

L2 PRÉSERVATION DES BIENS CULTURELS

PHYSIQUE

Notes de cours

Florence ELIAS, Julien HIRSZOWSKI

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Notions de mécanique | 5 |
| 1.1 | Forces | 5 |
| 1.2 | Travail d'une force | 13 |
| 1.3 | Energie | 16 |
| 2 | Température et chaleur | 21 |
| 2.1 | Température | 21 |
| 2.2 | Variation de température et chaleur échangée ; chaleur massique | 22 |
| 2.3 | Changement d'état et chaleur ; chaleur latente | 24 |
| 3 | Changement d'état | 27 |
| 3.1 | Vaporisation | 28 |
| 3.2 | Liquéfaction | 33 |
| 4 | Liquides | 35 |
| 4.1 | Liquides au repos | 35 |
| 4.2 | Liquides en mouvement ; notions de rhéologie | 41 |

Chapitre 1

Notions de mécanique

“La **Mécanique** est la branche de la Physique qui a pour objet l'étude des forces et de leurs actions sous une forme abstraite" (Larousse).

Ces actions sont soit un déplacement, soit une déformation. La mécanique inclut d'une part la cinématique, d'autre part la dynamique.

La **cinématique** s'intéresse à la description mathématique du mouvement d'un point matériel. Elle décrit sa position, sa trajectoire, sa vitesse, son accélération. Elle fait abstraction de la cause du mouvement.

La **dynamique** étudie le mouvement en liaison avec les forces qui le provoquent. Un branche particulière de la dynamique concerne les objets immobiles soumis à des forces dont les effets s'annulent : la **statique**.

En se déplaçant, une force effectue un **travail**.

Le mouvement de la matière est une manifestation de **l'énergie** qu'elle possède.

1.1 Forces

1.1.1 Définition

Un objet immobile ne se met pas en mouvement spontanément ; il n'accélère pas (ou ne ralentit pas) tout seul. Et il ne se déforme pas sans raison.

Pour produire l'une ou l'autre de ces modifications, il faut qu'un autre objet agisse sur lui, en le tirant ou en le poussant (s'ils sont en contact), en l'attirant ou en le repoussant (sans contact).

On dit alors que l'objet 2 exerce une **force** sur l'objet 1. Cette force peut être

- *localisée* si elle s'exerce en un point de l'objet, ou bien
- *répartie* si elle s'exerce à la surface, ou en tout point de l'objet.

Cependant, dans le cas de la mise en mouvement d'un corps indéformable, les forces réparties peuvent se résumer en des forces ponctuelles qui s'exercent au **centre de gravité** (=barycentre) de l'objet.

Une force localisée est définie par :

- sa direction (ci-contre : verticale),
- son sens (ci-contre : de haut en bas),
- son intensité (longueur de la flèche),
- son point d'application.



On la représente graphiquement par une flèche et on la modélise par un **vecteur** (= être mathématique caractérisé par une direction, un sens et une norme) noté \vec{F} ou $\vec{F}_{2/1}$ (force exercée par l'objet 2 sur l'objet 1) et obéissant aux règles du calcul vectoriel.

L'amplitude de la force, ou sa norme, s'exprime en *Newtons* (N). La norme de \vec{F} est notée $\|\vec{F}\|$, ou F .

Remarque : la position d'un point, sa vitesse et son accélération sont elles aussi des grandeurs vectorielles.

1.1.2 Résultante, lois de Newton

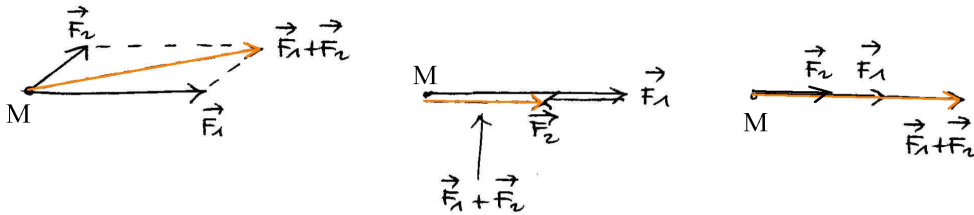
a- Résultante

Lorsque plusieurs forces agissent simultanément au même point d'un objet, leur effet est le même que celui d'une force unique appelée la **résultante** des forces, et notée $\sum \vec{F}$.

Pour obtenir la résultante, on additionne les forces comme des vecteurs : on construit un parallélogramme ayant 2 forces comme côtés, puis on remplace les 2 forces par la diagonale du parallélogramme ; on recommence avec la diagonale et une troisième force, etc... Si les deux forces à additionner ont même support, on les met bout à bout.

Sur les exemple ci-dessous, la force totale au point M est :

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



Inversement, on peut toujours décomposer un vecteur en une somme de deux vecteurs.



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

b- Les trois lois de Newton (1687)

Première loi de Newton, ou "Principe de l'inertie" (cas où $\sum \vec{F} = \vec{0}$) :

Un point matériel soumis à des forces dont la résultante est nulle est soit immobile, soit en mouvement rectiligne uniforme.

Rectiligne signifie que le point se déplace sur une ligne droite (trajectoire rectiligne) ; uniforme signifie vitesse constante.

Seconde loi de Newton, ou "Loi fondamentale de la dynamique" ($\sum \vec{F} \neq \vec{0}$) :
Un point matériel de masse m soumis à des forces dont la résultante n'est pas nulle subit une accélération \vec{a} telle que :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}. \quad (1.1)$$

Remarque : on a donc $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})/\text{s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Troisième loi de Newton, ou "Loi de l'action et de la réaction" :

Si un corps 1 exerce sur un corps 2 la force $\vec{F}_{1/2}$, alors le corps 2 exerce sur le corps 1 la force $\vec{F}_{2/1}$ telle que :

$$\vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2}. \quad (1.2)$$

Les forces sont de même amplitude, ont la même direction et des sens opposés.

Conséquence des lois de Newton : Une force non nulle exercée en un point d'un corps immobile déplace ce point en l'accélérant. On distingue plusieurs cas :

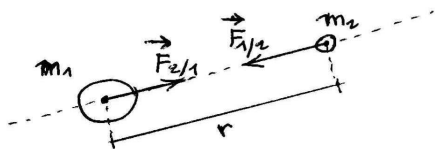
- dans le cas d'un solide indéformable, l'objet est déplacé (mouvement de translation ou de rotation ou combinaison des deux). Par exemple, entraîné par son poids, un objet peut tomber, glisser ou basculer,
- dans le cas d'un solide déformable (ductile), l'objet est déformé. La déformation est soit élastique (réversible : cesse lorsque la force cesse ; l'objet reprend sa forme initiale), soit plastique (irréversible et permanente : la forme de l'objet est modifiée, par exemple lors d'une éraflure, d'un enfoncement, d'une perforation),
- dans le cas d'un solide fragile, l'objet peut être cassé,
- dans le cas d'un liquide : une force provoque un écoulement (plus ou moins rapide suivant la viscosité, l'étalement (l'écoulement est irréversible et cesse dès que la force s'arrête).

1.1.3 Forces à distance et forces de contact

a- Forces à distance (sans liaison matérielle)

Force de gravitation :

La force de gravitation est une force toujours attractive : toutes les masses s'attirent. Soient deux corps 1 et 2 de masses respectives m_1 et m_2 , distants de r .



$$\vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2}$$

La force de gravitation exercée par 1 sur 2 et la force exercée par 2 sur 1 ont même direction, sens opposé et même amplitude, égale à :

$$F_{2/1} = F_{1/2} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.3)$$

- r est la distance entre les centres de masse des deux corps. Elle est exprimée en mètres (m),
- m_1 et m_2 sont les masses, exprimées en kilogrammes (kg),
- G est la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.

Remarque : la valeur de G est égale à la valeur de l'amplitude de la force d'attraction (en Newtons) entre deux masses de 1 kg dont les centres sont situés à 1 m l'un de l'autre. Notons aussi la décroissance de l'amplitude de la force de gravitation en $1/r^2$ dans l'équation (1.3) : plus les deux corps sont éloignés, moins ils s'attirent.

La force de pesanteur est un cas particulier de la force de gravitation pour un objet situé à la surface de la Terre. Cette force est répartie dans tout l'objet (chaque point de l'objet est attiré vers le centre de la Terre); cependant, tout se passe comme si la Terre exerçait une force unique appliquée au centre de gravité de l'objet. Cette force est dirigée vers le centre de la Terre, c'est-à-dire qu'à notre échelle elle est dirigée verticalement et orientée de haut en bas. Son amplitude se calcule à partir de l'équation (1.3) en remplaçant r par la distance Terre - objet, c'est-à-dire par le rayon de la Terre ($r = 6400 \text{ km} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$), m_1 par la masse de la Terre ($m_1 = 6,0 \cdot 10^{24} \text{ kg}$), et m_2 par m , la masse de l'objet considéré :

$$F_p = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{6,0 \cdot 10^{24} \times m}{(6,4 \cdot 10^6)^2} = 9,8 \times m$$

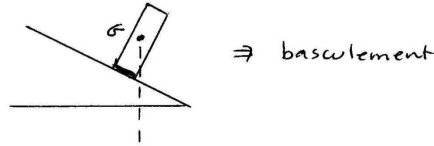
La force de pesanteur, où **poids** d'un objet de masse m à la surface de la Terre est donc :

$$\vec{F}_p = m\vec{g}, \quad (1.4)$$

où \vec{g} est un vecteur dirigé selon la verticale et orienté vers le bas, de norme $\|\vec{g}\| = g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1} = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$. Comme il est homogène à une accélération, \vec{g} est appelé accélération de la pesanteur.

Remarque : g n'a pas exactement la même valeur aux pôles et à l'équateur, au niveau de la mer et au sommet de l'Everest (8 800 m d'altitude). Le poids d'un objet dépend donc de l'endroit où il se trouve (par exemple le poids est divisé par 6 sur la lune), mais pas sa masse.

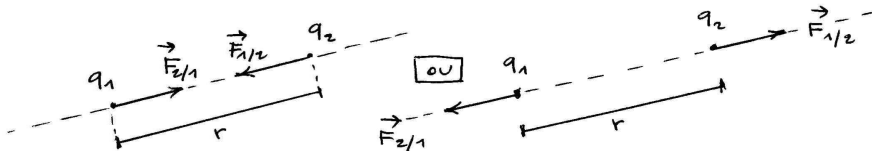
Application : basculement d'un objet. Considérons un objet sur un plan incliné (par exemple une statue pendant un transport). Il y aura basculement si la verticale passant par le centre de gravité de l'objet tombe à l'extérieur du "polygone de sustentation". En effet tout se passe comme si toute la masse de l'objet était concentrée en un point (le centre de gravité de l'objet).



Force de Coulomb :

La force de Coulomb (ou force électrostatique) s'exerce entre des corps chargés électriquement.

Soient deux charges électriques ponctuelles q_1 et q_2 , distantes de r . Comme dans le cas de la force de gravitation, la force électrostatique exercée par 1 sur 2 et la force exercée par 2 sur 1 ont même direction, sens opposé et même amplitude : $\vec{F}_{2/1} = -\vec{F}_{1/2}$. Cependant la force peut être soit attractive, soit répulsive.



