'interférence des ondes incidente et réfléchiée est destructive.

Les points qui vibrent avec la plus grande amplitude sont appelés **ventres**; en ces points, l'interférence des ondes incidente et réfléchiée est constructive.

La **longueur d'onde λ** de l'onde stationnaire est égale à la distance entre le premier et le troisième nœud. Deux nœuds consécutifs sont séparés d'une demi-longueur d'onde; un nœud et un ventre consécutifs sont séparés d'un quart de longueur d'onde.



Ondes stationnaires dans un élastique tendu; longueur d'onde.

9 Les cordes vibrantes

Lorsqu'on fait vibrer une corde dont les deux extrémités sont fixes, on crée toute une série d'ondes qui se propagent vers les extrémités de la corde, y sont réfléchiées puis interfèrent. En interférant les unes avec les autres, la plupart de ces ondes vont rapidement disparaître; seules persistent les ondes stationnaires dont les fréquences correspondent aux fréquences de résonance de la corde.

En comparant les trois premières fréquences obtenues, on se rend compte qu'elles sont multiples de la fréquence fondamentale. On en déduit que toute la série des fréquences possibles est donnée par:

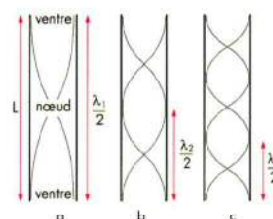
$$f_n = \frac{n}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \text{où } n \text{ est un entier positif}$$

- f_n fréquence de l'harmonique d'ordre n en [Hz]
- L longueur de la corde en [m]
- F tension de la corde en [N]
- μ masse linéaire de la corde en [kg/m]

10 Ondes stationnaires dans un tuyau

Lorsqu'on souffle dans une bouteille, on perçoit un son d'autant plus aigu que la bouteille est remplie. On crée de cette façon des ondes stationnaires directement dans la colonne d'air au-dessus du liquide de la bouteille. Il se produit un phénomène analogue dans les tuyaux d'un orgue ou dans une clarinette.

Dans un orgue, certains tuyaux sont ouverts aux deux extrémités alors que les autres ont une extrémité ouverte et une extrémité fermée. Dans tous les cas, l'extrémité fermée correspond à un nœud de vibration et l'extrémité ouverte correspond à un ventre de vibration.



Représentation schématique des ondes stationnaires de déplacement de l'air dans un tuyau ouvert aux deux extrémités.

- a) Fondamentale.
- b) Deuxième harmonique.
- c) Troisième harmonique.

Pour un tuyau de longueur L ouvert aux deux extrémités:

- Le **mode fondamental** ou **harmonique d'ordre n = 1** est le plus simple. Il est constitué d'un ventre à chaque extrémité et d'un nœud.

La longueur d'onde de la fondamentale vaut le double de L et sa fréquence donnée par:

$$f_1 = \frac{v_{son}}{\lambda_1} = \frac{v_{son}}{2 \cdot L}$$

où v_{son} représente la vitesse de propagation du son dans l'air; aux conditions normales, $v_{son} = 343$ m/s.

- L'**harmonique d'ordre n = 2** est constituée de trois ventres et deux nœuds.

La longueur d'onde correspondante est égale à la longueur **L** du tuyau et sa fréquence vaut :

$$f_2 = \frac{v_{son}}{\lambda_2} = \frac{v_{son}}{L} = \frac{2 \cdot v_{son}}{2 \cdot L}$$

- L'**harmonique d'ordre n = 3** est constituée de quatre ventres et trois nœuds.

La longueur d'onde correspondante est égale aux deux tiers de la longueur **L** du tuyau et sa fréquence vaut :

$$f_3 = \frac{v_{son}}{\lambda_3} = \frac{3 \cdot v_{son}}{2 \cdot L}$$

Ces fréquences sont multiples de la fondamentale; la série de toutes les fréquences possibles est donnée par :

$$f_n = \frac{n \cdot v_{son}}{2 \cdot L} \text{ où } n \text{ est un entier positif}$$

f_n fréquence de l'harmonique d'ordre n en [Hz]
L longueur du tuyau en [m]
 v_{son} vitesse du son dans l'air en [m/s]

Pour un tuyau de longueur **L** ouvert à une extrémité et fermé à l'autre :

- Le **mode fondamental** ou **harmonique d'ordre n = 1** est constitué d'un ventre à une extrémité et d'un nœud à l'autre.

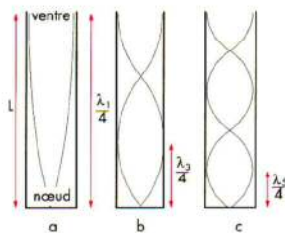
La longueur d'onde de la fondamentale vaut le quadruple de **L** et sa fréquence donnée par :

$$f_1 = \frac{v_{son}}{\lambda_1} = \frac{v_{son}}{4 \cdot L}$$

- L'**harmonique d'ordre n = 3** est constituée de deux ventres et deux nœuds.

La longueur d'onde correspondante est égale aux quatre tiers de la longueur **L** du tuyau et sa fréquence vaut :

$$f_3 = \frac{v_{son}}{\lambda_3} = \frac{3 \cdot v_{son}}{4 \cdot L}$$



Représentation schématique des ondes stationnaires dans un tuyau ouvert à une extrémité et fermé à l'autre.
 a) Fondamentale.
 b) Harmonique d'ordre n = 3.
 c) Harmonique d'ordre n = 5.

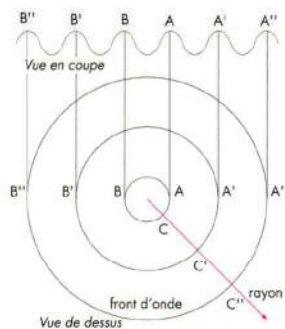
12 Fronts d'onde et rayons

L'onde créée en lâchant un caillou sur une mare calme apparaît à un observateur sous la forme de cercles concentriques qui se propagent à la surface de la mare. Chacun de ces cercles est constitué par des points qui se trouvent tous dans le même état de vibration : une crête par exemple. On dit que chacun des cercles constitue un front d'onde. En un point donné d'un front d'onde (par exemple le point C sur le schéma ci-contre), on constate que l'onde se propage le long d'un rayon du cercle, c'est-à-dire dans une direction orthogonale au front d'onde.

Les fronts d'onde peuvent avoir diverses formes. S'ils sont constitués de cercles concentriques, on dit qu'il s'agit d'une onde circulaire et s'ils sont constitués de portions de droites parallèles, on dit qu'il s'agit d'une onde rectiligne.

Une onde sonore émise par une source ponctuelle peut se propager dans tout l'espace entourant la source. Dans ce cas, les fronts d'onde sont des sphères concentriques centrées sur la source et on dit qu'il s'agit d'une onde sphérique. Si le son provient, par exemple d'un tambour, les fronts d'onde sont des portions de plans parallèles et on dit dans ce cas qu'il s'agit d'une onde plane.

De manière générale, on appelle **front d'onde** une ligne ou une surface contenant des points qui se trouvent tous dans le même état de vibration. Chaque ligne orthogonale aux fronts d'onde est appelée **rayon** et indique la direction de propagation de l'onde.



Fronts d'onde à la surface d'un plan d'eau.



