

# THERMODYNAMIQUE

## Notion d'énergie

Un corps possède de l'énergie s'il est capable d'effectuer un travail.

Il existe plusieurs formes d'énergie : l'énergie potentielle, cinétique, calorifique, chimique, nucléaire, électrique, ... Un corps peut posséder plusieurs formes d'énergie à la fois et on sait que l'énergie peut se transformer.

On appelle **énergie mécanique** la somme des énergies cinétiques et potentielles.

On appelle **énergie interne** d'un corps la somme

a) des énergies cinétiques correspondant au mouvement des molécules = énergie thermique

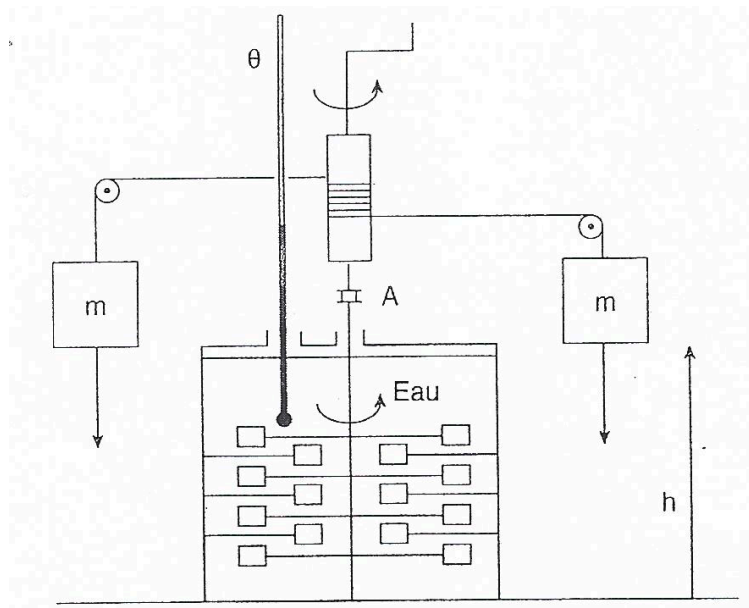
b) de l'énergie de liaison entre atomes et molécules

Fournir de la chaleur à un corps augmente donc son énergie interne.

## Expérience de Joule

Joule s'intéressa très tôt aux problèmes de transformation d'énergie.

Joule réalisa des frottements à l'intérieur d'un calorimètre contenant de l'eau au moyen d'un agitateur rotatif à palettes. La rotation de ce dernier peut être produite par la descente de 2 masses  $m$ .



Au début de l'expérience, la température de l'eau est de  $t_i$  °C : sous l'action des frottements, la température va augmenter. L'augmentation de la température de l'eau est liée à son augmentation d'énergie interne. Elle est due aux frottements occasionnés par le brassage de l'eau lui-même produit par la chute des 2 masses.

Quand les 2 masses sont descendues de la hauteur  $h$ , l'énergie mécanique fournie  $E = 2 m g h$

La température s'est élevée jusqu'à une valeur  $t_f$ . Il est facile alors de calculer la quantité de chaleur reçue par le calorimètre et l'eau qu'il contient.

Les expériences réalisées par Joule montrent que l'élévation de la température de l'eau est proportionnelle à la perte d'énergie mécanique c-à-d au travail effectué. La perte

d'énergie mécanique est égale au gain d'énergie interne donc **l'énergie mécanique s'est complètement transformée en énergie interne.**

**Principe de conservation de l'énergie ou premier principe de la thermodynamique :**  
**Dans un système isolé, l'énergie totale est constante**

Un principe est une affirmation qui ne peut être démontrée mais qui est admise parce que toujours vérifiée (jusqu'à présent)

Un système est une portion de l'univers contenant une quantité définie de matière. Le reste de l'univers est alors appelé milieu extérieur. Le système est isolé s'il n'échange avec l'extérieur ni matière, ni énergie sous quelque forme que ce soit.

