

TRANSFERT D'ÉNERGIE

I. Comment passer du macroscopique au microscopique ?

1. La constante d'Avogadro

Les atomes et les molécules appartiennent au monde microscopique. A l'échelle macroscopique leur nombre est gigantesque, et les chimistes les regroupent en mole pour les dénombrer.

La constante d'Avogadro N_a fait le lien entre les échelles microscopique et macroscopique, elle représente le nombre d'entité contenu dans une mole

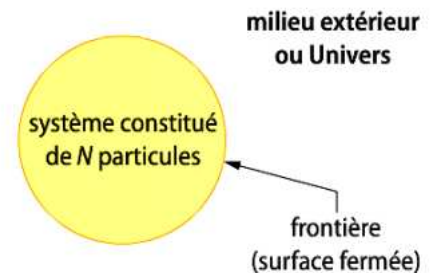
$$N_a = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

2. Notion de système

Lorsqu'on effectue une étude énergétique dans le but de mettre en évidence des transferts d'énergie, il est nécessaire de définir le système que l'on étudie.

Le système peut-être un objet ou un ensemble d'objet matériel(s). le plus souvent il s'agit d'une modélisation de la réalité

Un système est un ensemble macroscopique d'entité microscopique (atomes, ions, molécules) Il est séparé du milieu extérieur par une frontière : une interface ou peuvent avoir lieu des transferts d'énergie.



3. Energie macroscopique et énergie microscopique

• Energie cinétique d'un système

L'énergie cinétique d'un système est liée à la vitesse et peut apparaître sous deux formes :

- **Une forme macroscopique** : mouvement visible du système
- **une forme microscopique** : mouvement désordonné des particules du système, appelé agitation thermique (et mesuré à l'échelle macroscopique par la température)

Plus la température du système est élevée, plus l'agitation thermique des particules qui le constitue est importante et plus leur énergie cinétique microscopique est grande

• Energie potentielle d'un système

L'énergie potentielle d'un système est une énergie « latente » qui n'est pas « visible » mais qui peut potentiellement se transformer en une autre sorte d'énergie. Elle peut apparaître sous deux formes :

- **Une forme macroscopique** : Energie potentielle de pesanteur, Energie potentielle élastique...
- **Une forme microscopique** : liée aux interactions entre les particules qui constituent le système. On distingue les énergies potentielles microscopiques chimique, électrique, magnétique et nucléaire.

Énergie potentielle d'interaction	physique ou latente	chimique	nucléaire
Entités en interaction	molécules ou atomes	atomes liés	nucléons
Interaction(s) impliquée(s)	électromagnétique	électromagnétique	forte et faible
Cette interaction intervient lors d'un(e)	changement d'état physique	transformation chimique	transformation nucléaire

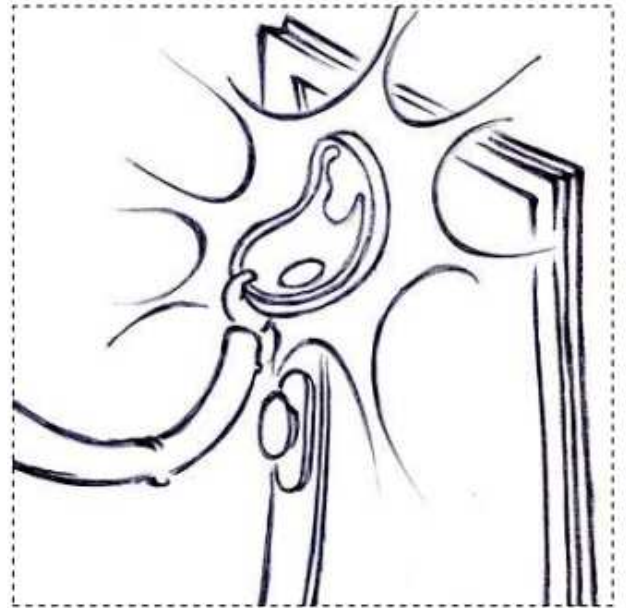
• **Energie totale d'un système**

L'énergie totale d'un objet peut se décomposer en 4 termes :

2 termes d'énergie cinétique (microscopique et macroscopique) et 2 termes d'énergie potentielle (microscopique et macroscopique)

Par exemple, amusez-vous à balancer un steak bien chaud par la fenêtre. Au moment de passer par la fenêtre, ce steak en plein vol possède les 4 formes d'énergie :

- de l'énergie cinétique macroscopique, parce qu'il bouge
- de l'énergie cinétique microscopique, parce qu'il est chaud
- de l'énergie potentielle macroscopique, parce qu'il est haut (et va donc tomber et gagner de l'énergie cinétique)
- de l'énergie potentielle microscopique, car un steak contient des « calories » susceptibles de se déployer sous une autre forme d'énergie si nous les mangeons.



En physique, on a l'habitude de regrouper ce qui est microscopique d'un côté, et macroscopique de l'autre.