Si q_1 et q_2 sont de signes contraires, la force est attractive, si q_1 et q_2 sont de même signe, la force est répulsive.

L'intensité de la force électrostatique $F_C = F_{2/1} = F_{1/2}$ est donnée par :

$$F_{2/1} = K \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1.5)$$

- r est la distance entre les deux charges (en m),
- q_1 et q_2 s'expriment en Coulomb (C) ; les charges peuvent être positives ou négatives,
- K est une constante électrostatique, qui dépend du milieu : dans le vide, $K = 8,99 \cdot 10^9$ S.I. ; dans la matière, K est plus petit que sa valeur dans le vide (les charges polarisent la matière et cette polarisation masque l'interaction entre les charges)¹.

Exercice : Comparer la force de gravitation (attractive) et la force électrique (répulsive) entre deux protons du noyau d'Helium (on donne la masse du proton $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, sa charge $q_p = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C, $K = 8,99 \cdot 10^9$ S.I. et $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ S.I.

→ On trouve que le rapport des amplitudes de la force électrostatique F_C sur la force de gravitation F_G est de l'ordre de 10^{36} : F_C est environ un milliard de milliards de milliards de milliards de fois plus grande que F_G . Or F_C est répulsive (les charges des protons sont de même signe). Si les protons restent liés entre eux, c'est donc qu'il existe d'autres forces attractives entre

1. La permittivité relative $\epsilon_r = K_{vide}/K$ permet de quantifier cet écart. Par exemple pour l'eau : $\epsilon_r = 80$: les forces attractives entre les ions Na^+ et Cl^- dans le sel de cuisine deviennent 80 fois plus faibles lorsque le sel est plongé dans l'eau. En conséquence, les cristaux se dissocient en ions. Les solvants les plus dissociants sont ceux dont la ϵ_r est la plus élevée.

les nucléons.

On connaît quatre forces (ou interactions) fondamentales en Physique :

| INTERACTION | PORTÉE | AMPLITUDE RELATIVE |
|--|--------------|--------------------|
| Interaction forte (entre nucléons) | 10^{-15} m | $2 \cdot 10^3$ |
| Interaction électromagnétique | ∞ | 1 |
| Interaction faible (assure la cohésion du neutron) | 10^{-18} m | 10^{-3} |
| Interaction gravitationnelle | ∞ | 10^{-36} |

Les phénomènes physico-chimiques intéressant la conservation-restauration sont liés aux forces d'interaction entre molécules. A ce niveau, les forces nucléaires (interaction forte et interaction faible) n'interviennent pas car leur portée ne dépasse pas le rayon de l'atome, et les forces de gravitation sont négligeables. Par conséquent, seules les forces électromagnétiques jouent un rôle. Parmi ces forces on trouve :

- les forces de Coulomb, entre les ions (chargés),
- les forces de van der Waals (Forces de London, de Keesom, liaison H), entre les atomes et entre les molécules non chargées (ce sont des forces entre dipôles électriques).

b- Forces de contact

Elles s'exercent à la surface de l'objet considéré (surface de contact ; elles sont dues aux interactions entre molécules. On distingue les forces normales (perpendiculaires aux surfaces des objets) et les forces tangentielles (parallèles aux surfaces).

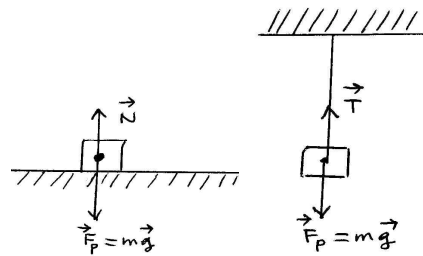
Exemple de forces normale : la force de réaction d'un corps solide (représentée ci-contre). A l'équilibre :

$$\vec{F}_P + \vec{N} = \vec{0}$$

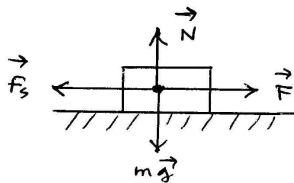
où \vec{N} est la réaction du support.

Autre exemple de force normale : force de tension d'un fil \vec{T} . A l'équilibre :

$$\vec{F}_P + \vec{T} = \vec{0}$$



Exemple de forces tangentielle : la force de frottement statique \vec{f}_s qui empêche un objet de glisser sur un support.



\vec{F} est la force exercée sur le solide pour le déplacer vers la droite.

Expérimentalement, on constate que le solide reste immobile tant que F reste inférieur à une limite

$$F_{max} = \mu_s N,$$

où μ_s est une constante dépendant des deux matériaux en contact (sa valeur étant toujours inférieure à 1). Lorsque $F \geq F_{max}$ le solide se déplace vers la droite et la force de frottement \vec{f}_s est remplacée par une force de frottement cinétique \vec{f}_c (ou "force de glissement").

1.1.4 Pression exercée par une force sur une surface

Soit \vec{F} une force uniformément répartie sur une surface S , et dirigée perpendiculairement à S , on appelle pression la quotient F/S :

$$p = \frac{F}{S} \quad (1.6)$$

Une pression s'exprime donc en N.m^{-1} , ou $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$, ou en Pascals (noté Pa) dans le système international.

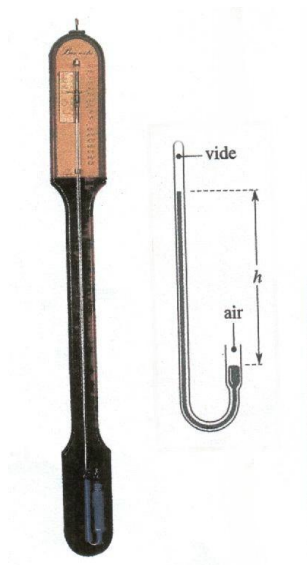
Cas particulier : pression exercée par un liquide. On considère une colonne cylindrique de hauteur h et de section S constante d'un liquide de masse volumique constante ρ . On a :

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho Shg}{S},$$

soit :

$$p = \rho gh. \quad (1.7)$$

Application : baromètre à liquide :



Mercure (Hg) : $\rho = 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ et $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$

→ $h = 760 \text{ mm}$ correspond à une pression de $p_0 = 101325 \text{ Pa} = 1 \text{ atmosphère}$.

$1 \text{ mm Hg} \Leftrightarrow 133 \text{ Pa}$.

eau (H₂O) : $\rho = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ et $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$

→ $h = 10,3 \text{ m}$ correspond à une pression de $p_0 = 1 \text{ atmosphère}$.

$1 \text{ mm H}_2\text{O} \Leftrightarrow 9,81 \text{ Pa}$.

Remarque : les millimètres de colonnes d'eau sont utilisés quand on veut avoir une mesure sensible de la variation de pression.

Autres unités de pression :

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1000 \text{ hPa} = 100 \text{ kPa}$.

$1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa}$.

$1 \text{ psi} = 6,895 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ ("pound per square inch").

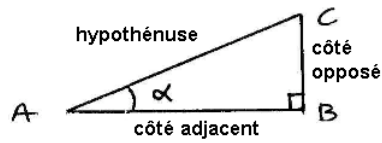
RAPPELS DE TRIGONOMÉTRIE :

Dans un triangle rectangle :

$$\cos \alpha = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypothénuse}} = \frac{AB}{AC}$$

$$\sin \alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypothénuse}} = \frac{BC}{AC}$$

$$\tan \alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \frac{AB}{AC} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$



Théorème de Pythagore : $AB^2 + BC^2 = AC^2 \Rightarrow \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$

$$\alpha = 0 \rightarrow \cos 0 = 1$$

$$\alpha = 90^\circ \rightarrow \cos 90^\circ = 0$$

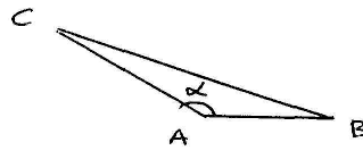
Pour des angles α compris entre 0 et 90° :

$$\cos \alpha > 0 \text{ et } \sin \alpha > 0.$$

Par ailleurs :

$$\cos \alpha = -\cos(180^\circ - \alpha)$$

$$\sin \alpha = \sin(180^\circ - \alpha)$$



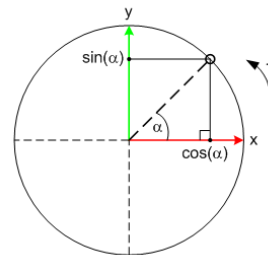
$$\text{D'où : } \cos(180^\circ) = -1.$$

Exemple :

$$\cos 120^\circ = -\cos(180^\circ - 120^\circ) = -\cos 60^\circ = -0,5$$

$$\sin 120^\circ = \sin(180^\circ - 120^\circ) = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,866.$$

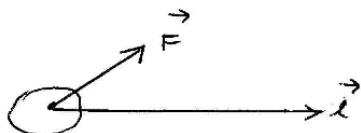
Cercle trigonométrique : c'est un cercle de rayon égal à 1 centré à l'origine d'un repère (xOy) . α est l'angle entre un des rayons du cercle et l'axe Ox . Sur l'axe Ox , le cosinus de α est la projection d'un rayon du cercle d'angle α ; la projection du même rayon sur l'axe Oy est le sinus de α . On voit que $-1 \leq \cos \alpha \leq 1$ et $-1 \leq \sin \alpha \leq 1$. Le sens trigonométrique est le sens de parcours du cercle lorsque α augmente.



1.2 Travail d'une force

1.2.1 Définition

On considère une force \vec{F} constante en direction et en intensité, agissant en un point d'un objet, et un déplacement rectiligne \vec{l} de ce point (qui a lieu en même temps que la force).



Le travail W effectué par la force est :

$$W = F \times l \times \cos \alpha \quad (1.8)$$

où :

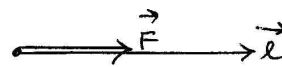
- F est l'amplitude de la force \vec{F} (en N) ; $F > 0$,
- l est la longueur du déplacement \vec{l} (en m) ; $l > 0$,
- α est l'angle entre les vecteurs \vec{F} et \vec{l} ; α est compris entre 0° et 180° .

Le travail s'exprime en N.m, ou Joules dans le système international. Dans le système CGS, il s'exprime en dyn.cm = erg. On a $1 \text{ N.m} = 1 \text{ Joule} = 10^7 \text{ ergs}$.

Remarque : cette définition est valable à condition que l'amplitude F de la force soit constante durant tout le déplacement.

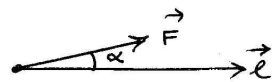
Conséquences :

Si $\alpha = 0$: $\cos \alpha = 1 \Rightarrow$ le travail effectué par \vec{F} est maximum : $W = F \times l$



Si $\alpha = 90^\circ$: $\cos \alpha = 0 \Rightarrow W = 0$: une force perpendiculaire au déplacement ne travaille pas.

Si $0 \leq \alpha < 90^\circ$: $\cos \alpha \geq 0 \Rightarrow W \geq 0$: la force effectue un travail moteur.



Si $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$: $\cos \alpha \leq 0 \Rightarrow W \leq 0$: la force effectue un travail résistant.



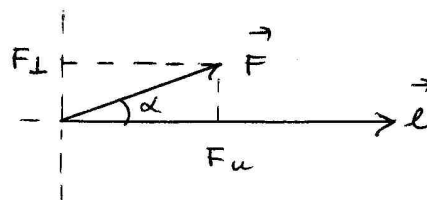
Exemple : on promène son chien au bout d'une laisse ; la force exercée sur le chien effectue un travail moteur si le maître déplace le chien, résistant si le chien déplace le maître.