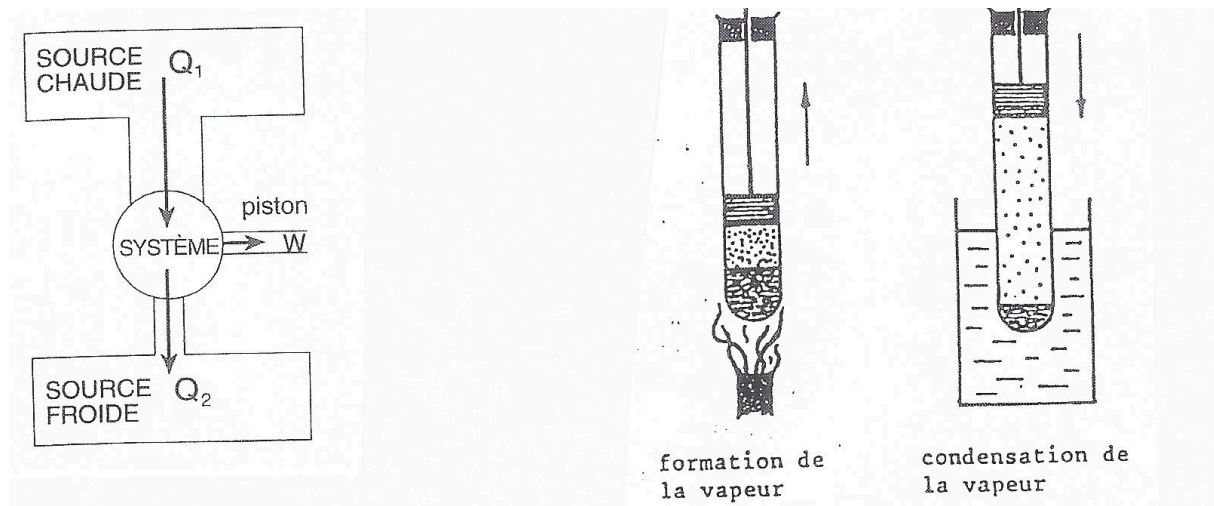
Par énergie totale, il faut entendre la somme de toutes les formes d'énergies contenues dans le système. **Si une partie d'un système isolé gagne de l'énergie, une autre en perd une quantité identique.**

Les machines thermiques :

**Une machine thermique convertit l'énergie calorifique en énergie mécanique.**

Le français Papin, inventeur de la marmite à pression, montra l'avantage d'utiliser la vapeur d'eau pour mouvoir un piston lequel à son tour peut mettre un système mécanique en mouvement. C'est surtout en Angleterre que se sont développées les machines à vapeur grâce à James Watt.

Fonctionnement simplifié d'une machine à vapeur



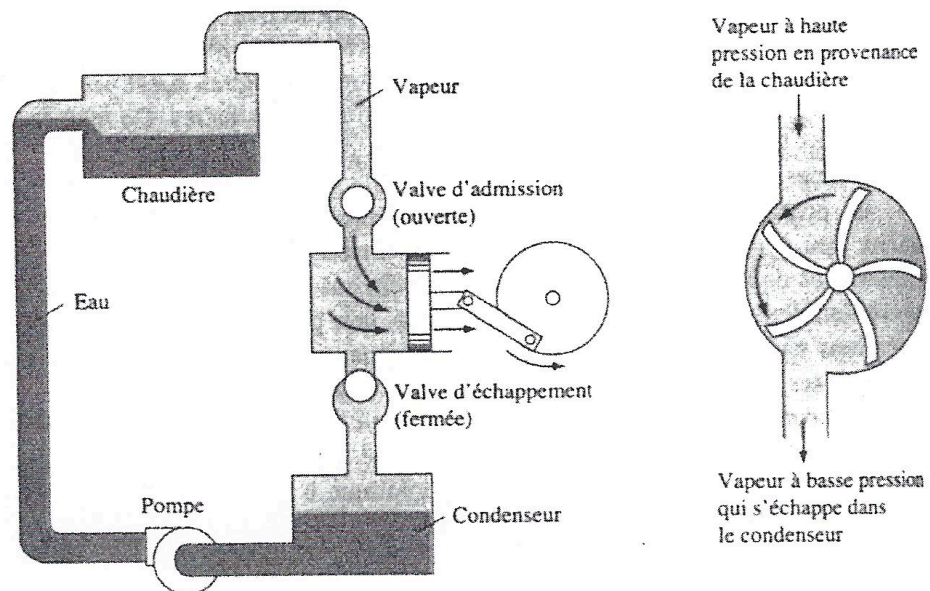
Construisons une machine à vapeur élémentaire : un tube à essai en pyrex est muni d'un piston mobile formé d'un bouchon. Nous mettons quelques  $\text{cm}^3$  d'eau dans l'éprouvette et nous enfonçons le piston. Chauffons l'eau jusqu'à ébullition : la vapeur d'eau qui se forme en quantités de plus en plus grandes, exerce une pression sur la base du piston et arrive finalement à déplacer celui-ci même si la tige du piston supporte un certain poids : **la vapeur exerce donc un travail.** Dès que le piston arrive en haut, nous enlevons la source de chaleur et nous plongeons l'éprouvette dans de l'eau froide : la vapeur se condense et le piston est aspiré vers le bas, dès que la pression de la vapeur devient inférieure à la pression atmosphérique. On peut maintenant recommencer les