Ainsi, l'énergie macroscopique totale (cinétique et potentielle) est appelée énergie mécanique E_m .

Et l'énergie microscopique totale (cinétique et potentielle) est appelée énergie interne U .

L'énergie totale d'un objet et donc la somme de son énergie mécanique et de son énergie interne :

$$E_{\text{tot}} = U + E_m$$

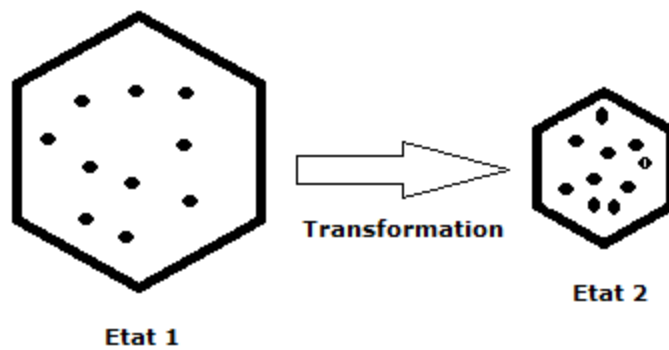
II. Comment varie l'énergie interne d'un système

1. Variation d'énergie interne d'un système

La variation d'énergie totale d'un système est la somme de la variation de son énergie interne et de la variation de son énergie mécanique.

$$\Delta E_{\text{tot}} = \Delta U + \Delta E_m$$

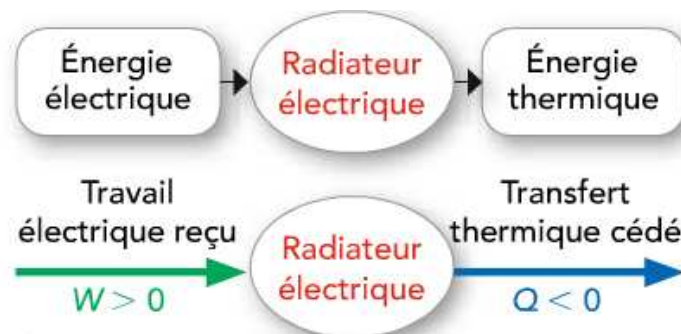
Considérons un système qui subit une transformation entre deux états d'équilibre :



La variation d'énergie interne du système est la conséquence d'échanges d'énergie avec le milieu extérieur. Ces échanges peuvent se faire par travail W (travail électrique, travail des forces de pression...) ou par transfert thermique Q

$$\Delta U = W + Q$$

Par convention, le travail et le transfert thermique sont comptés positivement s'ils sont reçus par le système et négativement s'ils sont cédés par le système.



Doc. 4 Un radiateur électrique convertit de l'énergie électrique en énergie thermique. Pour cela, il reçoit un travail électrique $W > 0$ et cède un transfert thermique $Q < 0$.

2. capacité thermique

Un matériau peut stocker de l'énergie sous forme d'énergie interne U et restituer ensuite cette énergie. Cette capacité dépend de sa structure microscopique.

La capacité thermique C d'un corps caractérise sa capacité à stocker ou à céder de l'énergie interne sous forme cinétique. Lorsque le corps est condensé (c'est-à-dire solide ou liquide) elle correspond à l'énergie thermique que doit recevoir ce corps pour augmenter sa température de 1°C . Elle dépend du corps, de son état physique, de sa masse

En l'absence de changement d'état ou de transformation chimique, la variation d'énergie interne ΔU d'un corps condensé est proportionnelle à la variation de la température ΔT

$$\Delta U = C \cdot \Delta T \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta U : \text{variation d'énergie interne du corps, en joule (J)} \\ \Delta T = T_f - T_i : \text{variation de température du corps e, degré Celsius (}^\circ\text{C)} \\ C : \text{capacité thermique du corps, en Joule par degrés Celsius (J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$

3. Capacité thermique massique

La capacité thermique C d'un corps est proportionnelle à sa masse m :

$$C = m \cdot c \quad \left\{ \begin{array}{l} C : \text{capacité thermique du corps (J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \\ m : \text{masse du corps (kg)} \\ c : \text{capacité thermique massique du corps (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$

Pour un corps condensé ne subissant ni changement d'état ni transformation chimique, on a donc la relation : $\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T$

Remarque :

Pour une même différence de température et une même masse, la variation d'énergie interne ΔU est d'autant plus grande que c est grand.

