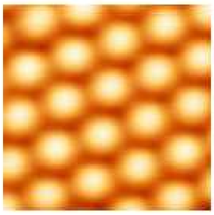
Chapitre 12
Transferts d'énergies entre systèmes macroscopiques

Table des matières

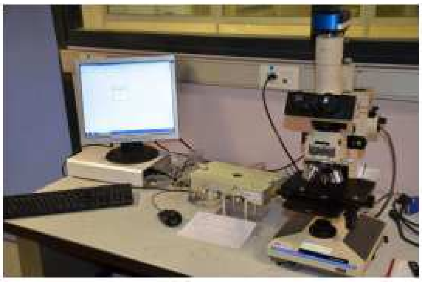
1 L'état macroscopique et microcospique de la matière

L'état macroscopique
L'état macrocopique de la matière conserne la matière qui est accessibles à l'échelle humaine et en particulier dans la vie quotidienne. Cet état est quantifié par la masse ou la quantité de matière (g ou mol)

L'état microscopique
L'état microscopique de la matière conserne la matière à l'échelle atomique ou moléculaire.
Entre l'état macroscopique et microcospique, il existe une constante de liaison : le nombre d'Avogadro $N_A = 6{,}023 \times 10^{23}$ particules par mole. Depuis les années 80 grâce aux microscopes à effet tunnel et aux microcospes à force atomique, on peut observer la surface des atomes.



Atomes de silicium à la surface d'un cristal de carbure de silicium (SiC). Image obtenue à l'aide d'un microscope à effet tunnel (STM).
➥ pour en savoir plus



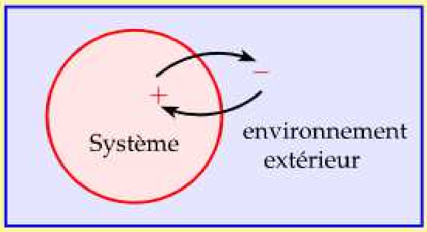
Microscope à force atomique

2 Énergie interne d'un système

2.1 Définition

Définition 1 : On appelle **système** un corps ou l'ensemble de corps qui fait l'objet d'une étude.
On distingue trois types de systèmes :

- Un **système ouvert** : échange de matière et d'energie avec l'extérieur.
- Un **système fermé** : échange uniquement d'énergie avec l'extérieur.
- Un **système isolé** : pas d'échange avec l'extérieur.



Définition 2 : On appelle **énergie interne U d'un système** l'ensemble de toutes les énergies qui se manifestent au niveau des particules microcospiques (énergie ciniétique, électrostatique, ...)

1) On ne peut pas déterminer l'énergie interne d'un système mais seulement la variation de l'énergie interne : $\Delta U = U_2 - U_1$ avec :
   - U_1 : énergie interne du système à l'état 1
   - U_2 : énergie interne du système à l'état 2

   Remarque : ΔU ne dépend pas des états intermédiaires mais uniquement des états 1 et 2.

2) État du système : ensemble des paramètres qui caractérisent le système. On a :

$$\Delta U = mc(T_f - T_i) \qquad \text{avec}$$

$c =$ capacité thermique massique en $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$T_i =$ température initiale en K ou en °C
$T_f =$ température finale en K ou en °C
$m =$ masse en kg

⚠ : Cette formule n'est valable que si le système **ne change pas de phase** c'est à dire par exemple que l'eau reste à l'état liquide.

2.2 Application

Calculer la variation d'énergie interne de :

a) 150 L d'eau chauffés de 15 °C à 60 °C

b) 10 kg de fonte dont la température passe de 130 °C à 20 °C.

Données : capacité massique de l'eau de de la fonte :
$c_{eau} = 4,18.10^3\ J.kg^{-1}.K^{-1}$ et $c_{fonte} = 4,70.10^2\ J.kg^{-1}.K^{-1}$

a) Comme la température de l'eau augmente, l'énergie interne augmente. On convertit le volume d'eau en masse soit 150 kg. On a alors :

$$\begin{aligned} \Delta U_{eau} &= mc(T_f - T_i) \\ &= 150 \times 4,18.10^3(60 - 15) \\ &= 2,8.10^7\ J \end{aligned}$$

b) Comme la température de la fonte diminue l'énergie interne de la fonte diminue. On a alors :

$$\begin{aligned} \Delta U_{fonte} &= mc(T_f - T_i) \\ &= 10 \times 4,70.10^2(20 - 130) \\ &= -5,1.10^5\ J \end{aligned}$$

3 Les différents types d'échange de chaleur

3.1 Définition

Échange de chaleur

On distingue trois types d'échange de chaleur :
- échange par **conduction** : échange par contact sans déplacement de matière.
- échange par **convection** : échange par mouvement de matière comme dans un radiateur alimenté par de l'eau chaude
- échange par **rayonnement** : échange à l'aide d'ondes électromagnétiques comme l'infra rouge ou le rayonnement solaire.