Remarque 1 :

En décomposant \vec{F} en deux forces \vec{F}_u (force utile) et \vec{F}_\perp , on a :

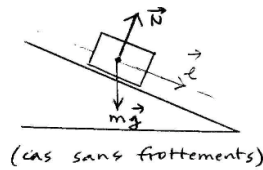
$$F_u = F \cos \alpha, \text{ et}$$

$$F_\perp = F \sin \alpha.$$



$\Rightarrow W = F_u l =$ travail de la force utile : seule la composante utile de \vec{F} (dirigée suivant \vec{l}) contribue au déplacement en effectuant un travail moteur ou résistant. La composante perpendiculaire à \vec{l} n'a aucun effet sur le mouvement rectiligne suivant \vec{l} .

Remarque 2 : si \vec{F} est la seule force qui s'exerce, le déplacement se fait sur la droite support de \vec{F} , ou bien sur un cercle. Sur les dessins ci-dessus avec $\alpha \neq 0$ ou 180° , d'autres forces que \vec{F} , non dessinées, agissent en même temps que \vec{F} (en donnant une résultante dirigée comme \vec{l}). C'est par exemple le cas dans la promenade du chien, ou pour un bateau à voile poussé par un vent de biais (il faut ajouter la réaction de la quille). Autre exemple : objet sur un plan incliné (il faut ajouter au poids $m\vec{g}$ de l'objet la réaction exercée sur lui par le plan incliné.



1.2.2 Applications : machines simples

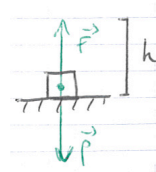
Pour monter un objet de masse m à une hauteur h , il faut exercer sur lui une force qui le tire verticalement. Quel est le travail à dépenser pour monter l'objet ?

\rightarrow C'est le travail de la force $\vec{F} = -m\vec{g}$ qui compense le poids \vec{P} de l'objet :

$$W = F \times l \times \cos \alpha$$

$$W = +mg \times h \times \cos 0$$

$$W = mgh$$

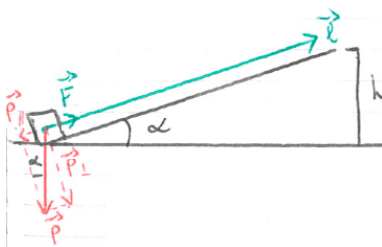


Ci-dessous, on va montrer que le travail dépensé est identique si l'ascension est verticale ou bien le long d'une rampe, ou encore en utilisant une ou plusieurs poulies fixes, alors que dans les deuxième et troisième cas il faut une force plus faible que dans le premier cas ($F = mg$). Par contre le déplacement l est plus grand que h .

Ce principe (une force à exercer plus faible se paie par un déplacement plus grand) s'applique aux machines simples, permettant de soulever des objets lourds avec nos faibles forces.

a- Plan incliné :

Que devient le travail de la force motrice si l'objet est monté le long d'une rampe ?



$$W = F \times l \times \cos 0 = F \times l$$

Or la force à exercer est celle qui compense la force qui s'oppose au déplacement : $\vec{F} = -\vec{P}_{//}$

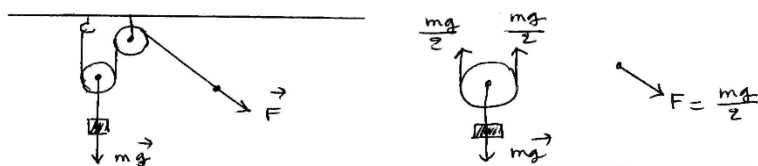
$$\rightarrow F/(mg) = P_{//}/(mg) = \sin \alpha$$

$$\rightarrow W = mg \times l \times \sin \alpha$$

$$\text{or } \sin \alpha = h/l$$

$$\rightarrow W = mg \times l \times h/l = mgh.$$

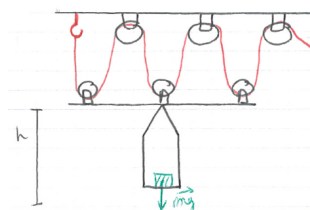
b- Poulies mobiles :



Pour que l'objet monte de h ; il faut tirer une longueur $l = 2h$ de fil avec une force $F = mg/2$.
 $\Rightarrow W = mgh = F \times 2h$.

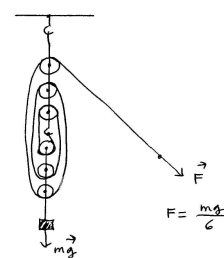
Palan :

On tire sur la corde avec une force $\frac{mg}{6}$; pour que l'objet monte à la hauteur h , il faut tirer une longueur $6h$ de corde.

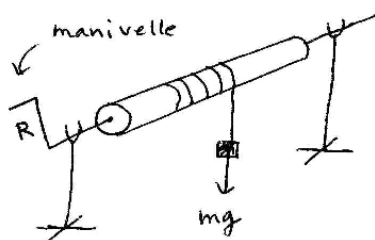


$$\Rightarrow W = \frac{mg}{6} \times 6h = mgh$$

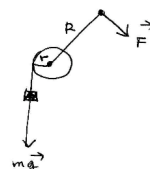
Palan vertical :



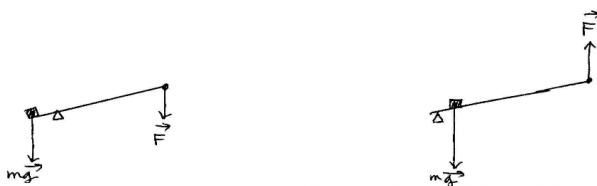
c- Treuil :



Sur un tour :
 $W = 2\pi R F$ $W = 2\pi r m g \rightarrow F = \frac{r}{R} m g$



d- Leviers :



1^{er} type : assemblage de deux leviers \rightarrow ciseaux, tenailles, pinces coupantes.
 2^{eme} type : assemblage de deux leviers \rightarrow casse-noix, brochette, couteau de boulanger.

1.3 Energie

1.3.1 Définition

D'après Helmholtz (1850), on appelle énergie la capacité de fournir un travail. Autrement dit, c'est la capacité de mettre en mouvement un corps immobile.

Elle est généralement notée E ; son unité est la même que celle du travail : le Joule (J) dans le Système International.

Il existe d'autres unités que le Joule :
l'erg (dans le système CGS) : $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$,
la calorie (ancienne unité de chaleur) : $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$,
l'électron-Volt : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$,
le kilowatt-heure : $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$.

1.3.2 Différentes formes de l'énergie

- **Énergie électromagnétique :**

Par exemple : énergie lumineuse.

Elle est constituée de photons (cf cours du 1^{er} semestre) d'énergie $E = h\nu$ (ν est la fréquence du photon, h est la constante de Planck).

Elle ne dépend pas de la masse.

- **Énergie cinétique E_c :**

C'est l'énergie du mouvement. Un corps de masse m animé d'une vitesse v a une énergie cinétique

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2. \quad (1.9)$$

Un corps au repos a donc $E_c = 0$.

L'énergie cinétique ne dépend que de la vitesse du corps, quelle que soit sa position.

- **Énergie potentielle E_p :**

Une particule de masse m soumise à une force d'interaction a une énergie potentielle E_p lorsque le travail W qu'il faut fournir pour la déplacer, sans changer sa vitesse, d'un point A à un point B ne dépend pas du chemin suivi entre A et B (ceci implique que les frottements soient négligeables).

Alors la variation d'énergie potentielle est :

$$\Delta E_{p(A \rightarrow B)} = E_p(B) - E_p(A) = W. \quad (1.10)$$

Par exemple : pour monter une masse m à une hauteur h au-dessus de sa position initiale, qu'on la monte verticalement ou le long d'un plan incliné on a :



$$W_{AB} = W_{AC} + W_{BC} = W$$

Ici la masse m est soumise à la force d'interaction $\vec{F} = m\vec{g}$.
Il faut fournir un travail W contre la force de pesanteur $\rightarrow E_p$ est l'énergie potentielle de pesanteur. Le travail fourni pour monter m se retrouve dans l'augmentation de l'énergie potentielle de pesanteur E_p .

Il existe d'autres sortes d'énergie potentielle, par exemple l'énergie potentielle élastique (lorsque la force d'interaction est la force élastique qui s'oppose à la déformation d'un corps élastique).

L'énergie potentielle ne dépend que de la position de la masse m quelle que soit sa vitesse.

Note : on peut stocker de l'énergie potentielle.

• **Énergie mécanique E_m :**

C'est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle :

$$\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_p. \quad (1.11)$$

Pour une masse qui n'est soumise à aucune autre force que la force d'interaction liée à l'énergie potentielle, l'énergie mécanique est constante (i. e. elle ne varie pas lorsque la position varie). On a alors : $\Delta E_c = -\Delta E_p$.

Par exemple, pour une masse m lâchée d'une hauteur h sans vitesse initiale ($v_{initiale} = 0$) et qui arrive au sol avec une vitesse $v_{finale} = v$:

$$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = -\Delta E_p$$

or $\Delta E_p = -mgh$ (E_p diminue quand m descend)

$$\rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

$\rightarrow m$ arrive au sol avec une vitesse $v = \sqrt{2gh}$ (si le frottement avec l'air est négligeable)².

• **Énergie thermique :**

Dans une masse m immobile, les molécules ne sont pas immobiles mais "grouillent" en tous sens avec des vitesses d'autant plus grandes que la température est élevée (dans un cristal, les atomes vibrent autour de leurs positions moyennes). L'énergie du mouvement désordonné des molécules est appelée énergie thermique ou chaleur (on parle aussi généralement d'agitation thermique) : elle est égale à la somme de l'énergie cinétique des molécules.

L'ancienne conception de la chaleur comme d'un "fluide calorifique" pouvant être transvasé d'un corps à un autre a fait place à la théorie mécanique de la chaleur. L'expérience de Joule (1843) est la première mise en évidence d'un transfert d'énergie mécanique (agitation de l'eau) en énergie thermique (élévation de la température) \rightarrow mesure de l'équivalent mécanique de la calorie.

• **Énergie électrique :**

C'est une énergie potentielle liée aux forces d'interaction électriques.

• **Énergie chimique :**

Elle est stockée dans les liaisons chimiques intramoléculaires.

Elle est libérée par les réactions chimiques.

Exemple : les moteurs à explosion transforment l'énergie potentielle chimique stockée dans un carburant en travail (énergie mécanique) grâce à des combustions très rapides.