Onde rectiligne dans une cuve à ondes.

On constate que cette fréquence vaut le triple de la fondamentale; c'est la raison pour laquelle on la note f_3 .

- L'**harmonique** suivante (harmonique d'ordre n = 5) est constituée de trois ventres et trois nœuds.

La longueur d'onde correspondante est égale aux quatre cinquièmes de la longueur **L** du tuyau et sa fréquence vaut :

$$f_5 = \frac{v_{son}}{\lambda_5} = \frac{5 \cdot v_{son}}{4 \cdot L}$$

Ces fréquences sont des multiples impairs de la fondamentale; la série de toutes les fréquences possibles est donnée par :

$$f_n = \frac{n \cdot v_{son}}{4 \cdot L} \text{ où } n \text{ est un entier impair positif}$$

f_n fréquence de l'harmonique d'ordre n en [Hz]
L longueur du tuyau en [m]
 v_{son} vitesse du son dans l'air en [m/s]

11 Figures de Chladni

Il est aussi possible de créer des ondes stationnaires en faisant vibrer une plaque métallique mince à l'aide d'un archet ou d'un vibreur. Les ondes créées au centre de la plaque par le vibreur sont réfléchies sur les bords de la plaque. Pour les fréquences de résonance, l'interférence des ondes incidente et réfléchie engendre une onde stationnaire. En saupoudrant la plaque de grains de sel, il est possible de mettre en évidence les lignes sur lesquelles se trouvent les nœuds de vibration (lignes nodales). Les figures obtenues sont appelées figures de Chladni. Dans ce cas, les fréquences de résonance ne se succèdent pas de manière régulière.



Figure de Chladni, fréquence de 1250 Hz.

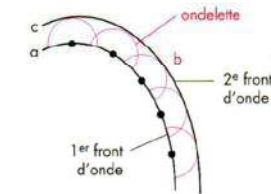


Figure de Chladni, fréquence de 3000 Hz.

13 Principe de Huygens

Selon ce principe, chaque point d'un front d'onde se comporte comme s'il émettait une ondelette circulaire (ou sphérique); le front d'onde suivant est constitué par l'enveloppe de toutes ces ondelettes.

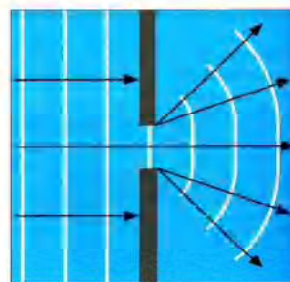
En appliquant ce principe, il est possible de reconstituer la propagation des ondes. Deux applications sont illustrées dans le cas de la réflexion et de la réfraction de la lumière dans le chapitre consacré aux ondes électromagnétiques.



Principe de Huygens.
 a) Front d'onde initial.
 b) Ondelettes émises par chaque point.
 c) L'enveloppe des ondelettes constitue le nouveau front d'onde.

14 La diffraction

La diffraction est un phénomène typiquement ondulatoire. On peut le mettre en évidence en observant, par exemple, la propagation des vagues à la surface d'un lac: les ports de plaisance, au bord du lac, sont généralement protégés par une digue en pierre dans laquelle une ouverture permet le passage des bateaux; lorsque le vent souffle du large, les vagues se brisent sur la digue mais peuvent aussi traverser l'ouverture et se propager à l'intérieur du port. On constate alors que celles-ci ne se propagent pas uniquement dans une bande délimitée par l'ouverture, mais sur une surface plus étendue. Les vagues ont ainsi la propriété de contourner l'obstacle que constitue la digue; c'est le phénomène de diffraction. Il se manifeste pour tous les types d'onde rencontrant un obstacle ou une ouverture dont la dimension est de l'ordre de la longueur d'onde. Un exemple de diffraction de la lumière est décrit dans le chapitre « ONDES ELECTROMAGNETIQUES ».



Diffraction des ondes (vagues) à l'entrée d'un port. Les lignes blanches représentent les fronts d'onde; les flèches représentent la direction et le sens de propagation.

Chapitre 55. Les ondes sonores

La son résulte de la propagation d'une perturbation, généralement dans l'air. Ce phénomène est perçu agréablement quand il s'agit de musique ou du gazouillis des oiseaux. Par contre, il est aussi à l'origine de sensations moins plaisantes, telles que le bruit.

1 Les sources et les ondes sonores

Lorsqu'un musicien gratte la corde de sa guitare, il crée une onde stationnaire. Cette vibration est amplifiée par la caisse de résonance de l'instrument, transmise à l'air dans lequel elle se propage sous la forme d'une onde longitudinale: le déplacement local des molécules de l'air s'effectue dans la direction de propagation de l'onde. Lorsqu'elle atteint l'oreille d'un auditeur, l'onde sonore provoque des vibrations du tympan qui provoquent des sensations auditives au niveau du système nerveux.

Dans l'exemple précédent, la source sonore est la corde d'une guitare; mais de façon générale, tout objet vibrant peut être une source d'onde sonore. D'autre part, une onde sonore ne se propage pas forcément dans l'air mais peut le faire dans n'importe quel milieu; les caractéristiques du son perçu dépendent toutefois du milieu de propagation.

La fréquence de l'onde sonore est toujours la même que celle de l'objet vibrant utilisé comme source.



Instruments à cordes.

2 La vitesse du son

La vitesse du son dépend du milieu dans lequel il se propage; elle dépend entre autres de sa masse volumique et de ses caractéristiques de compressibilité: plus un milieu est compressible, plus la vitesse du son est petite. Le son se propage généralement plus vite dans les liquides ou les solides que dans les gaz. Dans les gaz, la vitesse du son augmente de façon non négligeable avec la température; le son se propage à 331 m/s dans de l'air sec à 0 °C et à 343 m/s dans de l'air sec à 20 °C.

Milieu	Vitesse du son en m/s
air	340
l'air hum.	970
hydrogène	1300
eau douce	1440
eau de mer	1540
acier	5000

Vitesse approximative du son dans différents milieux.

3 Les caractéristiques du son

Les caractéristiques d'un son perçu sont sa hauteur, son timbre et son volume.

La hauteur du son (grave ou aigu) est liée à la fréquence de la vibration. Lorsqu'on fait vibrer une corde, plusieurs harmoniques sont excitées simultanément mais la fondamentale domine. C'est la fréquence de la fondamentale qui détermine la hauteur du son: plus la fréquence est élevée, plus le son est aigu. L'oreille humaine perçoit des sons dont la fréquence est comprise entre 20 Hz pour les plus graves et 20000 Hz pour les plus aigus.

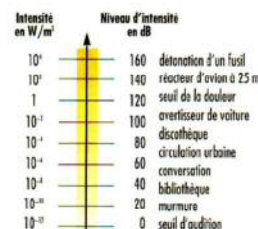
Un instrument est muni de plusieurs cordes. Sur un violon, elles ont toutes à peu près la même longueur; la corde la plus grave, qui vibre à basse fréquence, doit posséder la plus grande masse linéaire. Lorsque le violoniste appuie un point de la corde contre le manche de l'instrument, il raccourcit la partie vibrante de la corde; la fréquence est plus élevée et le son plus aigu que lorsque la corde est jouée « à vide ». Pour accorder son instrument, le musicien ajuste la tension de la corde en tournant les clés de son instrument.