mêmes opérations et on voit immédiatement que le fonctionnement des machines à vapeur implique l'intervention des éléments suivants :

- une **source chaude** et une **source froide**
- une substance qui se dilate au contact de la source chaude et qui se contracte au contact de la source froide
- un cylindre et un piston mobile
- des opérations qui se déroulent de manière cyclique.

Ici, on a enfermé la substance (l'eau et la vapeur) qui revient donc toujours au même état à la fin de chaque cycle. On développa bientôt des machines à vapeur fonctionnant de manière plus efficace où la vapeur d'eau pouvait être rejetée. Il fallait cependant toujours passer par une phase de condensation de la vapeur d'eau, pour que la pression de celle-ci puisse être suffisamment abaissée et que le piston puisse revenir vers le bas : la source froide était donc indispensable.

Voici le schéma de principe de la machine à vapeur.



L'eau est vaporisée dans la chaudière (source chaude), la chaudière fournit une quantité de chaleur  $Q_1$ . On ouvre la soupape d'admission et la vapeur pousse le piston qui effectue un travail  $W$ . Par inertie le piston va revenir. A ce moment on ferme la soupape d'admission et on ouvre la soupape d'échappement. La vapeur est alors refoulée vers le condenseur (source froide) où elle est refroidie et liquéfiée. L'eau repart vers la chaudière et le cycle se poursuit. La valeur de  $W$  est inférieure à celle de  $Q_1$ . En effet une partie de la chaleur  $Q_2$  est gaspillée à réchauffer le condenseur et le circuit de refroidissement.

**La transformation de chaleur en énergie mécanique ne peut jamais être intégrale.**

Bilan des échanges d'énergie

Au cours du premier temps, l'eau reçoit de la chaleur. Soit  $Q_1$ , la quantité de chaleur que le système reçoit de la source chaude. Comme le piston monte, le système a effectué un travail donc le système cède de l'énergie mécanique  $W$  au milieu extérieur. Ensuite, la vapeur se condense donc le système cède de la chaleur  $Q_2$  à la source froide.

Si on admet qu'à la fin d'un cycle, le système est revenu à son état initial, alors les échanges d'énergie doivent s'équilibrer :

$$Q_1 = W + Q_2 \quad \text{ou} \quad W = Q_1 - Q_2$$

Le travail effectué par la machine est égal à la différence entre la chaleur reçue par l'eau de la source chaude et la chaleur cédée par la vapeur à la source froide.

Rendement d'une machine thermique :

On appelle rendement d'une machine, le rapport entre l'énergie utilisable et l'énergie investie. Rendement = travail de la machine / chaleur fournie.

$$\text{Le rendement} \quad R = W / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = 1 - (Q_2/Q_1)$$

Le rendement d'une machine thermique est toujours inférieur à 100 %, pas seulement à cause des imperfections de la machine, mais aussi à cause de la nécessité de refroidir celle-ci pour qu'elle fonctionne de manière cyclique.

Rendement maximum

Kelvin a montré que le rendement maximum théorique dépend directement des températures absolues  $T_1$  et  $T_2$  des sources chaude et froide :

$$R = 1 - (T_2/T_1) \quad \text{avec } T \text{ (K)} = t \text{ (}^\circ\text{C)} + 273$$

Le rendement est d'autant plus grand (et la chaleur d'autant plus apte à se transformer en travail) que la température de la source chaude est élevée et celle de la source froide petite. La chaleur est d'autant plus apte à se transformer qu'elle est emmagasinée dans une source à plus haute température. Une machine qui fonctionnerait avec une source froide dont la température serait égale à 0 Kelvin aurait un rendement de 100%.

Exemples :

Si  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  et  $t_2 = 50^\circ\text{C}$  alors  $R = 1 - (323/573) = 44\%$  donc si la source chaude est de 100kcal, 44 vont se transformer en travail.