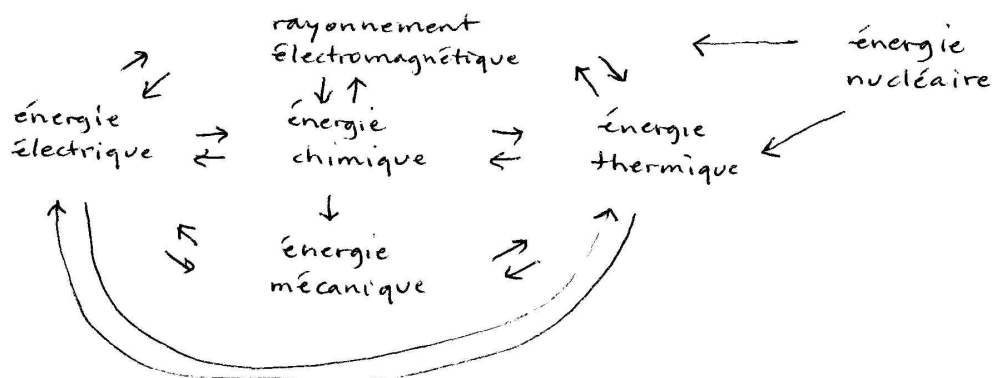
• **Énergie nucléaire :**

Elle est stockée dans les liaisons entre les nucléons, dans le noyau des atomes.

Elle est libérée par les réactions de désintégration nucléaires.

Remarque : ces différentes formes d'énergie peuvent se transformer les unes dans les autres (à l'exception de la transformation en énergie nucléaire). Mais il y a toujours une partie de l'énergie qui se transforme en chaleur.

2. Notons que cette vitesse ne dépend pas de la masse : une plume ou une balle de plomb arrivent au sol avec la même vitesse dans ces conditions.



1.3.3 Conservation de l'énergie

L'énergie ne peut être ni détruite ni créée, mais seulement transférée d'un objet à un autre, ou transformée d'une forme en une autre.

Par exemple :

- on transfère de l'énergie d'un corps à un autre par l'intermédiaire d'une force qui travaille ; W mesure l'énergie qui passe du corps qui exerce la force à celui sur lequel elle s'exerce ;
- on transfère de l'énergie d'un corps à un autre en les mettant en contact, si leurs températures ne sont pas les mêmes ; la chaleur Q mesure l'énergie qui passe du corps le plus chaud au corps le plus froid.
- etc...

Cependant, la transformation de l'énergie d'une forme à l'autre se fait généralement avec une dégradation de l'énergie, c'est-à-dire qu'une partie de l'énergie est convertie en chaleur. On parle souvent alors de perte d'énergie mais c'est un abus de langage : l'énergie n'est pas perdue mais elle a été convertie en une forme qui n'est pas souhaitée.

A titre de comparaison, remarquons que 1 calorie est de façon équivalente :

- l'énergie nécessaire pour faire gagner à un objet d'1 g une vitesse de 330 km.h^{-1} ($E = \frac{1}{2}mv^2$).
- L'énergie nécessaire pour faire gagner 1°C à 1 g d'eau (voir plus loin dans le cours "Température et chaleur"),
- l'énergie nécessaire pour élever un objet de 1 g à une altitude de 426 m.

1.3.4 Énergie de liaison

L'énergie de liaison est l'énergie libérée lors de la formation d'une liaison ; elle est égale, au signe près, à l'énergie nécessaire pour casser la liaison.

a. Exemples de liaisons :

Liaisons chimiques (fortes) : ce sont celles qui s'exercent entre les atomes d'une molécule, entre les ions d'un cristal, ou entre les atomes d'un métal.

Liaisons physiques (faibles) : elles s'exercent entre les molécules (d'un liquide par exemple) : il s'agit des liaisons hydrogènes et des liaisons de van der Waals.

Liaisons nucléaires : elles s'exercent entre les nucléons du noyau d'un atome.

b. Energie mise en jeu dans une liaison :

Pour rompre une liaison, c'est-à-dire pour séparer les constituants en les éloignant les uns des autres, il faut vaincre les forces d'attraction qui retiennent ensemble les constituants. Ceci demande de l'énergie. En la fournissant au système lié, on obtient les constituants séparés.

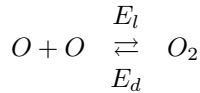
Exemple de rupture de liaison : $O_2 + \text{énergie fournie} \longrightarrow O + O$: les composants ont plus d'énergie lorsqu'ils sont libres que lorsqu'ils sont liés.

L'énergie, fournie de l'extérieur, nécessaire pour casser la liaison, s'appelle l'*énergie de dissociation* E_d de la liaison.

Inversement, la formation des liaisons libère de l'énergie. Par exemple : $O + O \longrightarrow O_2 + \text{énergie libérée}$: les composants ont moins d'énergie lorsqu'ils sont liés que lorsqu'ils sont libres.

L'énergie libérée vers l'extérieur lors de la formation de la liaison s'appelle l'*énergie de liaison* E_l de cette liaison.

A cause du principe de conservation de l'énergie : $E_l + E_d = 0 \Rightarrow E_l = -E_d$:



L'énergie mise en jeu dans une liaison est E_l (pour la formation de la liaison) ou E_d (pour sa rupture). Leur valeur commune est $E = E_d = -E_l$.

Convention du banquier : l'énergie qui entre dans le système considéré est comptée positivement ; celle qui sort est comptée négativement.

$\Rightarrow E_d > 0$ et $E_l < 0$.

c. Définition de E_l :

Les valeurs données dans les tables correspondent à l'énergie mise en jeu pour former N_A liaisons ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$). Elles s'expriment donc en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$.

L'énergie mise en jeu dépend de la température et de la pression : la valeur de E_l est donnée pour une température de 25°C (298 K) sous la pression atmosphérique normale = $1,013 \cdot 10^5$ Pa au départ et à l'arrivée de la réaction (de plus il faut que les constituants et les produits soient l'état gazeux).

On a, typiquement :

| | |
|-----------------------------------|--|
| liaisons covalentes ou ioniques : | $E_l \simeq 400 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| liaisons métalliques : | $E_l \simeq 100 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| liaisons hydrogène : | $E_l \simeq 10 \text{ à } 30 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| liaisons de van der Waals : | $E_l \simeq 1 \text{ à } 8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. |

Chapitre 2

Température et chaleur

Température et chaleur sont deux notions différentes, à ne pas confondre. La température se mesure avec un thermomètre, la chaleur avec un calorimètre ; les unités sont différentes.

2.1 Température

Le degré d'agitation désordonnée des molécules d'un objet est perçu par la peau comme le fait que l'objet est plus ou moins chaud, ou plus ou moins froid.

2.1.1 Définition

La température d'un corps est une grandeur qui caractérise le degré d'agitation des molécules de ce corps. Les molécules d'un corps n'ont pas toutes la même vitesse, non seulement en direction mais aussi en intensité (Maxwell et Boltzmann ont donné la distribution des vitesses dans un gaz à la fin du 19^{ème} siècle) ; la température est liée à la vitesse moyenne donc à l'énergie cinétique moyenne des molécules.

2.1.2 Echelles de température

Pour mesurer la température d'un corps, on fait appel à des phénomènes physiques liés à l'agitation des molécules, par exemple la dilatation des liquides : leur volume augmente quand la température augmente. C'est le principe des thermomètres à mercure ou à alcool.

Sachant que l'eau gèle à une température bien déterminée, et bout à une température bien déterminée, on a deux points fixes de température. On peut alors graduer les thermomètres en divisant la distance entre deux repères correspondant à ces deux points fixes en n parties égales, après avoir attribué une température arbitraire à ces deux points fixes.

Exemple :

| | échelle Celsius | échelle Fahrenheit |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------|
| température de fusion de la glace | 0 °C | 32 °F |
| température d'ébullition de l'eau | 100 °C | 212 °F |
| nombre de graduations intermédiaires | 100 | 180 |

La relation entre les degrés Celsius (noté x) et les degrés Fahrenheit (noté y) est donc l'équation de la droite passant par $M_1 (0 ; 32)$ et $M_2 (100 ; 212)$: $y = 1,8x + 32$.

L'unité légale de température dans le système international est le Kelvin (K) défini ainsi :

$$T = \theta + 273,15 \quad (2.1)$$

où T est la température en K et θ est la température en °C.

T est aussi appelée température thermodynamique, ou température absolue.

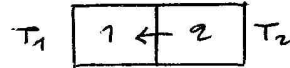
T n'est jamais négative.

En pratique on pourra prendre 273 au lieu de 273,15 dans l'équation (2.1).

Remarque : le °C reste utilisable lorsqu'on s'intéresse à des différences de températures, puisque $T_2 - T_1 = \theta_2 - \theta_1$.

2.2 Variation de température et chaleur échangée ; chaleur massique

Rappel : on appelle chaleur l'énergie gagnée ou perdue par un corps au contact d'un autre corps dont la température est différente.



Ce transfert d'énergie se produit de plusieurs façons possibles.

- Si les deux corps sont des solides, la transfert de chaleur se fait par *conduction*, c'est-à-dire par l'intermédiaire des chocs entre molécules dans la zone de contact, qui communiquent de l'énergie cinétique aux molécules de la zone la plus froide (T_1 augmente, T_2 diminue et finalement la température des deux devient égale à T_f).
- Pour un gaz ou un liquide, il y a en plus un déplacement de matière (courants de convection) : propagation de la chaleur par *convection*.
- Un mécanisme différent est l'absorption de photons par la matière : propagation de la chaleur par *rayonnement* (effet de serre, ...).

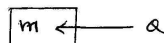
Remarque : le transfert de l'énergie ne se fait pas, dans ces exemples, par l'intermédiaire d'une force déplaçant son point d'application. Finalement l'énergie peut être transférée à un corps

- soit par le travail W ,
- soit par la chaleur Q .

Unité : comme le travail, la chaleur s'exprime en Joules (J).

2.2.1 Variation de température et chaleur

Lorsqu'on fournit de la chaleur à un corps pur de masse m , l'effet le plus courant est l'augmentation de la température de ce corps.



→ La température du corps passe de T_i à T_f . On a la relation entre $(T_f - T_i)$ et Q :

$$Q = mc(T_f - T_i) \quad (2.2)$$

où Q est exprimé en J, m en kg et $(T_f - T_i)$ en K ou en °C.

c est une constante, caractéristique du corps pur, dépendant a priori de la température mais pratiquement constante entre T_i et T_f si $(T_f - T_i)$ n'est pas trop grand.

c est appelée la chaleur massique du corps pur en question. Son unité est le joule par kilogramme et par Kelvin ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ou ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$).

Exemple : $c = 4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ pour l'eau autour de 15°C. Calculons la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une masse $m = 1$ gramme d'eau pour faire passer sa température de $T_i = 14,5 \text{ °C}$ à $T_f = 15,5 \text{ °C}$:

$$\begin{aligned} Q &= mc(T_f - T_i) \\ &= 10^{-3} \times 4,18.10^3 \times 1 \\ &= 4,18 \text{ J} \\ &= 1 \text{ calorie.} \end{aligned}$$

C'est en fait la définition de la calorie = quantité de chaleur à fournir pour élever d'1°C la température d'1g d'eau autour de 15°C.

Remarque :

si $T_f > T_i \rightarrow Q > 0$: chaleur gagnée par le corps de masse m ,

si $T_f < T_i \rightarrow Q < 0$: chaleur perdue par le corps de masse m ,

\rightarrow C'est la convention du banquier déjà vue au chapitre précédent à propos de l'énergie.

2.2.2 Chaleur massique

Si on connaît la quantité de chaleur Q nécessaire pour faire passer de T_i à T_f la température d'une masse m d'un corps pur, alors sa chaleur massique est :

$$c = \frac{Q}{m(T_f - T_i)}. \quad (2.3)$$

Cette définition découle de l'équation (2.2).