Sur un piano, les cordes ont des longueurs différentes. La corde la plus grave qui vibre à basse fréquence doit posséder la plus grande masse linéaire et être la plus longue.

La même note paraît différente si elle est jouée sur un piano ou sur un violon. Cette différence est caractéristique du timbre de chaque instrument. Le timbre dépend, entre autres, du nombre d'harmoniques qui coexistent dans la corde et de leurs amplitudes relatives.

Le volume sonore (fort ou doucement) est lié à l'intensité de l'onde, c'est-à-dire la puissance qu'elle transporte par unité de surface. L'intensité d'une onde est proportionnelle au carré de son amplitude et s'exprime en watt par mètre carré (W/m²). L'oreille humaine perçoit des sons dont l'intensité est comprise entre 10⁻¹² W/m² (seuil d'audition) et 1 W/m² (seuil de la douleur).

La sensibilité de notre oreille à l'intensité sonore n'est pas linéaire: pour qu'un son nous semble deux fois plus fort qu'un autre, il faut que son intensité soit environ 10 fois plus grande. Pour quantifier la sensation de « volume sonore », on définit le niveau d'intensité sonore qui s'exprime à l'aide d'une échelle logarithmique dont l'unité est le décibel [dB].



Correspondance entre Intensité et Niveau d'intensité.

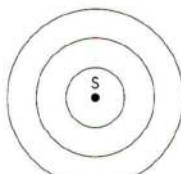
Le niveau d'intensité N d'un son d'intensité I est défini par:

$$N = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

- N niveau d'intensité sonore en [dB]
- I intensité sonore en [W/m²]
- I_0 intensité sonore de référence correspondant au seuil d'audition $I_0 = 10^{-12}$ W/m²

4 Effet Doppler

Le son émis par le sifflet d'un train n'est pas toujours perçu de la même façon pour un observateur situé au bord des voies: il paraît plus aigu que le son réellement émis par le sifflet lorsque le train se rapproche et plus grave lorsque le train s'éloigne. Cette modification de la fréquence perçue est connue sous le nom d'effet Doppler; il peut être causé par le mouvement de la source sonore, par le mouvement de l'observateur ou encore par les deux mouvements simultanés.



Source S immobile: les fronts d'onde sont des sphères concentriques.

Effet du mouvement de la source

On considère une source sonore émettant un son de fréquence constante f , donc de période $T = \frac{1}{f}$.

Si la source est immobile, les fronts d'onde successifs forment des sphères concentriques (représentées par des cercles sur le schéma) centrées sur la source et séparées par une longueur d'onde λ de l'onde émise.

Le problème se complique si la source se déplace à la vitesse (constante) v_{source} . Pour décrire cette situation, les schémas ci-contre représentent des « photographies » prises à intervalles de temps réguliers T , où T représente exactement la période de l'onde émise.

Durant ce laps de temps,

- la source avance d'une distance $d = v_{source} \cdot T$;
- l'onde émise progresse d'une longueur d'onde $\lambda = v_{son} \cdot T$, où v_{son} est la vitesse du son dans l'air.

Sur la première photographie, la source se trouve en S_1 et émet un son.

Sur la deuxième photographie, la source a avancé de la distance d et se trouve en S_2 . Le front d'onde émis en S_1 se trouve maintenant sur une sphère (cercle) centrée en S_1 et de rayon λ .

Sur la troisième photographie, la source a avancé de la distance d et se trouve en S_3 . Le front d'onde émis en S_2 se trouve maintenant sur une sphère (cercle) centrée en S_2 et de rayon $2 \cdot \lambda$ alors que le front d'onde émis en S_3 se trouve sur une sphère (cercle) centrée en S_3 et de rayon λ .

Sur la quatrième photographie, la source se trouve en S_4 . Le front d'onde émis en S_1 se trouve maintenant sur une sphère (cercle) de rayon $3 \cdot \lambda$, le front d'onde émis en S_2 se trouve sur une sphère (cercle) de rayon $2 \cdot \lambda$ et le front d'onde émis en S_3 se trouve sur une sphère (cercle) de rayon λ .

Le mouvement de la source a pour effet de « décaler » les fronts d'onde en les « tassant » dans le sens du mouvement. Ces fronts d'onde ne sont plus concentriques et la longueur d'onde λ' reçue par un observateur O' situé en avant de la source est plus petite que la longueur d'onde λ reçue par un observateur O'' situé en arrière de la source. Il est possible de déterminer ces longueurs d'onde et d'en déduire les fréquences f' et f'' (et par conséquent les hauteurs des sons) perçues par chacun des observateurs.

On peut déjà remarquer, puisque $\lambda' < \lambda$, que la période T' entre la réception de deux crêtes par O' sera plus petite que la période T ; à l'inverse, la fréquence f' sera plus grande que la fréquence f .

Sur le schéma, on constate que:

$$2 \cdot \lambda = d + \lambda + \lambda'$$

$$\lambda' = \lambda - d$$

Or:

$$\lambda' = v_{son} \cdot T' = \frac{v_{son}}{f'}$$

$$\lambda = v_{son} \cdot T = \frac{v_{son}}{f}$$

$$d = v_{source} \cdot T = \frac{v_{source}}{f}$$

Par substitution, on obtient:

$$\frac{v_{son}}{f'} = \frac{v_{son}}{f} - \frac{v_{source}}{f}$$



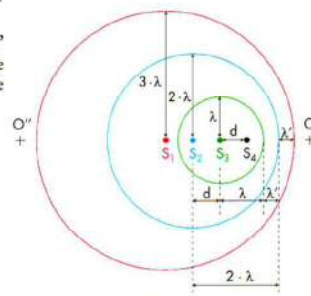
Photographie 1



Photographie 2



Photographie 3



Photographie 4

et finalement:

$$f' = \frac{v_{son}}{v_{son} - v_{source}} \cdot f ; f' > f$$

- f' fréquence reçue par l'observateur O' en [Hz]
- f fréquence émise par le sifflet en [Hz]
- v_{son} vitesse du son dans l'air en [m/s]
- v_{source} vitesse de la source en [m/s]

Par une analyse similaire, la fréquence f'' reçue par l'observateur O'' est donnée par:

$$f'' = \frac{v_{son}}{v_{son} + v_{source}} \cdot f ; f'' < f$$

Effet du mouvement de l'observateur

On considère une source sonore S immobile émettant un son de fréquence constante f ; un observateur immobile la reçoit avec la même fréquence f . Quelle sera la valeur de la fréquence f' perçue par un observateur O' qui se rapproche de la source à la vitesse (constante) v_{obs} ?

La source émet des fronts d'onde qui sont des sphères (cercles) concentriques séparés d'une longueur d'onde λ . Comme l'observateur va à l'encontre de ces fronts d'onde, on se rend compte qu'il va les recevoir à une fréquence f' plus grande que la fréquence f émise par la source. Cette modification de la fréquence provient du fait que pour l'observateur en mouvement, tout se passe comme si l'onde se propageait à la vitesse:

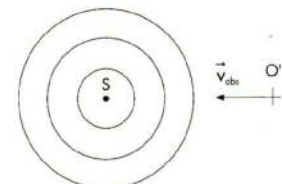
$$v'_{son} = v_{son} + v_{obs}$$

Pour un observateur immobile, la longueur d'onde λ s'exprime par:

$$\lambda = \frac{v_{son}}{f}$$

Pour un observateur qui se rapproche de la source, la même longueur d'onde λ s'exprime par:

$$\lambda = \frac{v_{son} + v_{obs}}{f}$$



L'observateur O' s'approche de la source.