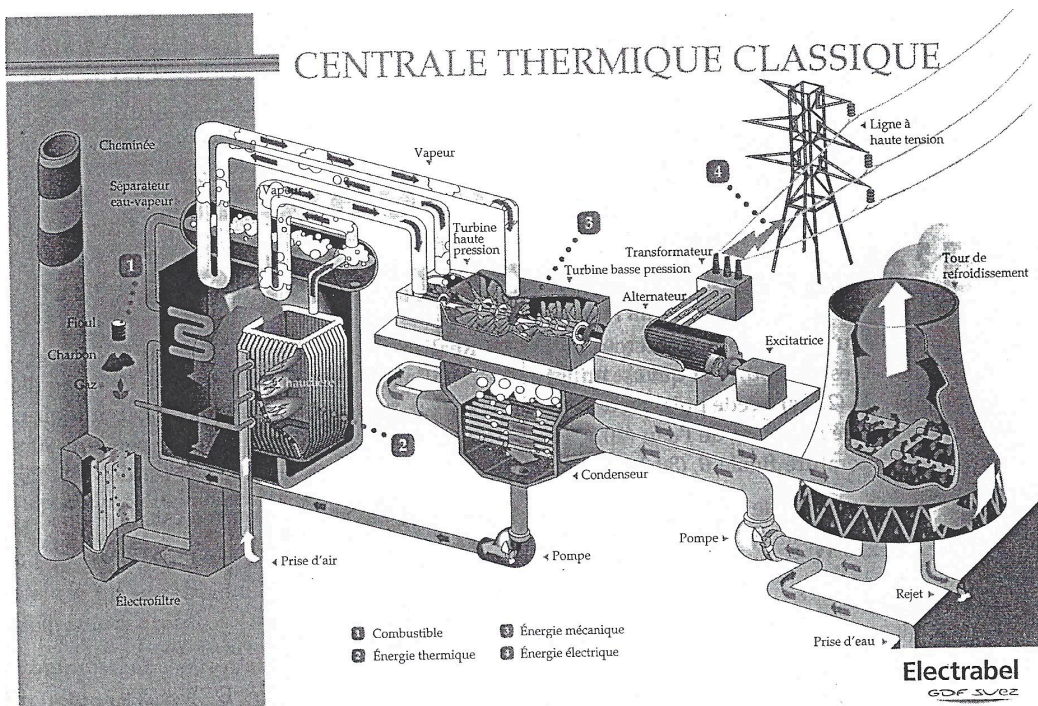
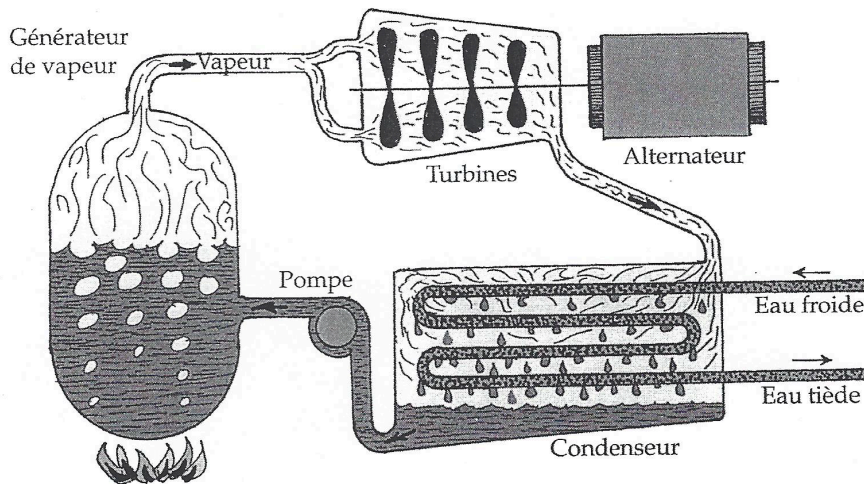
Si  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  et  $t_2 = 50^\circ\text{C}$  alors  $R = 1 - (323/373) = 13\%$  donc si la source chaude est de 100kcal, 13 vont se transformer en travail

Machine	$T_1$ (K)	$T_2$ (K)	Rdt. max. théorique en %	Rdt. pratique en %
Locomotive à vapeur	450	300	33	10
Turbine d'une centrale nucléaire	540	300	45	33
Moteur à combustion interne	780	300	62	35
Turbine d'une centrale gaz-vapeur	820	300	65	50

### La centrale électrique thermique.

Aujourd'hui la production d'électricité fait principalement appel à des machines thermiques : ce sont les centrales thermiques. Les centrales nucléaires en font parties, le fonctionnement du réacteur de ces centrales sera vu ultérieurement. Les centrales qui brûlent des combustibles fossiles tels que charbon, fioul ou gaz sont dites classiques.