Remarque : Les transferts de chaleur se font souvent par plusieurs types d'échange : dans le radiateur d'une voiture, l'eau est refroidi par rayonnement du métal dans l'air et par convection avec le ventilateur situé à côté.

3.2 Application

Léa veut prendre un bain à 35°C. Elle fait couler 100 L d'eau chaude à 65°C, provenant de son cumulus électrique. Trouvant alors son bain trop chaud, elle y ajoute de l'eau froide à 20°C.

a) Quel est le mode de transfert thermique de l'eau chaude vers l'eau froide ?

b) Si les pertes énergétiques sont négligeables, quel volume d'eau froide faut-il ajouter ?

c) Quels autres échanges énergétiques faudrait-il considérer en réalité ? Le volume d'eau froide réel à ajouter est-il plus ou moins grand que le résultat trouvé à la question précédente ?

✏ ✏

a) Le mode de transfert est un échange par convection car c'est le mouvement de l'eau dans la baignoire qui va faire baisser la température

b) Si on considère le système formé par l'eau chaude et l'eau froide, la variation d'énergie interne est nulle car on néglige les pertes énergétiques. On appelle $T_{iec} = 65$ °C la température initiale de l'eau chaude, $T_{ief} = 20$ °C la température initiale de l'eau froide, $T_f = 35$ °C la température finale de l'eau, $m_{ec} = 100$ kg la masse d'eau chaude, m_{ef} la masse d'eau froide recherchée et c la capacité massique de l'eau.

$$\begin{aligned}
\Delta U &= 0 \\
m_{ec} \times c(T_f - T_{iec}) + m_{ef} \times c(T_f - T_{ief}) &= 0 \\
m_{ef} \times c(T_f - T_{ief}) &= -m_{ec} \times c(T_f - T_{iec}) \\
m_{ef} &= -\frac{m_{ec} \times c(T_f - T_{iec})}{c(T_f - T_{ief})} \\
m_{ef} &= -\frac{100(35-65)}{35-20} = 200 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Il faut donc rajouter 200 L d'eau froide

c) L'échange possible vers l'exterieur est un échange par conduction entre la paroi de la baignoire et l'eau ainsi qu'un échange entre l'air et l'eau. Comme il y perte d'energie interne, il faut donc moins d'eau froide pour obtenir une température de 35 °C

4 Flux thermique

4.1 Définition

Définition 3 : On appelle flux thermique, noté Φ, à travers une paroie, la puissance thermique qui la traverse. Il évalue la rapidité du transfert thermique. Il s'obtient par la relation

$$\Phi = \frac{Q}{t} \qquad \text{avec}$$

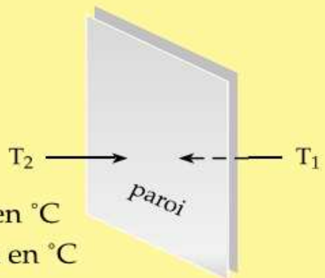
$\Phi =$ flux thermique en watts
$Q =$ quantité de chaleur tranférée à travers la paroie, en joules
$t =$ temps en secondes

Remarque : On peut faire l'analogie entre le flux thermique à travers une paroie en thermodynamique et l'intensité traversant un recepteur en électrité. Le flux est déterminé par la différence de température entre les faces de la paroie tandis que l'intensité est déterminé par la différence de potentiel entre les bornes du récepteur. Pour cette raison on peut définir une résistance thermique.