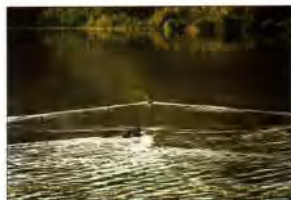
5 Onde de choc

Les canards ou les bateaux laissent derrière eux un sillage formant un angle plus ou moins ouvert. Dans ce cas, la vitesse de la source (le canard ou le bateau) est plus grande que la vitesse de propagation des ondes à la surface de l'eau.

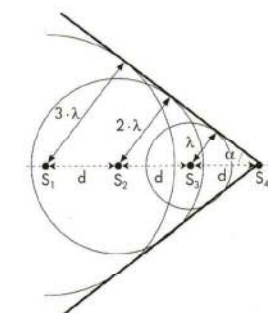
En construisant un schéma analogue aux précédents, en prenant garde à ce que la distance d parcourue par la source entre deux « photographies » soit plus grande que la longueur d'onde λ , on constate que les fronts d'onde successifs ne sont plus « les uns dans les autres ». Leur enveloppe commune forme les côtés d'un angle sur lesquels l'énergie transportée par l'onde s'accumule. Cet angle correspond au sillage du bateau et on peut facilement déterminer sa valeur α par:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d} = \frac{v_{onde} \cdot T}{v_{source} \cdot T} = \frac{v_{onde}}{v_{source}}$$

On désigne souvent cette situation par l'expression « onde de choc ». Ce phénomène se produit aussi lors du « bang » des avions supersoniques volant à une vitesse supérieure à celle du son.



Sillage d'un canard.



Onde de choc.

6 Absorption et isolant phonique

Lors de la construction d'édifices, deux problèmes majeurs sont à prendre en considération:

- l'isolement acoustique entre un local et son voisinage (local voisin ou extérieur);
- la diffusion uniforme du son en tous les points du local (tout particulièrement lors de la construction d'auditoriums, de salles de théâtre, de cinéma, de conférence),



En égalant ces deux quantités, on obtient la fréquence f' perçue par l'observateur en mouvement:

$$f' = \frac{v_{son} + v_{obs}}{v_{son}} \cdot f ; f' > f$$

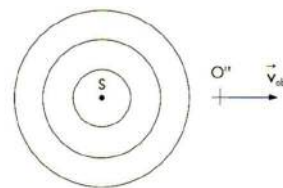
- f' fréquence reçue par l'observateur O' en [Hz]
- f fréquence émise par la source en [Hz]
- v_{son} vitesse du son dans l'air en [m/s]
- v_{obs} vitesse de l'observateur en [m/s]

Si l'observateur s'éloigne de la source à la vitesse v_{obs} , tout se passe pour lui comme si le son se propageait à la vitesse

$$v'_{son} = v_{son} - v_{obs}$$

La fréquence f'' qu'il perçoit est alors donnée par:

$$f'' = \frac{v_{son} - v_{obs}}{v_{son}} \cdot f ; f'' < f$$



L'observateur O'' s'éloigne de la source.

L'effet Doppler n'existe pas uniquement pour les ondes sonores mais aussi pour les ondes électromagnétiques: c'est un procédé basé sur cet effet qui permet aux gendarmes de mesurer la vitesse des voitures avec leurs « radars ». Pour ce qui est des ondes lumineuses, l'effet Doppler a la conséquence suivante: une source lumineuse qui s'éloigne d'un observateur paraît plus rouge qu'elle ne l'est réellement. L'observation d'objets lointains du ciel a mis en évidence ce décalage vers le rouge montrant que ces objets s'éloignent et apportant ainsi un indice en faveur de la théorie de l'expansion de l'univers.

L'isolement acoustique

D'une manière générale, pour qu'un local soit bien isolé du point de vue de l'acoustique, il est souhaitable d'interposer sur le chemin des vibrations des matériaux qui les absorbent fortement, c'est-à-dire qui les transforment en chaleur.

Pour isoler un local de celui situé au-dessous, on peut insérer une couche de feutre ou de polystyrène expansé entre la dalle qui constitue le plancher du local supérieur et le plafond en béton du local inférieur. Ce type de construction se nomme dalle flottante.

En ce qui concerne les parois, elles devraient être construites en briques perforées dans les fentes desquelles on aurait placé un matériau fortement absorbant pour éviter la propagation des vibrations. Une autre technique peut consister à suspendre des tentures ou des tapisseries non directement posées contre le mur.

On peut également recouvrir les murs de matériaux poreux ou fibreux de quelques millimètres d'épaisseur. Dans certains cas, les parois sont doublées de cuir, de laine ou de coton, comme on le voit sur les portes des salles de cinéma ou dans certaines cabines téléphoniques. Les progrès de la chimie ont permis la production de résines particulières dotées d'un fort pouvoir d'absorption du son.



Chambre anéchoïque.

La diffusion du son

Les propriétés acoustiques d'un local sont déterminées par les réflexions des ondes sonores sur les murs, les planchers, le plafond, les meubles et les personnes présentes dans le local. Le paramètre dont dépend la sonorité d'un local est le temps de réverbération τ défini comme l'intervalle de temps nécessaire pour qu'un son de fréquence donnée voit son intensité réduite de 60 dB après diverses réflexions. Plus τ est petit, plus le son est perçu avec difficulté et on parle de local sourd ou anéchoïque; si l'absorption est faible, τ est très grand et le local devient bruyant en raison de la réverbération. Une formule empirique permet d'évaluer la valeur de τ en fonction des paramètres du local:

$$\tau = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \alpha}$$

- où:
 - τ temps de réverbération en [s]
 - V volume du local en [m³]
 - S surface totale exposée au son en [m²]
 - α coefficient d'absorption du son par les matériaux en [m⁻¹]
- Le tableau ci-contre donne quelques valeurs du coefficient d'absorption pour diverses fréquences.

coefficient d'absorption α en [m ⁻¹] aux fréquences de			
Matériau	128 Hz	512 Hz	2048 Hz
Lisibium sur béton	0,62	0,03	0,04
Moquette de 8 mm sur feutre de 3 mm	0,11	0,37	0,77
Température de valeurs	0,05	0,35	0,38
Dalles de bois de 20 mm	0,08	0,08	0,21
Mur de brique de 45 cm	0,02	0,03	0,05
Verre	0,03	0,03	0,03
Marbre	0,01	0,01	0,01
Sable sec sur 10 cm	0,15	0,40	0,55
Bois de pin	0,10	0,10	0,38
Laine de verre sur 25 mm	0,25	0,70	0,80
Eau	0,01	0,01	0,92

Durant un concert, les fréquences sont multiples; habituellement, on considère une fréquence moyenne autour de 2000 Hz. Pour obtenir une bonne audition, il est souhaitable que τ soit compris entre 1 et 3 secondes. En général, le temps de réverbération d'un local est naturellement trop grand, ce qui produit de désagréables queues sonores, qu'on peut diminuer en équipant le local de divers matériaux absorbants.