Quelques valeurs de chaleur massique (dans les conditions normales de température et de pression) :

| Matériau | Chaleur massique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) |
|---------------|---|
| Air | 1005 |
| Eau (liquide) | 4186 |
| Huile | ~ 2000 |
| Fer | 444 |
| Or | 129 |

Remarque : les corps purs qui ont une grande chaleur massique (par exemple l'eau) ont besoin d'une grande quantité de chaleur pour accroître leur température : en se réchauffant, ils emmagasinent une grande quantité de chaleur, qu'ils pourront restituer en se refroidissant. Ils se réchauffent et se refroidissent difficilement. En plongeant dans l'eau froide un métal chaud de même masse, celui-ci se refroidit plus facilement que l'eau ne se réchauffe.

2.3 Changement d'état et chaleur ; chaleur latente

2.3.1 Changements d'état

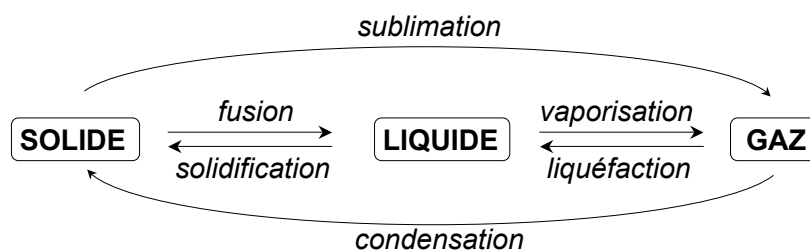
Lorsqu'on chauffe un corps pur on peut le faire changer d'état : le faire fondre (solide \rightarrow liquide) ou le vaporiser (liquide \rightarrow gaz).

Par exemple, dans une pièce où la température est $> 0^\circ\text{C}$, les glaçons fondent peu à peu dans un seau à glace : la chaleur fournie par le milieu extérieur sert à fondre l'eau solide. Or le mélange d'eau liquide et de glace reste à 0°C tant qu'il reste de la glace.

\rightarrow on peut chauffer (i. e. fournir de la chaleur) sans échauffer (i. e. augmenter la température).

Autre exemple : l'eau bout à 100°C : lorsqu'on chauffe une casserole d'eau bouillante, l'eau liquide se transforme progressivement en vapeur d'eau tandis que la température du liquide reste constante.

Explication : l'énergie transférée sous forme de chaleur ne sert pas à augmenter l'agitation (i. e. l'énergie cinétique) des molécules mais à rompre les liaisons entre elles.



Remarque : si la fusion consomme une chaleur Q , la solidification libérera une chaleur $-Q$; si la vaporisation consomme une chaleur Q , la liquéfaction libérera une chaleur $-Q$.

2.3.2 Chaleurs latentes

Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à une masse m d'un corps pur pour la faire fondre ?

$$Q = mL_f. \quad (2.4)$$

L_f est une constante caractéristique du corps pur, appelée chaleur latente (ou enthalpie) de fusion. Son unité S.I. est le joule par kilogramme (J.kg^{-1}).

Une autre unité utilisée est la calorie par gramme (cal.g^{-1}) : $1\text{cal.g}^{-1} = 4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$.

Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à une masse m d'un corps pur pour la vaporiser ?

$$Q = mL_v. \quad (2.5)$$

L_v , constante caractéristique du corps pur, est appelée chaleur latente (ou enthalpie) de vaporisation.

Exemple : $L_v \simeq 2,26 \text{ J.kg}^{-1} \simeq 540 \text{ cal.g}^{-1}$ pour l'eau (liquide \rightarrow vapeur à 100°C).

Remarque : l'évaporation de l'eau dans l'air se fait à toute température (de l'eau laissée dans une soucoupe à température ambiante finit par s'évaporer complètement) mais l'air n'est pas un corps pur : de l'eau passe dans l'air pour équilibrer les pressions partielles de la vapeur d'eau et des autres constituants. On peut définir une chaleur latente de vaporisation pour l'eau à 20°C .

La définition de la chaleur latente est : Q étant la quantité de chaleur nécessaire pour provoquer le changement d'état d'une masse m d'un corps pur, la chaleur latente de ce changement est :

$$L = \frac{Q}{m} \quad (2.6)$$

Chapitre 3

Changement d'état

Introduction

Une masse m d'un corps pur peut passer d'un état à un autre lorsqu'on modifie les conditions de température et de pression (voir le schéma des changements d'états au chapitre précédent). Pour les corps purs, les changements d'état se font à température fixe (par exemple l'eau à une pression de 1 atm se vaporise à 100°C et se solidifie à 0°C). Pour les mélanges ce n'est pas le cas (par exemple l'évaporation de l'eau dans l'air a lieu à toute température).

On peut traduire cet effet de la façon suivante. Supposons que les matériaux considérés (vapeur d'eau, gaz qui composent l'air) se comportent comme des gaz parfaits lorsqu'ils sont en phase gazeuse, c'est-à-dire que l'attraction entre les molécules du gaz est négligeable. Ils respectent donc la loi de Boyle - Mariotte :

$$PV = nRT \quad (3.1)$$

où P est la pression, V le volume occupé par le gaz, n le nombre de moles du gaz, T la température et R la constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Dans un mélange de gaz parfaits on a

$$\begin{aligned} PV &= (n_1 + n_2 + n_3 + \dots) RT \\ &= n_1 RT + n_2 RT + n_3 RT + \dots \\ \rightarrow P &= \frac{n_1 RT}{V} + \frac{n_2 RT}{V} + \frac{n_3 RT}{V} + \dots \\ &= P_1 + P_2 + P_3 + \dots \end{aligned}$$

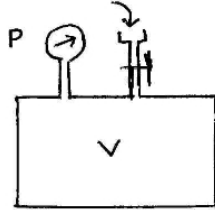
où $P_1 = n_1 RT/V$ est la pression du gaz 1 lorsqu'il occupe seul le volume V à la température T : c'est la *pression partielle* du gaz 1.

L'équation ci-dessus est la loi de Dalton : la pression d'un mélange de gaz parfaits est égale à la somme des pressions partielles des gaz qui constituent le mélange.

3.1 Vaporisation

3.1.1 Phénomène de saturation ; pression de vapeur saturante

a- Expérience : vaporisation dans le vide :



Un dispositif permet d'introduire goutte à goutte un liquide dans un volume V où on a préalablement fait le vide. Un manomètre mesure la pression P dans le volume V .

La paroi du récipient permet les échanges thermiques de sorte que la température du système est égale à la température extérieure (constante) T .

On introduit une goutte de liquide ($=n$ moles), elle se vaporise instantanément et la pression P augmente (car $P = nRT/V$). On continue à ajouter des gouttes de liquide ; le liquide se vaporise : n augmente donc P augmente, jusqu'au moment où le liquide cesse de se transformer en vapeur et reste sous forme de goutte au fond du récipient. Il y a alors un équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur. P atteint une valeur P_s . Si on ajoute encore du liquide on constate qu'il ne se vaporise pas : la pression du gaz a atteint un maximum P_s , le volume est saturé en gaz.

En résumé :

- s'il n'y a pas de liquide dans V : $0 \leq P < P_s$,
- s'il y a pas du liquide dans V : $P = P_s$.

Dans le premier cas, V contient de la "vapeur sèche" (gaz seul) ; dans le deuxième cas, V contient de la "vapeur saturante" (gaz + liquide, en équilibre).

P_s est appelée *pression de vapeur saturante*.

Remarque : si on vaporise le liquide dans un volume plein d'air (i. e. un mélange de gaz), le même phénomène de saturation se produit ; la pression du gaz vaporisé est sa pression partielle P_p , d'où :

- vapeur sèche si : $0 \leq P_p < P_s$,
- vapeur saturante si : $P_p = P_s$.

→ Définition de P_s : P_s est la pression partielle des molécules de gaz en présence du liquide du même corps, à l'équilibre à la température T .

Ou encore : P_s est la valeur maximale de P_p , à la température T .

b- Quelques valeurs de P_s à 20°C pour des solvants usuels :

| | P_s (mm Hg) |
|--|---------------|
| (diéthyl)éther | 440 |
| CS ₂ (disulfure de carbone) | 360 |
| acétone | 180 |
| acétate d'éthyle | 174 |
| éthanol | 44 |
| eau | 17,5 |
| acide acétique | 12 |
| DMF (diméthyl formamide) | 4 |

Application : comparaison de la volatilité de deux liquide : le plus volatil est celui dont la pression de vapeur saturante est la plus élevée.

Classification :

- $P_s > 100$ mm Hg : liquide très volatil,
- $P_s < 10$ mm Hg : liquide peu volatil,
- entre les deux (10 mm Hg $< P_s < 100$ mm Hg) : liquide moyennement volatil.

c- Influence de la température :

P_s augmente très rapidement avec la température. Par exemple pour l'eau :

| θ (°C) | 0 | 20 | 40 | 100 |
|---------------|-----|------|------|-----|
| P_s (mm Hg) | 4,6 | 17,5 | 55,4 | 760 |

d- Approximation des gaz parfaits :

Si on considère la vapeur comme un gaz parfait, on a :

$$\begin{aligned}
 P_p V &= nRT = \frac{m}{M} RT \\
 \rightarrow \frac{m}{V} &= \frac{M}{R} \times \frac{P_p}{T} \\
 \rightarrow \left(\frac{m}{V}\right)_{max} &= \frac{M}{R} \times \frac{P_s}{T} \tag{3.2}
 \end{aligned}$$

où

m est la masse de vapeur (en kg),

V est le volume occupé (en m³),

M est la masse molaire (en kg.mol⁻¹),

P_s est la pression de vapeur saturante (en Pa),

T est la température (en K),

R est la constante des gaz parfaits (en J.mol⁻¹.K⁻¹).

Autrement dit : à une température donnée, un volume donné ne peut pas contenir plus qu'une masse $\frac{M}{R} \times \frac{P_s}{T} \times V$ de vapeur.

3.1.2 Humidité de l'air

a- Humidité absolue et humidité relative :

Soit une masse m de vapeur d'eau dans un volume V . On définit l'humidité absolue HA :

$$HA = \frac{m}{V}. \quad (3.3)$$

L'unité usuelle de HA est le g.m^{-3} (alors que l'unité dans le S. I. est le kg.m^{-3}).

On a : $0 \leq HA \leq HA_{max}$, où $HA_{max} = m_{max}/V$ à la température T .
 $HA = 0$: air sec,
 $HA = HA_{max}$: air saturé.

On définit également l'humidité relative HR :

$$HR = \frac{HA}{HA_{max}}. \quad (3.4)$$

HR est un nombre sans unité.

On a : $0 \leq HR \leq 1$ ou encore $0 \leq HR \leq 100\%$.

Note : on parle aussi d'"état hygrométrique de l'air" : $R = P_p/P_s$ ($0 \leq R \leq 1$)¹.

Remarque : dans un volume étanche et ne renfermant aucun matériau pouvant absorber la vapeur d'eau, HA est constante quelle que soit la température (s'il n'y a pas de condensation qui entraînerait une diminution de m).

b- Variation de HR avec la température :

Lorsque la température passe de T à T' , HA est constante mais pas HA_{max}
→ l'humidité relative passe de HR à $H'R$:

à T : $HR = HA/HA_{max}$

à T' : $H'R = HA/H'A_{max}$

$$\rightarrow H'R = HR \frac{HA_{max}}{H'A_{max}}.$$

On voit que si $T' > T$, $H'A_{max} > HA_{max}$ (voir la table), d'où $H'R < HR$: lorsque la température augmente, l'air se dessèche.