La combustion a lieu dans une chaudière (source chaude) où la température atteint 1300 à 1500°C. La chaleur des flammes est cédée à l'eau qui se met à bouillir et se transforme en vapeur dans une partie appelée générateur de vapeur. La vapeur est conduite vers la turbine, composée d'une série d'aubes ou d'ailettes montées sur un axe. La turbine tourne et effectue donc un travail qui entraînera un alternateur qui produira de l'énergie électrique. La vapeur passe ensuite dans le condenseur où elle est refroidie et condensée. En effet le condenseur est traversé par de l'eau froide qui peut par exemple provenir d'un fleuve. Le condenseur est la source froide qui va absorber une partie de la chaleur produite par la combustion. Afin de ne pas rejeter dans l'environnement une eau trop chaude, cette eau est refroidie dans de gigantesques tours de réfrigération.



## ENERGIE THERMIQUE

### 1. Notion de quantité de chaleur

Lorsqu'on met en contact deux corps à des températures différentes, ils s'échangent de la chaleur. Le corps le plus chaud cède de la chaleur (et se refroidit), le corps le plus froid reçoit de la chaleur (et donc se réchauffe).

On a la formule  $Q = m c \Delta\theta$  avec

$Q$  la quantité de chaleur en joule J (on utilisait auparavant la calorie  $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$ )

$m$  la masse du corps en kg

$\Delta\theta$  la variation de température en  $^{\circ}\text{C}$

$c$  = coefficient qui dépend de la nature du corps = **chaleur massique**  $c = Q/(m \Delta\theta)$

La chaleur massique s'exprime en  $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ . La chaleur massique d'une substance mesure la quantité de chaleur nécessaire élever de  $1^{\circ}\text{C}$  la température de 1 kg de cette substance.

Pour l'eau  $c = 4186 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ . La chaleur massique de l'eau est plus grande que celle des autres corps, ce qui signifie qu'en s'échauffant (ou en se refroidissant), l'eau absorbe (ou dégage) plus de chaleur que les autres corps.

Applications :

- utilisation de l'eau pour emmagasiner et transporter de grandes quantités de chaleur (chauffage central)
- l'eau est un bon refroidisseur (moteur de voitures, réacteurs dans les centrales nucléaires)
- l'eau a une influence sur le climat : les régions proches de la mer ont un climat maritime avec des étés plus frais et des hivers plus doux que dans les régions continentales.

Les échanges de chaleur sont effectués dans un récipient fermé thermiquement isolé appelé **calorimètre** conçu de telle manière qu'il limite les échanges de chaleur avec l'extérieur (même principe que le thermo). Ce calorimètre absorbe ou libère de la chaleur lorsqu'il est en contact avec un corps plus chaud ou plus froid selon la formule  $Q = M \Delta\theta$  où  $M$  représente la **capacité calorifique** du calorimètre en  $\text{J}^{\circ}\text{C}$  et  $\Delta\theta$  la variation de température.

Remarque : Lors d'un changement d'état, il n'y a pas de variation de température. Cependant lors de la fusion, le solide a besoin de chaleur pour fondre. De même lors de la solidification, le liquide libère de la chaleur.

On appelle **chaleur latente de fusion**  $L_f$  d'un corps amené à sa température de fusion, la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer 1 kg de ce corps de l'état solide à l'état liquide sans élévation de température.

On appelle **chaleur latente de solidification**  $L_s$  d'un corps amené à sa température de solidification, la quantité de chaleur cédée par 1 kg de ce corps lorsqu'il passe de l'état liquide à l'état solide sans baisse de température.