7 Dangers et protection

«Le bruit rend malade», tiraient les journaux à la fin des années 60. La protection contre les nuisances sonores est dès lors devenue un sujet d'actualité. En 1963, une première ordonnance fédérale fixa des valeurs limites. Le dépassement de ces limites était considéré comme un indice d'une exposition insupportable au bruit.

L'oreille

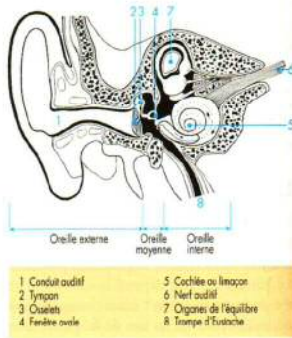
L'oreille humaine est le juge de la qualité ou de l'intensité d'une musique ou d'un bruit. Elle est constituée de trois parties principales qui sont l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne. Les vibrations dans l'air sont perçues par le tympan et transmises au liquide de l'oreille interne par l'intermédiaire des os de l'oreille moyenne.

Si notre oreille est exposée à des sons de plus de 80 dB, les muscles de l'oreille moyenne se contractent automatiquement. Ce mécanisme assure une protection acoustique d'environ 20 dB.

Les dangers

Les bruits de forte intensité ou simplement inconfortables agissent de façon néfaste sur notre bien-être. Ils peuvent nous irriter, accroître les difficultés de communication et exercer un stress sur le corps et sur l'esprit. Notre santé est dès lors mise en péril.

Au quotidien, on ne rencontre que rarement des bruits assez violents pour rompre le tympan (plus de 120 dB). Les risques sont plutôt à chercher du côté de la durée et de la fréquence d'exposition. Des réactions négatives se manifestent déjà à partir de 50 dB et un niveau de 60 à 65 dB devient fortement dérangeant. Même l'écoute de la radio et de la télévision s'en trouve perturbée. L'importance de la



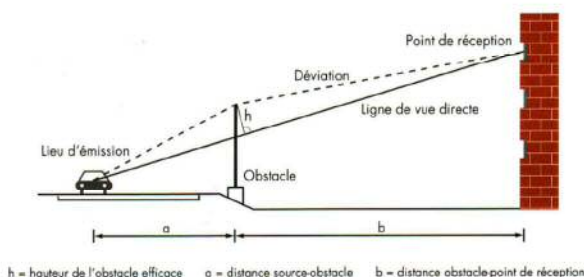
de moitié. Lorsqu'une voiture roule à des vitesses supérieures à 50 km/h, le bruit de roulement couvre celui du moteur. Pour les camions, ce seuil se situe entre 70 km/h et 80 km/h. Signalons que le bruit d'un camion est équivalent à celui de 10 voitures.

L'aménagement du territoire, la planification des réseaux routiers et ferroviaires, les limitations de vitesse ainsi que la manière de conduire (rouler feutré) sont également des solutions qui permettent la réduction du bruit.

Pour empêcher la propagation du bruit, il faut prévoir des obstacles sur son chemin, comme des murs antibruit, des talus ou de la végétation. Pour être efficace, l'obstacle doit non seulement être élevé mais également aussi près que possible de la source du bruit. Si la ligne visuelle entre la source et le point de réception est juste interrompue, le gain sonore est d'environ 5 dB. En augmentant la hauteur, on peut atteindre une atténuation du bruit allant jusqu'à 20 dB.

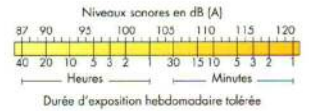
Naturellement, la meilleure protection contre le bruit consisterait à enterrer les routes et les rails!

Du point de vue personnel, pour diminuer les nuisances dues au bruit, la seule solution consiste à se boucher les oreilles, soit à l'aide d'un casque antibruit, d'un casque à atténuation active du bruit (production électronique d'ondes à interférences destructives), soit à l'aide de bouchons à modeler placés dans le conduit auditif. Sur les lieux de travail, une protection individuelle est obligatoire lorsque le niveau de bruit en continu est supérieur à 90 dB.



nuisance est ressentie souvent de façon subjective et dépend aussi bien de la nature du bruit que de l'état momentané de la personne concernée. Les troubles du sommeil, les réactions nerveuses ou cardio-vasculaires sont les symptômes les plus fréquents des agressions sonores.

La durée d'exposition au bruit joue un rôle aussi important que le niveau sonore. Au-delà des limites de tolérance présentée sur le graphique ci-contre, l'ouïe peut être mise en danger.



Mise en danger de l'ouïe lors de l'écoute de musique.

A titre d'exemple, deux enquêtes réalisées en 1982 et 1992 montrent une augmentation du nombre des troubles auditifs chez des jeunes de 16 ans. En 1982, 10% étaient touchés, contre 22% en 1992. Une autre étude réalisée en Norvège montre qu'entre 1981 et 1987, le taux de personnes de 20 ans présentant des déficits auditifs importants (plus de 20 dB) était passé de 18% à 35%. Les risques pour les amateurs de discothèques et de concerts rock augmentent respectivement de 30% et 40%. Une autre étude s'est intéressée aux personnes exposées au niveau sonore produit par les baladeurs, les discothèques et les concerts. Il s'avère que 64% des jeunes interrogés indiquent avoir souffert de sifflements durables dans les oreilles après écoute de la musique à un volume sonore trop intense (plus de 100 dB); 33% présentent un déficit auditif de plus de 15 dB.



La protection contre le bruit

Pour lutter contre le bruit, il existe plusieurs moyens, notamment:

- limiter le bruit par des mesures prises à la source;
- empêcher la propagation du bruit;
- intervenir auprès des personnes touchées par le bruit.

Il n'est pas facile de réduire le bruit. En effet, pour diviser le bruit par 2, il est nécessaire de diminuer la source sonore d'un facteur 10. A titre d'exemple, considérons 10 voitures passant dans la rue; chacune d'elle produit un bruit de 60 dB; ensemble, elles produisent 70 dB.

Les moyens de transport sont parmi les principaux responsables du bruit. Des efforts ont été faits concernant le bruit des moteurs: en 20 ans, les moteurs de voiture émettent 15 dB de moins et ceux des avions 20 dB de moins (soit quatre fois moins de bruit). Pour réduire le bruit dû aux pneumatiques, on peut recouvrir les routes d'un revêtement phonoabsorbant, comme l'asphalte drainant, l'asphalte gravillonné ou le mastic bitumeux. La réduction du bruit est de 3 dB à 5 dB sur les autoroutes, ce qui est comparable à diminuer le trafic

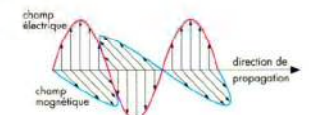


Chapitre 56. Les ondes électromagnétiques

Un arc-en-ciel, un feu de bois qui réchauffe, le bronzage sur la plage, le poste de radio branché sur la bande FM, le plat que l'on réchauffe au four à micro-ondes, les radiographies chez le médecin, l'énergie indispensable à la vie sur Terre qui nous parvient du Soleil, ... Ces situations diverses de notre vie quotidienne relèvent toutes de l'étude d'une même réalité physique: les ondes électromagnétiques.