4.2 La résistance thermique

Définition 4 : La résistance thermique R_{th} d'une paroie traduit sa capacité à s'opposer au transfert thermique. Elle est définie comme le rapport de la différence de températures entre les faces de la paroi sur le flux thermique. On a alors :

$$R_{th} = \frac{T_2 - T_1}{\Phi} \qquad \text{avec}$$



$R_{th} =$ résistance thermique en $K.W^{-1}$
$T_1 =$ température absolue de la face froide en K ou en °C
$T_2 =$ température absolue de la face chaude en K ou en °C
$\Phi =$ flux thermique

Remarque : Lorsque la paroie, de surface S et d'épaisseur e, est homogène et isotrope (même résistance dans toute les directions), on définit la conductivité thermique λ en $W.m^{-1}.K^{-1}$. On a alors : $R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$

Plus la conductivité est petite, plus la résistance est grande. Un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure à 0,065 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Matériaux	**Conductivité**	**Matériaux**	**Conductivité**
Cuivre	390	Verre	0,2
Fer	80	Bois	0,15
Titane	10	Carton	0,07
Granite	2,2	Laine de verre	0,04
Béton	0,9	Polystyrène	0,036
Eau	0,6	Air	0,026

Analogie entre électricité et thermodynamique

	Électricité	Thermodynamique
Cause	différence de potentiel ΔU	différence de température ΔT
Effet	I intensité	Φ flux thermique
Résistance	R en Ω	R_{th} en $W.m^{-1}.K^{-1}$
Loi	$\Delta U = RI$ (loi d'Ohm)	$\Delta T = R_{th}\Phi$

5 Bilan énergétique

5.1 Définition

Bilan énergétique

Effectuer un bilan énergétique sur un systeme lors d'une transformation consiste à :

- déterminer tous les transferts énergétiques qui ont lieu entre le système et l'exterieur, les énergies reçues sont comptées positives, les énergies cédées négatives ;
- représenter éventuellement les transferts par une chaine énergétique, en distinguant les convertisseurs d'énergie des systèmes qui la stockent ;
- conclure par une évaluation de l'efficacite de la transformation. La variation de l'énergie totale d'un système au cours d'une évolution est donc uniquement égale a la somme des travaux W et des transferts thermiques Q échangés avec le milieu exterieur : $\Delta E_{\text{totale}} = W + Q$

5.2 Applications

5.2.1 Dans un congélateur

Un congélateur est chargé de congeler 5,0 kg d'aliments, de capacité thermique massique $c = 3,4.10^3$ $J.kg^{-1}.K^{-1}$. avant congélation. La congélation est décomposée en trois étapes : baisse de la température pour atteindre 0 °C, changement d'état à 0 °C puis baisse de la température de nouveau sous 0 °C.
Dans un premier temps, on s'intéresse au passage des aliments de la température ambiante (23°C) à 0°C.

1) Calculer l'énergie cédée par les aliments pour effectuer cette baisse de température.

2) Par quoi cette énergie est-elle reçue ? Par quel mode de transfert a-t-elle été cédée ?
3) La congélation à 0°C s'accompagne d'une variation de 250 kJ par kilogramme d'aliment.
   Déterminer l'énergie échangée pour la congélation à 0°C de ces 5,0 kg d'aliment.
   Cette énergie est-elle reçue ou cédée par les aliments ?
4) Le passage des aliments de 0°C à -18°C s'effectue grâce à l'évaporateur qui échange $1,8.10^3$ kJ avec 5,0 kg d'aliment.
   a) Dans quel sens cet échange a-t-il lieu ?
   b) Déduire de cette valeur la capacité thermique massique des aliments congelés.
   c) La puissance thermique utile de l'évaporateur est de 500 W. En déduire la durée nécessaire pour faire passer les 5,0 kg d'aliments de 23°C à -18°C.
5) On appelle pourvoir de congélation la masse d'aliments pouvant être congelée en 24 h (passage de 23°C à -18°C dans le cas étudié ici)
   Déterminer le pourvoir de congélation de congélateur étudié ici.

1) Comme les aliments sont refroidis, ils cèdent de l'énergie vers l'extérieur :

$$\Delta U = mc(T_f - T_i) = 5 \times 3,4.10^3(0-23) = -3,9.10^5 \text{ J}$$

2) Cette énergie est reçu par l'environnement extérieur aux aliments c'est à dire l'air du congélateur. Ce transfert s'effectue alors par conduction.
3) La congélation correspond à un changement d'état : la solidification des aliments. Cette énergie est cédée par les aliments à l'environnement extérieur :

$$\Delta U = 5 \times 250 = 1250 \text{ kJ} = 1,25.10^5 \text{ J}$$

4) a) Les aliments passent de 0°C à -18°C en cédant une quantité de chaleur.
   b) On a donc, en appelant c_{ac} la capacité thermique massique des aliments congelés et en convertissant l'échange de chaleur en joules :