1. Pour un gaz parfait, l'humidité relative et l'état hygrométrique de l'air sont égaux : $HR = R$.

VAPEUR D'EAU SATURANTE

| θ (°C) | H _{Amax} (g/m ³) | p _s (mm Hg) | θ (°C) | H _{Amax} (g/m ³) | p _s (mm Hg) |
|------------------|--|---------------------------|------------------|--|---------------------------|
| 0 | 4,85 | 4,59 | 26 | 24,4 | 25,2 |
| 1 | 5,19 | 4,93 | 27 | 25,8 | 26,8 |
| 2 | 5,56 | 5,30 | 28 | 27,2 | 28,4 |
| 3 | 5,95 | 5,69 | 29 | 28,8 | 30,1 |
| 4 | 6,36 | 6,10 | 30 | 30,4 | 31,8 |
| 5 | 6,80 | 6,55 | 31 | 32,1 | 33,7 |
| 6 | 7,26 | 7,02 | 32 | 33,8 | 35,7 |
| 7 | 7,75 | 7,52 | 33 | 35,7 | 37,8 |
| 8 | 8,27 | 8,05 | 34 | 37,6 | 39,9 |
| 9 | 8,82 | 8,61 | 35 | 39,6 | 42,2 |
| 10 | 9,40 | 9,21 | 36 | 41,8 | 44,6 |
| 11 | 10,0 | 9,85 | 37 | 44,0 | 47,1 |
| 12 | 10,7 | 10,5 | 38 | 46,3 | 49,7 |
| 13 | 11,3 | 11,2 | 39 | 48,7 | 52,5 |
| 14 | 12,1 | 12,0 | 40 | 51,2 | 55,4 |
| 15 | 12,8 | 12,8 | | | |
| 16 | 13,6 | 13,6 | 60 | 130 | 150 |
| 17 | 14,5 | 14,5 | | | |
| 18 | 15,4 | 15,5 | 80 | 293 | 355 |
| 19 | 16,3 | 16,5 | | | |
| 20 | 17,3 | 17,5 | 100 | 598 | 760 |
| 21 | 18,3 | 18,7 | | | |
| 22 | 19,4 | 19,8 | | | |
| 23 | 20,6 | 21,1 | | | |
| 24 | 21,8 | 22,4 | | | |
| 25 | 23,1 | 23,8 | | | |

3.1.3 Ebullition

a- Définition :

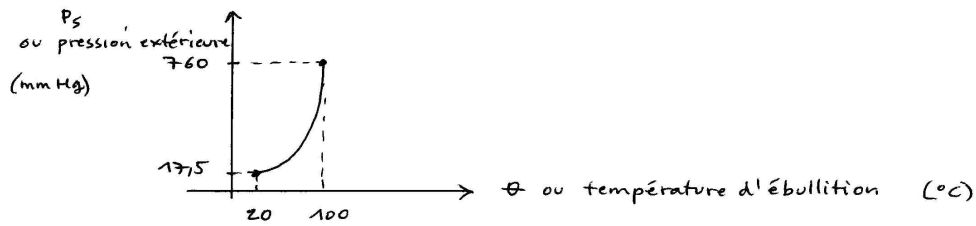
L'ébullition est une vaporisation qui se produit au sein même du liquide (contrairement à l'évaporation qui se produit à la surface) avec formation de bulles.

Les molécules passent du liquide extérieur vers l'intérieur des bulles → les bulles grossissent, se détachent des parois du récipient et montent à la surface. Ceci se produit lorsque la pression de vapeur saturante devient égale à la pression au-dessus du liquide (par exemple : sous la pression atmosphérique, l'eau bout lorsque $P_s = 760$ mm Hg c'est-à-dire lorsque $\theta = 100$ °C).

Note : sous une pression de 17,5 mm Hg, l'eau se mettrait à bouillir à 20 °C. En altitude, où la pression est inférieure à 760 mm Hg, l'eau bout à moins de 100 °C. Dans un autocuiseur où $p > 760$ mm Hg l'eau bout à plus de 100 °C → la cuisson est plus rapide que dans une casserole.

b- Lois de l'ébullition :

- Sous une pression extérieure constante, l'ébullition commence toujours à la même température ; celle-ci reste fixe pendant toute la durée de l'ébullition.
- La température d'ébullition est fonction de la pression extérieure. Elle augmente lorsque la pression extérieure augmente.



On appelle température d'ébullition normale, ou point d'ébullition θ_E , la température d'ébullition sous une pression extérieure d'une atmosphère (1 atm = pression normale = 760 mm Hg = 101325 Pa).

La température d'ébullition est caractéristique du corps pur.

c- Quelques valeurs de point d'ébullition θ_E :

| | θ_E (°C) |
|--|-----------------|
| (diéthyl)éther | 34,5 |
| CS ₂ (disulfure de carbone) | 46 |
| acétone | 56 |
| acétate d'éthyle | 77 |
| éthanol | 78 |
| eau | 100 |
| acide acétique | 118 |
| DMF (diméthyl formamide) | ≈ 150 |

Application : comparaison avec la pression de vapeur saturante à 20 °C et avec la volatilité des liquides : le plus volatil est celui dont le point d'ébullition est le plus bas (i. e. celui qui bout le plus facilement).

3.1.4 Refroidissement par évaporation

Lorsqu'il y a évaporation, le liquide restant se refroidit. En effet pour vaporiser une masse m de liquide, il faut fournir $Q = mL_v$ où L_v est la chaleur latente de vaporisation du liquide. Or le liquide s'évapore même si on n'apporte pas de chaleur de l'extérieur : la chaleur Q est prise au liquide qui reste, donc il se refroidit (si tout le liquide s'évapore, c'est le récipient qui fournit la chaleur).

Mécanisme : une molécule quitte la surface du liquide quand elle reçoit d'une molécule située sous elle un choc suffisamment énergétique pour vaincre les forces qui la "collent" aux autres molécules du liquide. Les molécules qui ont le plus d'énergie cinétique quittent donc le liquide ; par conséquent l'énergie cinétique moyenne des molécules du liquide diminue, donc la température du liquide diminue.

En résumé : le processus d'évaporation consomme de la chaleur, qui est prise dans l'environnement immédiat : le liquide ou le récipient (pas l'air qui est un mauvais conducteur de la chaleur).

Application : alcarazas, transpiration...

3.2 Liquéfaction

Considérons de l'air humide, caractérisé par son humidité absolue HA , occupant un espace clos.

3.2.1 Température de rosée

Lorsque la température monte, l'humidité relative de cet air diminue. Inversement lorsque la température baisse, HR augmente, et quand on atteint une certaine température θ_R l'humidité relative atteint 100 %. On a alors $HA = HA_{max}$: l'air est saturé.

À des températures inférieures à θ_R , l'air ne peut plus contenir toute la vapeur d'eau qui s'y trouvait auparavant. → Une partie de la vapeur se liquéfie (on dit couramment : "se condense" en phase liquide) en donnant de la buée, de la rosée, voire un ruissellement. L'air reste saturé et son humidité absolue est maintenant $H'A = H'A_{max}$ ($H'A < HA$ et $H'A_{max} < HA_{max}$).

θ_R est appelée température de rosée de l'air considéré.

Pour déterminer la température de rosée il faut trouver dans la Table pour quelle température la valeur de HA_{max} est celle de l'humidité absolue de l'air considéré.

En résumé : la température de rosée θ_R est celle en-dessous de laquelle l'air considéré sera saturé.

3.2.2 Principe de Watt (ou de la "paroi froide")

Dans un espace où la température n'est pas la même partout, la condensation se produit sur les surfaces où la température est inférieure à la température de rosée.

Exemples : buée sur les lunettes lorsqu'on rentre dans un endroit chauffé en venant du froid ; buée lorsqu'on souffle sur un miroir froid (l'air expiré est très humide).

Application : ne jamais vernir une surface dans un environnement très humide : en s'évaporant, le solvant du vernis va refroidir la surface, provoquant la condensation de micro-gouttelettes d'eau (= buée). Ces gouttelettes vont elles-même s'évaporer et laisser des micro-cuvettes à la surface du vernis, ce qui donnera au vernis solidifié un aspect de voile blanchâtre en surface.

3.2.3 Réchauffement par liquéfaction (condensation liquide)

De même que l'évaporation d'une masse m de liquide consomme une énergie $Q = mL_v$, la liquéfaction d'une masse m de vapeur libère $Q' = -mL_v$.

Cette quantité de chaleur est fournie à la surface sur laquelle apparaît la buée : la surface se réchauffe.

Remarque : ce réchauffement de la surface peut finir par arrêter la condensation si la température de la surface augmente jusqu'à atteindre la température de rosée.

Chapitre 4

Liquides

4.1 Liquides au repos

4.1.1 Rappels

a- Poussée d'Archimède :

Tout corps plongé dans un liquide subit une poussée (i. e. une force) verticale dirigée de bas en haut, égale au poids de liquide déplacé, appliquée au centre de masse (i. e. centre de gravité) du corps.

Conséquence : les corps dont la densité est

- plus grande que celle du liquide tombent dans le liquide,
- plus petite que celle du liquide remontent à la surface du liquide,
- égale à celle du liquide flottent entre deux eaux.

Applications :

- certains bois coulent, la plupart flottent ;
- l'huile (masse volumique $\rho \simeq 0,9 \text{ g.cm}^{-3}$) forme une couche à la surface de l'eau ($\rho \simeq 1 \text{ g.cm}^{-3}$);
- les pigments tombent dans les pots de peinture mais extrêmement lentement (voir plus loin : viscosité dans la partie "liquides en mouvement").

b- Principe de Pascal :

Les liquides transmettent intégralement et dans toutes les directions les pressions qu'ils reçoivent (car ils sont incompressibles).

c- Pression au sein du liquide :

À une profondeur h en-dessous de la surface libre du liquide, la pression est :

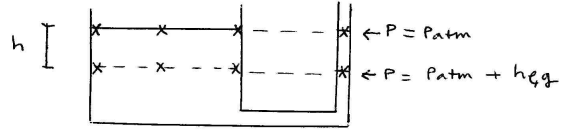
$$P = P_{ext} + P_{liq}$$

où P_{ext} est la pression extérieure exercée sur la surface libre et P_{liq} est la pression due au poids du liquide au-dessus du point considéré.

Or :

$$P_{liq} = \rho gh$$

$$P_{ext} = P_{atm} \text{ en général}$$



d'où :

$$P = P_{atm} + \rho gh \quad (4.1)$$

Conséquence : la pression dans le liquide est la même en tous points d'un même plan horizontal. Si les pressions n'étaient pas les mêmes, le liquide s'écoulerait de la zone de plus haute pression vers la zone de plus basse pression, d'où le principe des vases communicants : si deux récipients contenant du liquide sont reliés par un tube permettant l'écoulement de liquide de l'un à l'autre, le liquide s'écoule jusqu'à ce que la surface du liquide atteigne la même hauteur dans les deux récipients.