1 Définition

Les ondes électromagnétiques ne sont pas des oscillations locales de particules de matière mais des oscillations d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires entre eux. La direction de propagation des ondes est perpendiculaire à ces champs et une onde électromagnétique peut se propager dans le vide. Elles sont créées par des charges électriques en mouvement accéléré comme par exemple les électrons d'un courant électrique oscillant dans une antenne. Comme pour tous les types d'ondes, une onde électromagnétique est caractérisée par une longueur d'onde et une fréquence.



Représentation d'une onde électromagnétique.

2 Spectre électromagnétique

Le spectre des ondes électromagnétiques, c'est-à-dire l'ensemble de toutes leurs longueurs d'onde, recouvre un vaste domaine de valeurs comprises entre 10^{-16} m pour les plus courtes jusqu'à quelques kilomètres pour les plus longues. La liste suivante parcourt le spectre électromagnétique dans l'ordre croissant des longueurs d'onde.

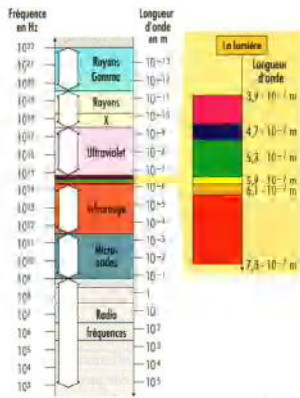
- Les rayons **gamma** ont les plus courtes longueurs d'onde contenues entre 10^{-11} m et 10^{-16} m. Ils sont produits lors des désintégrations de noyaux radioactifs.

Couleur	Longueur d'onde [· 10 ⁻⁷ m]
violet	3,80 à 4,55
bleu	4,55 à 4,92
vert	4,92 à 5,77
jaune	5,77 à 5,97
orange	5,97 à 6,22
rouge	6,22 à 7,80

Le spectre de la lumière.

- Les **rayons X** s'étendent entre des longueurs d'onde de $6 \cdot 10^{-12}$ m à 10^{-8} m. Ils sont utilisés en médecine pour le diagnostic de fractures par exemple ou pour le traitement de certains cancers.
- Le **Soleil** est une source importante de rayonnement **ultraviolet** dont les longueurs d'onde sont comprises entre 10^{-8} m et $3,8 \cdot 10^{-7}$ m. Ce rayonnement est responsable du bronzage mais peut à trop forte dose provoquer de graves maladies de la peau; il est filtré par la couche d'ozone de la haute atmosphère.
- Notre œil n'est sensible qu'à une bande très étroite du spectre électromagnétique qui constitue la **lumière**. Les longueurs d'onde de la lumière sont comprises entre $3,8 \cdot 10^{-7}$ m et $7,8 \cdot 10^{-7}$ m. A ces différentes longueurs d'onde correspondent les différentes sensations de couleurs.
- L'**infrarouge** contient les longueurs d'onde comprises entre $7,8 \cdot 10^{-7}$ m et 1 mm. Tous les corps chauds émettent de l'infrarouge.
- Les longueurs d'onde des **micro-ondes** sont comprises entre 1 mm et 0,3 m. Elles sont utilisées pour les télécommunications ou pour les radars.
- Les ondes **radio** ont des longueurs d'onde comprises entre 0,3 m et quelques kilomètres et sont utilisées pour les transmissions d'émissions de radio ou de télévision.

Plus la longueur d'onde est grande, plus l'énergie transportée par le rayonnement est faible; les rayons gamma sont ainsi les plus énergétiques du spectre.



Le spectre électromagnétique.

3 Vitesse

La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide est abrégée par la lettre **c** et vaut:

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Les ondes électromagnétiques se propagent aussi dans certains milieux matériels mais à une vitesse plus petite. L'indice de réfraction **n** du milieu considéré est le rapport entre la vitesse **c** de propagation dans le vide et la vitesse **v** de propagation dans le milieu:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{ou} \quad v = \frac{c}{n}$$



Dispersion de la lumière par un prisme.

Les rayons réfléchis étant perpendiculaires à ce front d'onde, il est possible de les représenter comme sur le troisième schéma. On peut vérifier que cette construction satisfait la propriété de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion ($\alpha_1 = \alpha_2$).

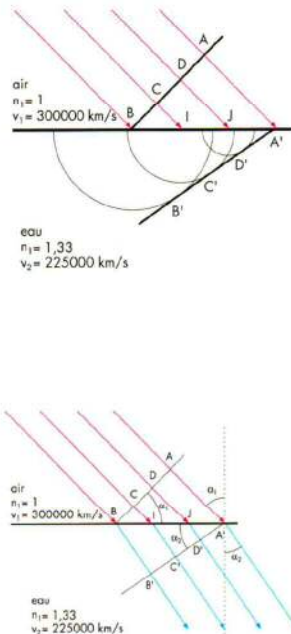
5 La réfraction de la lumière

La réfraction de la lumière est le brusque changement de direction qu'elle subit lorsqu'elle passe d'un milieu transparent dans un autre. Ce phénomène est dû au fait que la vitesse de la lumière n'est pas la même dans les deux milieux.

Sur le schéma, on considère un faisceau parallèle arrivant à la surface de séparation entre de l'air et de l'eau. Juste avant de pénétrer dans l'eau, le front d'onde se trouve en **ABCD**. On veut reconstituer la position du front d'onde après une certaine durée Δt , lorsqu'il se trouvera entièrement dans l'eau. Selon le principe de Huygens, les points **A, B, C** ou **D** émettent des ondelettes dont l'enveloppe constitue le premier front d'onde dans l'eau.

- L'ondelette (non représentée sur le schéma) issue de **A** se propage entièrement dans l'air pour se retrouver en **A'** après la durée Δt .
- L'ondelette issue de **B** se propage entièrement dans l'eau; la vitesse de propagation dans l'eau valant les trois quarts de celle dans l'air, elle se trouve, après la durée Δt , sur un cercle de rayon $BB' = 3/4 AA'$.
- L'ondelette issue de **C** se propage d'abord dans l'air jusqu'en **I** puis dans l'eau. Comme la distance **CI** vaut les deux tiers de **AA'**, le point **I** est atteint après la durée $\Delta t/3$ et émet à son tour une ondelette qui se propage dans l'eau pendant la durée $2\Delta t/3$; elle se trouve finalement sur un cercle de rayon $IC' = 2/3 BB'$.
- L'ondelette issue de **D** se propage d'abord dans l'air jusqu'en **J** puis dans l'eau. Comme la distance **DJ** vaut les deux tiers de **AA'**, le point **J** est atteint après la durée $2\Delta t/3$ et émet à son tour une ondelette qui se propage dans l'eau pendant la durée $\Delta t/3$; elle se trouve finalement sur un cercle de rayon $JD' = 1/3 BB'$.

Le front d'onde réfracté constitué par l'enveloppe de ces ondelettes se trouve sur la droite **A'B'C'D'**; sa direction est différente de celle du front d'onde incident. En conséquence, la direction du faisceau réfracté est différente de



La vitesse de propagation dépend aussi de la longueur d'onde de l'onde traversant le milieu; il en est par conséquent de même pour l'indice de réfraction. Cette propriété, appelée dispersion, est à l'origine des couleurs apparaissant à la sortie d'un prisme sur lequel on envoie un faisceau de lumière blanche: à chaque couleur correspond un indice de réfraction et, par conséquent, une direction de déviation propre.