Dans les mêmes conditions de pression :  $L_f = L_s$

Lors d'un changement d'état, on aura pour la solidification  $Q = m L_s$   
la fusion  $Q = m L_f$

$L_f$  et  $L_s$  s'expriment en  $\text{J/kg}$

Exemples : pour l'eau  $L_f = 334880 \text{ J/kg}$   
pour le plomb  $L_f = 24500 \text{ J/kg}$

Exercices

**Dans les quatre premiers exercices, nous négligerons les pertes de chaleur vers l'extérieur.**

1. Un calorimètre de capacité calorifique égale à  $1314 \text{ J/}^\circ\text{C}$  contient  $300 \text{ g}$  d'huile à  $10^\circ\text{C}$  ( $c_{\text{huile}}=2428 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ). On y introduit  $540 \text{ g}$  de plomb à  $400^\circ\text{C}$  ( $t_{\text{solidification}}=330^\circ\text{C}$ ). La température d'équilibre est de  $30^\circ\text{C}$ . Calculer la chaleur de solidification du plomb.  $c_{\text{plomb solide}}=130 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  et  $c_{\text{plomb liquide}} = 172 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ .

2. Un calorimètre de capacité calorifique égale à  $125,58 \text{ J/}^\circ\text{C}$  contient  $2 \text{ kg}$  d'eau à la température de  $25^\circ\text{C}$ . On y plonge  $100 \text{ g}$  de glace à  $-20^\circ\text{C}$ . Calculer la température finale du contenu.  $c_{\text{glace}}=2093 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ,  $c_{\text{eau}}=4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  et  $L_f \text{ glace}=334880 \text{ J/kg}$ .

3. Un calorimètre de capacité calorifique égale à  $298 \text{ J/}^\circ\text{C}$  contient  $400 \text{ g}$  d'eau à  $14^\circ\text{C}$ . On y introduit une certaine quantité de plomb fondu à  $330^\circ\text{C}$  (température de solidification du plomb). La chaleur de solidification du plomb est de  $24500 \text{ J/kg}$ . Si la température finale est de  $18^\circ\text{C}$ , calculer la masse de plomb introduite. (Rép :  $121 \text{ g}$ )

4. Un calorimètre contient  $400 \text{ g}$  d'eau. Sa capacité calorifique est égale à  $102,4 \text{ J/}^\circ\text{C}$ . On lui ajoute  $45 \text{ g}$  de glace à la température de  $-7,6^\circ\text{C}$ . La température d'équilibre est de  $10,85^\circ\text{C}$ . Calculer la température initiale des  $400 \text{ g}$  d'eau et du calorimètre. (Rép :  $21^\circ\text{C}$ )

5. Plaçons  $600 \text{ g}$  d'eau dans un four à micro-ondes dont la puissance est de  $750 \text{ W}$ . Quand on utilise le four pendant  $4 \text{ min } 35 \text{ s}$ , la température de l'eau passe de  $20^\circ\text{C}$  à  $80^\circ\text{C}$  : calculer le rendement du four à micro-ondes. (Rép :  $73 \%$ )

6. Une masse de  $100 \text{ g}$  de glace prise à  $-10^\circ\text{C}$  est chauffée dans un récipient. Le dispositif de chauffage a un rendement de  $80\%$  et sa puissance est de  $2 \text{ kW}$ . On coupe le chauffage lorsque toute la glace est fondue, la température est alors égale à  $0^\circ\text{C}$ . Quelle est la durée du chauffage ? (Rép :  $22 \text{ s}$ )

## 2. Phénomènes de dilatation

### a) Dilatation des solides

Les solides se dilatent très peu ce qui fait que les corps longilignes se dilatent surtout en longueur : on parle de **dilatation linéaire**.

Soit  $L_0$  la longueur du corps à  $0^\circ\text{C}$

$L_t$  la longueur du corps à  $t^\circ\text{C}$

$$\Delta L = \alpha_L L_0 t$$

$\Delta L =$  allongement entre  $0^\circ\text{C}$  et  $t^\circ\text{C} = L_t - L_0$

$\alpha_L =$  coefficient de dilatation linéaire, dépend de la nature du corps (plus le corps se dilate facilement, plus la valeur de  $\alpha_L$  est grande). Il s'exprime en  $^\circ\text{C}^{-1}$ .

Exemples : pour le cuivre :  $\alpha_L = 17 \cdot 10^{-6}$

fer :  $\alpha_L = 12 \cdot 10^{-6}$

verre :  $\alpha_L = 9 \cdot 10^{-6}$

pyrex :  $\alpha_L = 3 \cdot 10^{-6}$

Comme  $\Delta L = L_t - L_0 = \alpha_L L_0 t$  on aura  $L_t = L_0 (1 + \alpha_L t)$

Applications : - on doit laisser un espace entre les rails de chemin de fer

- joint de dilatation à l'entrée d'un pont

- les bilames dans les thermostats ...