4.1.2 Phénomènes de surface

A la surface libre du liquide, ainsi qu'à la surface de contact entre le liquide et un autre liquide non miscible, ou encore entre le liquide et un solide, le liquide a des propriétés particulières qui n'existent pas en son sein.

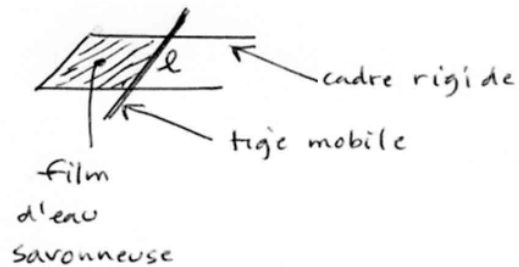
a- Tension de surface (tension superficielle) :

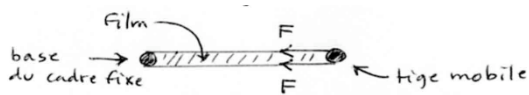
Les forces d'attraction (forces de van der Waals) entre les molécules assurent la cohésion du liquide. Pour des raisons de symétrie la résultante des forces sur une molécule située au sein du liquide est nulle ; par contre sur une molécule située à l'interface la résultante des forces est dirigée vers le liquide. Ainsi la surface du liquide exerce sur celui-ci une force de contraction, et se comporte comme une membrane élastique tendue tendant à réduire le plus possible le nombre de molécules en surface et donc l'aire S de la surface.

C'est pour cette raison que les gouttelettes sont sphériques sur des surfaces anti-adhésives (par exemple des gouttelettes d'eau sur du teflon) comme si le liquide était maintenu à l'intérieur de petits ballons en caoutchouc.

La tension superficielle d'un liquide donné est caractérisée quantitativement par le coefficient de tension superficielle (ou constante capillaire) γ , défini ainsi : γ est la force de tension superficielle par unité de longueur (exprimée en $N.m^{-1}$).

Considérons par exemple un cadre rigide et une tige mobile posée sur le cadre horizontalement. On peut, en trempant l'ensemble dans de l'eau savonneuse, obtenir un film liquide. Si on lâche la tige mobile, elle se déplace vers la gauche : le film a donc tendance à rétrécir.





La force qui s'exerce de chaque côté du film est proportionnelle à la longueur l sur laquelle elle tire : $F = \gamma l$ d'où

$$\gamma = \frac{F}{l} \quad (4.2)$$

Par exemple, à 20°C, on a :
 pour l'eau : $\gamma = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1} = 73 \text{ mN.m}^{-1}$,
 pour l'éther : $\gamma = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ N.m}^{-1} = 17 \text{ mN.m}^{-1}$.

Pour augmenter la surface du film, il faut tirer la tige vers la droite en exerçant une force au moins égale à $2F$ (le facteur 2 vient du fait que deux interfaces liquides tirent sur la tige : l'une au-dessus du film et l'autre en-dessous) : on dépense du travail, qui est emmagasiné par le film sous forme d'énergie élastique (= énergie de surface). Pour déplacer la tige de Δx vers la droite, on dépense

$$\begin{aligned} W &= 2F \times \Delta x \\ &= 2\gamma l \Delta x \\ &= \gamma \Delta S \quad \text{où } \Delta S = 2l \Delta x \text{ est la surface d'interface créée} \\ &= \text{énergie emmagasinée} \end{aligned}$$

d'où

$$\gamma = \frac{W}{\Delta S} \quad (4.3)$$

On peut donc définir, de façon équivalente, γ comme étant l'énergie superficielle par unité de surface (et l'exprimer en J.m^{-2}).

Remarque : plus γ est petit, plus il est facile d'augmenter la surface libre du liquide (moins cela nécessite de travail).

Quelques valeurs de γ à 20 °C :

| | γ (mN.m ⁻¹) |
|--|--------------------------------|
| eau | 73 |
| DMF (diméthyl formamide) | 38 |
| CS ₂ (disulfure de carbone) | 32 |
| acide acétique | 28 |
| acétone | 24 |
| acétate d'éthyle | 24 |
| éthanol | 24 |
| (diéthyl)éther | 17 |

Remarque : la constante capillaire du mercure est $\simeq 500 \text{ mN.m}^{-1}$. Cette valeur élevée est due aux forces importantes entre les atomes de Hg (qui sont liés par des liaisons métalliques et pas des liaisons de van der Waals comme pour la plupart des autres liquides). En conséquence, le mercure se rassemble toujours en gouttelettes sphériques.

Variation de la tension superficielle avec la température : γ diminue lorsque la température augmente (le liquide se dilate, augmentant la distance moyenne entre les molécules, donc les forces d'attraction intermoléculaires diminuent).

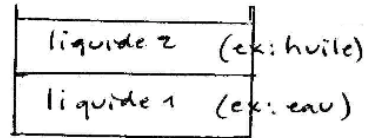
Exemple : l'eau :

| | | | | |
|--------------------------------|----|----|----|-----|
| θ (°C) | 0 | 20 | 50 | 100 |
| γ (mN.m ⁻¹) | 76 | 73 | 68 | 59 |

b- Interface liquide - liquide ; tension interfaciale :

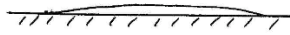
Lorsque la surface du liquide est en contact avec un autre liquide, au lieu de l'air, les molécules près de l'interface sont attirées par l'autre liquide, mais moins fortement que par les molécules du même liquide. Finalement la tension de la surface, qui est maintenant une interface, est moins grande qu'en présence d'air.


$\gamma_{1/2} < \gamma_1$ et $\gamma_{1/2} < \gamma_2$, où $\gamma_{1/2}$ est le coefficient de tension interfaciale entre le liquide 1 et le liquide 2, γ_1 est le coefficient de tension superficielle du liquide 1 et γ_2 est le coefficient de tension superficielle du liquide 2.




c- Mouillage d'un solide ; angle de contact :

Lorsqu'on dépose un liquide sur un solide, on peut avoir :

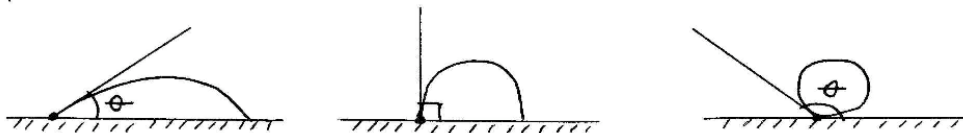
 le liquide s'étale et mouille le solide,

 le liquide se met en boule et fuit le solide,

 une situation intermédiaire.

Le résultat dépend du rapport des forces entre
 - celles qui attirent les molécules du liquide les unes vers les autres (forces de cohésion),
 - celles qui attirent les molécules du liquide vers le solide (forces d'adhésion),
 c'est-à-dire entre la tension superficielle du liquide et la cohésion interfaciale liquide - solide.

On définit l'angle de contact θ (appelé aussi "angle de raccordement" ou "angle de mouillage") : c'est l'angle entre deux plans tangents au liquide, passant par un point de contact entre le liquide, le solide et l'air, et contenant le liquide. θ est compris entre 0 et 180°.



$\theta = 0$: **mouillage total** : le liquide mouille parfaitement le solide (il s'étale jusqu'à former une couche monomoléculaire),

$\theta = 180^\circ$: **non-mouillage** : le liquide ne mouille pas le solide (dessin de droite ci-dessus),

$0 < \theta < 180^\circ$: **mouillage partiel** ; on considère que le liquide mouille convenablement le solide (ce qui est une condition nécessaire pour un bon collage) lorsque $\theta \simeq 60^\circ$ ou 70° .

Dans la pratique, l'angle de contact dépend de l'état de la surface solide (plus ou moins propre).

Exemples :

eau / verre propre : $\theta = 0$,

eau / verre : $\theta < 20^\circ$,

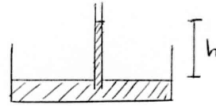
eau / plastique : $\theta > 45^\circ$,

eau / argent : $\theta = 90^\circ$,

mercure / verre : $\theta = 140^\circ$.

d- Capillarité ; loi de Jurin :

Le principe des vases communicants n'est vérifié que si les espaces contenant du liquide sont suffisamment larges. Si ce n'est pas le cas, on constate une différence de niveau :



Par exemple pour un tube capillaire (= fin comme un cheveu) de diamètre interne 0,1 mm plongé dans de l'eau on observe $h \simeq 30$ cm : c'est ce qu'on appelle le phénomène de capillarité.

Si on regarde la surface de l'eau dans le tube capillaire on observe un ménisque.



La loi de Jurin donne h en fonction des caractéristiques du liquide (masse volumique ρ et tension superficielle γ), du rayon r du tube et de l'angle de raccordement du ménisque :

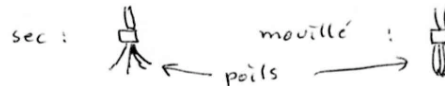
$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad (4.4)$$

où $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur.

On voit que h diminue quand r augmente (pour un tube de verre propre rempli d'eau, h devient négligeable lorsque $r > 10$ mm).

Application : par capillarité l'eau monte dans les pores des pierres (bâtiments, colonnes, statues), entre les poils des pinceaux, dans les fibres (tissu, papier buvard).

Les liquides rassemblent et maintiennent ensemble les poils des pinceaux (ce qui rend minimum la surface du liquide) :



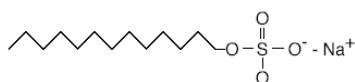
La capillarité entraîne la pénétration des solvants utilisés pour nettoyer une couche picturale fissurée, dans cette couche : une constante capillaire élevée facilite la pénétration.

4.1.3 Tensioactifs (surfactants)

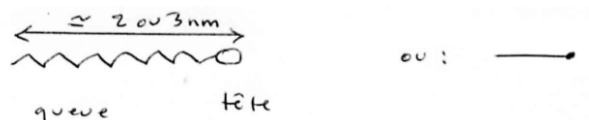
Les tensioactifs sont des molécules ayant comme propriété de diminuer les tensions superficielle et interfaciale. Elles se regroupent aux interfaces où elles forment une couche monomoléculaire (\rightarrow les tensioactifs agissent à des concentrations très faibles, par exemple 0,01 %).

Les molécules des tensioactives sont constituées d'une tête polaire ou chargée, hydrophile, et d'une queue formée par une chaîne hydrocarbonée ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-... C-}$) (ayant généralement entre 12 et 18 carbones), hydrophobe et lipophile.

Exemple : le SDS (Dodecylsulfate de Sodium, ou Laurylsulfate de Sodium, utilisé dans la plupart des savons liquides et shampoings, a pour formule $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$; sa tête s'ionise dans l'eau où il devient :



Schématiquement on peut représenter une molécule tensioactive de la façon suivante :



Lorsqu'ils sont mis en solution dans de l'eau, les tensioactifs se placent préférentiellement à la surface : la tête hydrophile plonge dans l'eau et la queue hydrophobe reste dans l'air. De même dans un mélange d'eau et d'huile les tensioactifs se placent à l'interface eau / huile (la tête dans l'eau et la queue dans l'huile).

Effet des tensioactifs :

agents mouillants : augmentent le pouvoir mouillant des liquides, en diminuant leur tension superficielle,

effet détergent : permettent de décoller les salissures grasses en les mettant en suspension,

facilitent la formation de mélanges en diminuant la tension interfaciale. Ce sont des agents moussants (mélange de liquide et d'air) et des agents émulsifiants (mélange de liquide et d'un autre liquide non miscible).