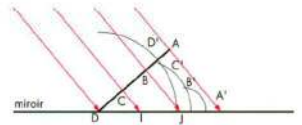
4 La réflexion de la lumière

Lorsque la lumière rencontre un miroir ou la surface de séparation de deux milieux transparents, elle subit une réflexion; selon la loi de la réflexion, l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. Cette propriété peut être établie à partir du principe de Huygens.

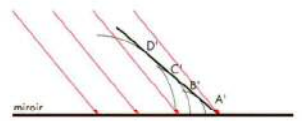
Sur le premier schéma, on considère un faisceau parallèle incident sur un miroir. Juste avant la réflexion, le front d'onde se trouve en **ABCD**. On veut reconstituer la position du front d'onde réfléchi à l'instant où l'onde actuellement en **A** atteint à son tour le miroir en **A'**. Selon le principe de Huygens, les points **A, B, C** ou **D** émettent des ondelettes dont l'enveloppe constitue le front d'onde cherché.

- L'ondelette (non représentée sur le schéma) issue de **A** se propage jusqu'en **A'** où elle atteint le miroir après la durée Δt .
- L'ondelette issue de **B** se propage d'abord jusqu'en **J** où elle atteint le miroir; comme la distance **BJ** vaut les deux tiers de **AA'**, le point **J** est atteint après la durée $2\Delta t/3$. Ce point **J** émet à son tour une ondelette qui, après s'être propagée pendant la durée $\Delta t/3$, se retrouve finalement sur un cercle de rayon $JB' = 1/3 AA'$.
- L'ondelette issue de **C** se propage d'abord jusqu'en **I** où elle atteint le miroir; comme la distance **CI** vaut le tiers de **AA'**, le point **I** est atteint après la durée $\Delta t/3$. Ce point **I** émet à son tour une ondelette qui, après s'être propagée pendant la durée $2\Delta t/3$, se retrouve finalement sur un cercle de rayon $IC' = 2/3 AA'$.
- Après la durée Δt , l'ondelette issue de **D** se retrouve finalement sur un cercle de rayon $DD' = AA'$.

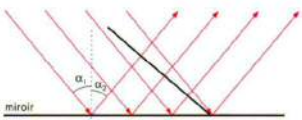
Le front d'onde réfléchi est l'enveloppe de ces ondelettes; il est représenté sur le deuxième schéma.



Réflexion de la lumière: construction des ondelettes.



Réflexion de la lumière: construction du front réfléchi.



Réflexion de la lumière: construction du faisceau réfléchi.

celle du faisceau incident. Ces directions de propagation sont données par les angles d'incidence α_1 et de réflexion α_2 .

On voit sur le second schéma que:

$$\sin \alpha_1 = \frac{AA'}{BA'} = \frac{v_1 \cdot \Delta t}{BA'} \quad \text{et} \quad \sin \alpha_2 = \frac{BB'}{BA'} = \frac{v_2 \cdot \Delta t}{BA'}$$

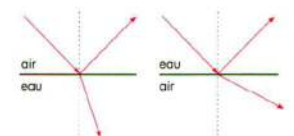
Par conséquent: $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$

Par définition des indices de réfraction, on obtient finalement la loi de la réfraction:

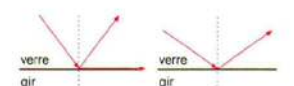
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ou} \quad n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$$

Dans l'exemple décrit ci-dessus, la lumière passe d'un milieu de petit indice de réfraction dans un milieu de plus grand indice de réfraction. On constate dans ce cas que le faisceau réfracté se rapproche de la normale à la surface de séparation.

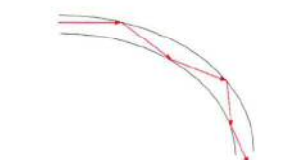
Lors du passage inverse, le faisceau réfracté s'écarte de la normale. Il existe alors un angle d'incidence limite pour lequel l'angle de réfraction correspondant vaut 90° : le faisceau réfracté rase la surface de séparation des deux milieux. Si l'angle d'incidence est plus grand que l'angle limite, le faisceau réfracté n'existe pas; seul subsiste le faisceau réfléchi et on dit qu'il y a **réflexion totale**.



Le rayon réfracté se rapproche de la normale, s'écarte de la normale.

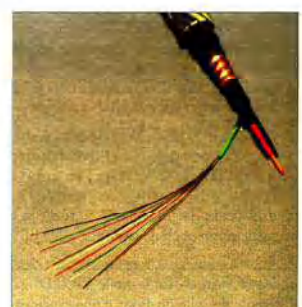


Réfraction limite. Réflexion totale.



Réflexions totales dans une fibre optique.

Cette propriété de réflexion totale est utilisée dans les fibres optiques, qui servent à conduire la lumière ou des signaux de télécommunications avec des pertes minimales. Dans ces fibres très minces de verre ou de plastique, la lumière est totalement réfléchie contre les parois internes de la fibre, même si la fibre forme un coude.



Fibre optique.

6 Un exemple de diffraction de la lumière

Le phénomène de diffraction de la lumière se manifeste lorsqu'on éclaire un objet de très petite dimension, comme un cheveu ou un fil de petit diamètre.

On peut aussi le mettre en évidence en éclairant, avec la lumière d'un laser, deux fentes verticales très fines et très proches ménagées dans un écran opaque: on observe sur un écran placé derrière les fentes, une image de diffraction dont l'aspect est un «traillé» horizontal où se succèdent des zones sombres et des zones brillantes.

Tout se passe comme si les points S_1 et S_2 sur le schéma, étaient des sources ponctuelles émettant en phase des ondes lumineuses de la même longueur d'onde que celle de la lumière du laser; c'est le phénomène de diffraction.

L'interférence de ces ondes produit l'image observée sur l'écran.

- Pour les points brillants de l'écran, comme le point P du schéma, l'interférence est constructive; dans ce cas, la différence de marche $d_1 - d_2$ coïncide avec un multiple de la longueur d'onde λ de la lumière du laser:

$$d_1 - d_2 = m \cdot \lambda$$

où m est un entier positif ou nul

- Pour les points sombres de l'écran, comme le point P' du schéma, l'interférence est destructive; la différence de marche $d'_2 - d'_1$ est donnée par:

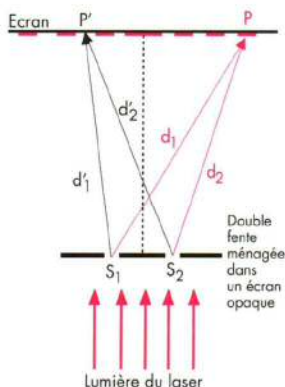
$$d'_2 - d'_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$$

où m est un entier positif ou nul

Dans l'explication ci-dessus, chaque fente est considérée comme une source ponctuelle. Or, dans la réalité, même une fente très fine ne satisfait pas cette hypothèse simplificatrice. Chaque fente correspond à une multitude de sources ponctuelles dont l'effet est de moduler l'intensité des franges visibles sur l'écran.