Les autres solides se dilatent en volume selon la formule  $V_t = V_0 (1 + \alpha_v t)$  avec  $\alpha_v$  le coefficient de dilatation volumique.

On peut montrer que  $\alpha_v = 3 \alpha_L$

### b) Dilatation des liquides

Les liquides se dilatent plus que les solides. Ils se dilatent uniquement en volume selon la formule  $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$ . Leur coefficient de dilatation est plus important que celui des solides. Un liquide étant contenu dans un récipient, ce que l'on observe résulte de la dilatation du liquide et du solide.

**Variation de la masse volumique avec la température** : rappel  $\rho = \frac{m}{V}$  donc  $\rho_0 = \frac{m}{V_0}$

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} \Rightarrow \rho_t = \frac{m}{V_0(1 + \alpha t)} \quad \text{et} \quad \rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t}$$

La masse volumique diminue si la température augmente.

### Exercices

1. La longueur d'une barre de cuivre est de 1m à  $0^\circ\text{C}$ . On la porte à  $100^\circ\text{C}$ . Quelle est la longueur à  $0^\circ\text{C}$  d'une barre d'aluminium qui portée à la même température que le cuivre subit le même allongement ?  $\alpha_{L, \text{Cu}} = 17 \cdot 10^{-6}$   $\alpha_{L, \text{Al}} = 23 \cdot 10^{-6}$

2. Au moment de sa pose à  $6^\circ\text{C}$ , la longueur d'un pont est de 40m. Que devient cette longueur si la température atteint  $50^\circ\text{C}$  ?  $\alpha_L = 12 \cdot 10^{-6}$

3. La longueur d'une barre de cuivre est de 20cm à  $30^\circ\text{C}$ . A quelle température sa longueur sera-t-elle égale à 20,027cm. (Rép : environ  $109^\circ\text{C}$ )

4. Quel est à  $0^\circ\text{C}$  le volume d'une ampoule de verre qui à  $40^\circ\text{C}$  est exactement remplie par 75g de mercure ?  $\rho_{0, \text{Hg}} = 13,6 \text{ g/cm}^3$   $\alpha_{v, \text{verre}} = 29 \cdot 10^{-6}$   $\alpha_{\text{Hg}} = 18 \cdot 10^{-5}$



5.a) Un réservoir en verre, entièrement rempli, renferme à  $0^{\circ}\text{C}$ , 408g de mercure ( $\alpha_{\text{Hg}} = 182.10^{-6}$ ). On chauffe le réservoir à  $110^{\circ}\text{C}$ , il en sort 7,18g de mercure. Calculer le coefficient de dilatation volumique du verre.

b) On remplit le même réservoir d'alcool à  $0^{\circ}\text{C}$  et on le chauffe à  $50^{\circ}\text{C}$ . Il en sort 1,276g d'alcool ( $\rho_{0,\text{alcool}} = 0,79 \text{ g/cm}^3$ ). Calculer le coefficient de dilatation de l'alcool.

Rép :  $1,158.10^{-3}$

6. Le volume d'une bouteille de verre est de  $998\text{cm}^3$  à  $0^{\circ}\text{C}$ . Cette bouteille est entièrement remplie d'eau à  $80^{\circ}\text{C}$ . On laisse ensuite refroidir la bouteille et son contenu jusqu'à  $20^{\circ}\text{C}$ . Quelle sera à ce moment la différence entre le volume de la bouteille et le volume d'eau qu'elle contient ?  $\alpha_{\text{verre}} = 3.10^{-5}$   $\alpha_{\text{eau}} = 15.10^{-5}$

7. Une sphère en cuivre plongée dans du mercure à  $0^{\circ}\text{C}$  subit une poussée verticale de 0,588N. Quand la sphère est plongée dans du mercure à  $80^{\circ}\text{C}$ , cette poussée n'est plus que de 0,582N. Calculer le coefficient de dilatation linéaire du cuivre.  $\alpha_{\text{Hg}} = 18.10^{-5}$   $\rho_{0,\text{Hg}} = 13600 \text{ kg/m}^3$  (rappel la poussée d'Archimède  $F_A = \rho_{\text{liquide}} V_{\text{corps immergé}} g$ )