Dans ces mélanges, la surface de contact (entre liquide et air, ou entre deux liquides) est beaucoup plus grande qu'avant mélange. Le tensioactif diminue $\gamma \rightarrow$ diminue le travail à fournir pour augmenter la surface \rightarrow facilite cette augmentation de surface.

De même en ajoutant un peu de tensioactifs on facilite le broyage des pigments : les tensioactifs sont des agents dispersants.

stabilisent les émulsions (exemple : moutarde pour la vinaigrette, lécithine du jaune d'œuf pour la mayonnaise, caséine pour le lait) : une fois les gouttelettes liquides formées, les surfactants les empêchent de coalescer.

Application au nettoyage (savons et détergents) : 4 étapes :

1. mouillage
2. décollement
3. mise en dispersion
4. élimination par rinçage.

Les surfactants jouent un rôle dans les trois premières étapes.

4.2 Liquides en mouvement ; notions de rhéologie

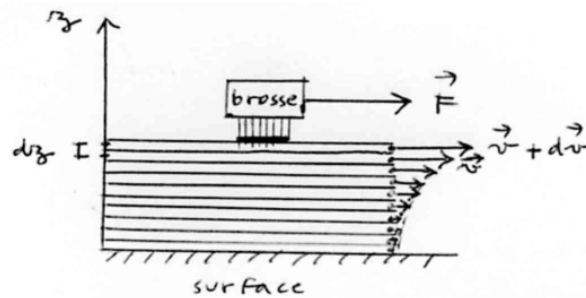
Rhéologie (du grec rheô = couler) : étude de l'écoulement des liquides.

Les liquides coulent plus ou moins facilement (ils peuvent être mobiles ou sirupeux ou pâteux) ; moins ils sont mobiles plus ils sont visqueux. On caractérise quantitativement la viscosité d'un liquide par son coefficient de viscosité η .

4.2.1 coefficient de viscosité η

a- Définition :

On tire avec une force \vec{F} une brosse dont les poils sont en contact avec la surface du liquide (\vec{F} est parallèle à la surface), ce qui met en mouvement la première couche de molécules du liquide. Par suite des frottements entre les couches successives, les couches inférieures du liquide sont entraînées. Considérons le cas où les couches de molécules se déplacent parallèlement les unes aux autres (comme des lames de liquide, d'où le nom d'*écoulement laminaire*) ce qui est le cas lorsque F n'est pas trop grande : leurs vitesses sont différentes et diminuent progressivement, de la surface jusqu'au fond (la dernière couche est pratiquement immobile et les frottements freinent la couche immédiatement supérieure).



S étant la surface sur laquelle on exerce la force,
 dv la différence de vitesse entre deux couches successives,
 dz la distance entre deux couches (i. e. la différence des hauteurs par rapport au fond),
alors $\frac{F}{S}$ est proportionnelle à la vitesse de déformation $\frac{dv}{dz}$ du liquide :

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dz} \quad (4.5)$$

où la viscosité η s'exprime en Pa.s, également appelé Poiseuille, dans le Système International. On utilise souvent l'unité CGS de la viscosité : la Poise (P) ou la centiPoise (cP) avec : $1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa.s}$.

$\frac{F}{S}$ est une contrainte. On a déjà vu une contrainte normale (cf chapitre de mécanique) : la pression $P = \frac{F}{S}$ lorsque la force \vec{F} est perpendiculaire à la surface S et dirigée vers S ; ici la force \vec{F} est parallèle à la surface S : la contrainte est une contrainte tangentielle, aussi appelée contrainte de cisaillement. Comme pour la pression, l'unité de la contrainte de cisaillement $\frac{F}{S}$ est le Pascal (Pa).

La viscosité η est donc le coefficient de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement qu'on exerce sur le liquide et la vitesse de déformation du liquide.

Remarque : η est appelée *viscosité dynamique*. Il existe un autre type de viscosité, la *viscosité cinématique* ν , définie comme le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique ρ du fluide considéré : $\nu = \frac{\eta}{\rho}$. ν s'exprime en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ dans le Système International.

b- Quelques valeurs de η à 20°C :

| | η (cP) |
|--|-------------|
| (diéthyl)éther | 0,23 |
| acétone | 0,3 |
| CS ₂ (disulfure de carbone) | 0,4 |
| acétate d'éthyle | 0,4 |
| DMF (diméthyl formamide) | 0,8 |
| eau | 1,0 |
| éthanol | 1,2 |
| acide acétique | 1,3 |

On classe les solvants en trois catégories :

1. fluides : $\eta < 2$ cP,
2. intermédiaires : $2 \text{ cP} < \eta < 10$ cP,
3. visqueux : $\eta > 10$ cP.

Exemples de viscosités élevées :

huile d'olive : $\eta \simeq 100$ cP
 glycérine : $\eta \simeq 1500$ cP
 miel liquide : $\eta \simeq 10^5$ cP
 verre pâteux : $\eta \simeq 10^7$ cP
 colles : $\eta \simeq 10^8$ cP
 cires : $\eta \simeq 10^{11}$ cP

Remarque : à des échelles de temps suffisamment longues, le verre des vitres, et même les montagnes coulent, bien qu'à l'échelle de temps d'une observation humaine ces matériaux soient solides.

c- Variation de η avec la température :

La viscosité diminue rapidement quand la température augmente, car le liquide se dilate, les molécules s'éloignent donc les unes des autres et par conséquent les forces de frottement diminuent.

Exemple : l'eau :

| θ | 0°C | 20°C | 40°C | 60°C | 80°C | 100°C |
|-------------|-----|------|------|------|------|-------|
| η (cP) | 1,8 | 1,0 | 0,65 | 0,47 | 0,35 | 0,28 |

Remarque : la viscosité a une influence directe sur la pénétration des solvants dans les craquelures : une viscosité élevée freine la pénétration, puis favorise la rétention.

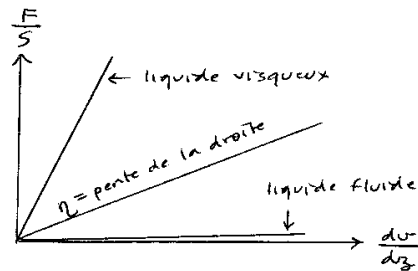
4.2.2 Différents types d'écoulement

On distingue les liquides sans rigidité (où la moindre contrainte provoque l'écoulement du liquide) et les liquides avec rigidité (où il faut que la contrainte dépasse une valeur minimum donnée, pour qu'ils s'écoulent).

a- Liquide sans rigidité, où $\eta = \text{constante}$ (liquides Newtoniens) :

Lorsque $\eta = \text{constante}$, l'équation (4.5) est l'équation d'une droite $y = \eta x$ où l'ordonnée y est égale à la contrainte $\frac{F}{S}$ et l'abscisse $x = \frac{dv}{dz}$: η est donc la pente de la droite, comme représenté ci-contre.

Plus le liquide est visqueux, plus la pente est grande ; plus le liquide est fluide, moins il est visqueux et plus la pente est faible.

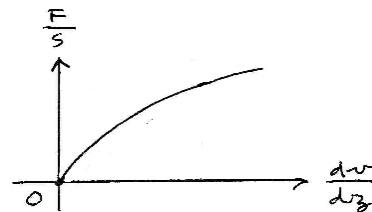


b- Liquides sans rigidité, où $\eta \neq \text{constante}$; comportement fluidifiant ou épaississant (liquides non-Newtoniens sans rigidité) :

Les liquides complexes (mélanges, comme par exemple la boue) ont une viscosité qui dépend de leur vitesse de déformation. Dans le cas le plus fréquent, la fluidité du liquide augmente (i. e. sa viscosité diminue) quand on l'agite.

La pente de la courbe qui représente la contrainte $\frac{F}{S}$ en fonction de $\frac{dv}{dz}$ est donc d'autant plus faible que $\frac{dv}{dz}$ est grand. Ceci se traduit par une courbe représentative dessinée ci-contre.

Un tel liquide, dont la viscosité diminue quand on l'agite, est dit *fluidifiant*.



Dans certains cas c'est le contraire : la viscosité augmente lorsque $\frac{dv}{dz}$ augmente : le liquide est dit *épaississant* (voir courbe ci-contre). Par exemple le sable mouillé est mou quand on pose le pied dessus, mais dur quand on tape du pied dessus.

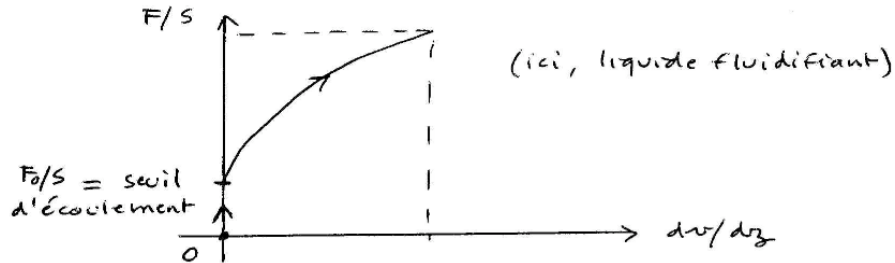


Remarque : le comportement des liquides du type (a) ou (b) est dit visqueux.

c- Liquides avec rigidité ; comportement visco-plastique :

Un mélange comme le yaourt ne coule qu'après avoir été touillé. Il faut que la contrainte $\frac{F}{S}$ dépasse un certain seuil $\frac{F_0}{S}$ appelé *seuil d'écoulement* pour que le comportement liquide appa-

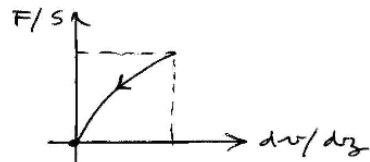
raisse. Si $\frac{F}{S} < \frac{F_0}{S}$, il y a juste déformation, temporaire ou permanente, mais pas écoulement¹. Une fois dépassé ce seuil le matériau se comporte comme un liquide, caractérisé par une certaine viscosité. Ceci se traduit par une courbe :



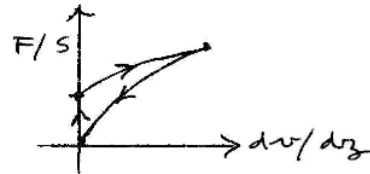
Le comportement représenté par la courbe ci-dessus est dit viscoplastique et fluidifiant.

Remarque : *thixotropie* :

Lorsqu'on arrête d'agiter (ou d'étaler) un fluide viscoplastique, il peut revenir à l'état de vitesse de déformation nulle sous contrainte nulle comme un liquide ordinaire (voir ci-contre) :



Après quelque temps passé au repos, le liquide finit par se figer. On est revenu au point de départ après avoir parcouru le cycle ci-contre :



Ce phénomène est appelé thixotropie. Pour les peintures, la thixotropie permet d'appliquer facilement la peinture (viscosité par trop grande lors des coups de pinceaux, lorsque la contrainte est suffisante) sans que la peinture, une fois au repos, ne coule.

1. Si la déformation est temporaire et réversible, on parle de déformation élastique; une déformation permanente et irréversible est une déformation plastique