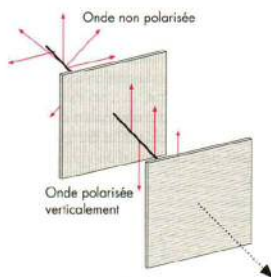
Image de diffraction obtenue en éclairant un cheveu.



Formation de franges obtenues en éclairant une double fente. La figure est vue de dessus et n'est pas à l'échelle (dans la réalité, l'écran sur lequel on observe les franges est beaucoup plus éloigné).

- Si les deux verres ont des directions de polarisation perpendiculaires, l'onde transmise par le premier verre sera polarisée dans une direction mais ne pourra pas traverser le second verre; l'ensemble est *opaque*.

- Dans les cas intermédiaires, seule une partie de la lumière ayant traversé le premier filtre pourra traverser le second.



Onde arrêtée par deux filtres polarisants de directions perpendiculaires.

8 Les lasers

Les lasers (le mot laser est formé des initiales des mots anglais *light amplification by stimulated emission of radiation*, signifiant: amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement) sont des sources de rayonnement, mettant en œuvre une technique d'émission stimulée de lumière, par opposition à celle des sources usuelles de lumière, qui est spontanée. L'intérêt des lasers tient à leur grande cohérence due à leurs éléments qui engendrent des vibrations synchrones.

Les faisceaux laser peuvent transmettre à grande distance leur énergie qui se disperse peu. Cette énergie peut au besoin être localisée en un très petit volume et y apporter, pendant un temps très court, une puissance très supérieure à celle qui est obtenue par d'autres moyens.

On s'est appliqué à diversifier les fréquences émises par les lasers et à augmenter les énergies disponibles et leur concentration dans l'espace et dans le temps.



Lidar, faisceaux laser pour l'étude de phénomènes atmosphériques.

7 Polarisation

Il est naturel de penser que deux verres transparentes superposés forment un ensemble qui reste transparent.

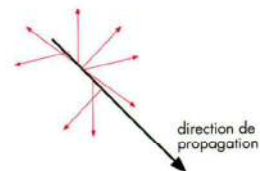
En répétant l'expérience avec des verres de lunettes polaroid que l'on fait pivoter l'un sur l'autre, il est surprenant de constater que pour une certaine orientation relative des verres, l'ensemble est parfaitement opaque. L'explication réside dans une propriété des ondes que l'on appelle **polarisation**.

Dans une onde électromagnétique, le champ électrique peut être orienté dans n'importe quelle direction perpendiculaire à la direction de propagation. On dit dans ce cas que l'onde n'est pas polarisée.

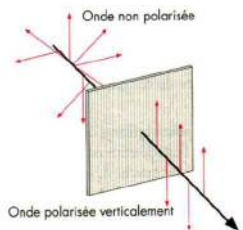
Après le passage d'une onde non polarisée à travers un verre polaroid, seules subsistent les composantes du champ électrique dans une direction donnée. Un verre polaroid agit comme un filtre qui ne laisse passer que les composantes du champ électrique orientées dans cette direction privilégiée. On dit alors que l'onde est polarisée dans cette direction.

Si l'on place deux verres polaroid successifs sur le trajet de l'onde, deux situations limites se présentent.

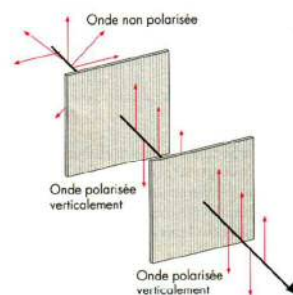
- Si les deux verres ont la même direction de polarisation, l'onde transmise par le premier verre sera polarisée mais ne sera pas modifiée par le deuxième verre qu'elle pourra traverser; l'ensemble est *transparent*.



Onde non polarisée. Les vecteurs représentent le champ électrique.



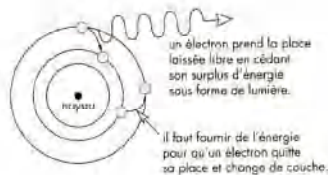
Onde polarisée transmise par un filtre polarisant. Les vecteurs représentent le champ électrique.



Onde transmise par deux filtres polarisants de même direction.

Principe de l'émission de lumière

Les phénomènes lumineux sont liés à des changements de couche des électrons. Lorsqu'un atome reçoit de l'énergie (lumineuse, thermique, ...), ses électrons absorbent cette énergie et changent de couche; lors de leur retour spontané vers une couche de plus faible énergie, le surplus d'énergie est évacué par l'émission d'un «grain de lumière» appelé photon.



L'émission d'un photon peut résulter de deux processus différents: l'émission spontanée et l'émission induite.

Dans le premier cas, le photon est émis dans une direction quelconque. L'instant d'émission est aléatoire. Dans le second processus, l'émission induite n'a lieu que si l'atome est soumis à un champ électromagnétique de même fréquence que celle correspondant à la transition des électrons. La présence d'un tel champ provoque la désexcitation de l'atome et donc l'émission d'un photon qui présente une propriété très remarquable: non seulement il a la même fréquence que celle du champ inducteur, mais surtout il est mis en phase avec celui-ci, et dans la même direction. Après l'émission induite, rien ne permet de discerner le photon induit du photon inducteur, et ce phénomène est donc une véritable amplification du rayonnement inducteur.

Les principaux types de lasers

Les recherches qui se poursuivent activement font apparaître fréquemment des modèles nouveaux, de performances améliorées.

Les **lasers à cristaux** sont construits à partir d'un cristal de rubis rose dont la longueur d'onde émise est de 694,3 nm (rouge extrême) ou à partir du grenat d'yttrium et d'aluminium ($Y_3Al_5O_{12}$), contenant en faible quantité du néodyme; l'émission du néodyme a lieu dans le proche infrarouge à 1,06 μ m.

Bien que les milieux cristallins soient généralement les plus favorables à la réalisation de matériaux amplificateurs, ils présentent l'inconvénient d'être difficiles à fabriquer en grandes dimensions. Cela a conduit à rechercher des **lasers à solides non cristallins**. L'un des plus utilisés est le verre contenant une faible quantité de néodyme. C'est avec de tels lasers que l'on obtient les puissances les plus fortes que l'homme sache engendrer.

Les **lasers à gaz** présentent un certain nombre de caractéristiques qui leur donnent un intérêt particulier. Grâce à la nature même de l'état gazeux, l'amplification peut être obtenue par toute une variété de procédés d'excitation, qui sont employés seuls ou conjointement: décharges électriques, détente, pompage optique, réactions chimiques, etc.

L'énergie nécessaire au fonctionnement des **lasers chimiques** est fournie par une réaction chimique effectuée au sein du mélange gazeux dans le tube laser. Les produits de réaction sont excités sur des niveaux de vibration et peuvent donner lieu à l'effet laser, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transfert d'une autre molécule, comme celle de CO_2 .

Pour différentes raisons, les **lasers à liquides** ne se sont pas révélés être de très bons amplificateurs laser, à l'exception notable de certains qui sont tous des colorants organiques. Ils présentent le gros intérêt d'être accordables, c'est-à-dire que l'on peut, contrairement à la plupart des autres lasers, en régler la longueur d'onde d'émission dans une plage étendue. Citons d'autres types de lasers qui sont accordables: les **lasers à centres colorés**, les **lasers paramétriques**, les **diodes lasers à semi-conducteurs** et les **lasers Raman**.