$$\Delta U = mc_{ac}(T_f - T_i) \quad \Leftrightarrow \quad \begin{aligned} c_{ac} &= \frac{\Delta U}{m(T_f - T_i)} \\ &= \frac{-1,8.10^6}{5(-18-0)} = 2,0.10^4 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1} \end{aligned}$$

   c) La puissance thermique correspond à une énergie thermique par unité de temps soit une quantité de chaleur cédée durant les trois étapes du processus par unité de temps, on a alors :

$$P = \frac{Q}{t} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{aligned} t = \frac{Q}{P} &= \frac{3,9.10^5 + 1,25.10^5 + 1,8.10^6}{500} \\ &= \frac{23,4.10^5}{500} = 4680 \text{ s} = 1,3 \text{ h} = 1 \text{ h } 18 \text{ min} \end{aligned}$$

5) Le temps de congélation est proportionnel à la masse des aliments à faire passer de 23°C à -18°C. On peut remplir le tableau de proportionnalité suivant :

temps (en h)	masse des aliments
1,3	5
24	m

$$m = \frac{24 \times 5}{1,3} = 92,3 \text{ kg}$$

Le pouvoir de congélation de ce congélateur est donc de 92,3 kg

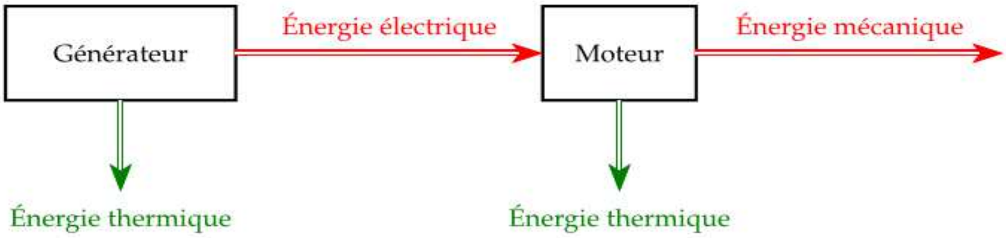
5.2.2 Rendement d'un moteur électrique

Un moteur électrique est alimenté par un générateur de tension continue $U_1 = 24$ V délivrant un courant d'intensité $I_1 = 2,0$ A. Le moteur fournit à l'extérieur une puissance mécanique P_m.

1) a) Donner l'expression de la puissance P_1 reçue par le moteur, en fonction de U_1 et I_1. Calculer P_1.
   b) Par quel mode de transfert le moteur reçoit-iil cette énergie ?
   c) Déterminer l'énergie consommée par le moteur en 15 min.
2) Pendant cette durée, l'axe du moteur transfère 36 kJ à un ensemble de rouages.
   a) Par quel mode cette énergie est-elle transférée ?
   b) Exprimer et calculer le rendement η du moteur.

Rappel : Un générateur est un apareil électrique qui fournit de la puissance électrique à un récepteur. Il existeur deux sortes de récepteurs :
- les récepteurs actifs comme les moteurs qui fournissent une puissance mécanique ou les électrolyseurs qui founissent une puissance chimique
- et les récepteurs passifs comme les résistances qui ne fournissent qu'une puissance thermique

Dans l'exercice, il s'agit d'un moteur, il fournit donc une puissance mécanique (puissance utile) ainsi qu'une puissance thermique (perte). On peut faire le schéma suivant :



Le moteur reçoit de l'énergie électrique du générateur et cède de l'énergie mécanique (utile) et de l'énergie thermique (perte de rendement).

1) a) La puissance électrique $P_1 = U_1 I_1 = 24 \times 2 = 48$ W
   b) Le moteur reçoit de l'énergie électrique.
   c) L'energie consommée par le moteur en $t = 15$ min, soit $t = 900$ s :
   $E_{\text{élec}} = P_1 \times t = 48 \times 900 = 43\,200 \text{ J} = 43,2 \text{ kJ}$
2) a) Le moteur cède de l'energie mécanique à l'ensemble de rouages.
   b) Le rendement du moteur, correspond au rapport de l'energie utile sur l'energie reçue :
   $\eta = \dfrac{E_{\text{méca}}}{E_{\text{élec}}} = \dfrac{36}{43,2} = 0,83.$ Le rendement du moteur est de 83 %.