L'eau liquide à une forte capacité thermique en raison de la présence de liaisons hydrogène qui réduisent les mouvements microscopiques des molécules

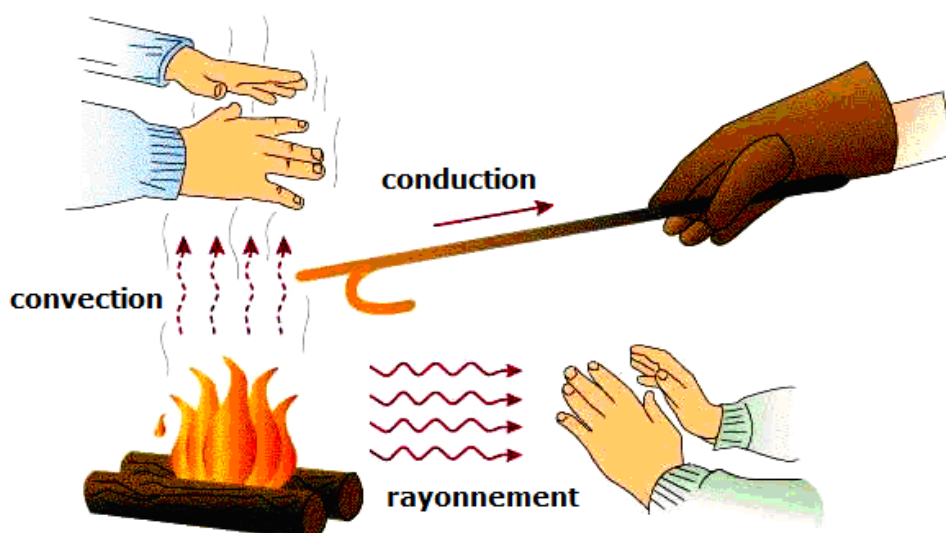
Substance	c (en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
eau liquide	$4,2 \times 10^3$
huile	$2,0 \times 10^3$
eau solide	$2,1 \times 10^3$
aluminium	$9,0 \times 10^2$
fer	$4,7 \times 10^2$
cuivre	$3,9 \times 10^2$
brique	$8,4 \times 10^2$
marbre	$8,6 \times 10^2$
bois de chêne	$2,4 \times 10^3$

III. Comment s'effectuent les transferts thermiques

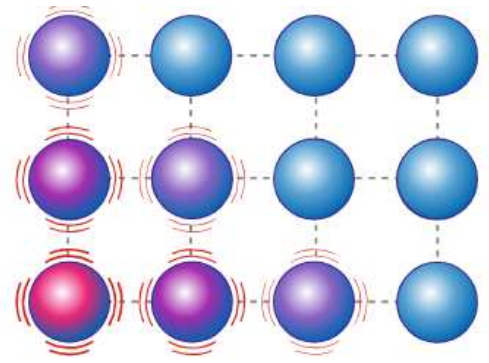
1. Différents mode de transfert thermique

Ce qu'on appelle couramment la chaleur est un transfert d'énergie thermique entre deux corps ; elle caractérise donc un échange entre 2 systèmes.

L'échange de chaleur peut s'effectuer de trois façons :

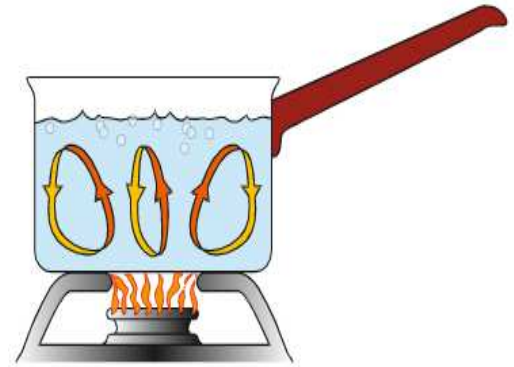


- **Par conduction.** Il s'agit d'un **transfert thermique par contact, sans transport de matière** : d'un point de vu microscopique, les constituants du matériau conducteur communiquent à leur voisin leur agitation thermique par collision mais sans déplacement d'ensemble de la matière : il y a propagation de proche en proche de l'agitation des particules.



Ce mode de transfert **nécessite un milieu matériel**
La conduction se produit **principalement dans les solides**

- **Par convection.** Il s'agit d'un **transfert thermique par déplacement de matière**. Il se produit **dans les fluides** (corps liquide ou gazeux) lorsque la température n'est pas homogène. La zone chaude, moins dense que la zone froide s'élève et laisse la place à du fluide plus froid : il y a déplacement de particules au sein du fluide.



Ce mode de transfert **nécessite un milieu matériel.**

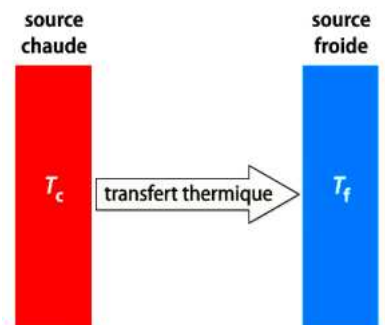
- **Par rayonnement** : Il s'agit d'un **transfert thermique à distance**. L'énergie est transportée par les ondes électromagnétiques et l'absorption ou l'émission de rayonnement par un corps modifie l'agitation thermique de celui-ci
Ce mode de transfert **ne nécessite pas de milieu matériel**, car les ondes électromagnétiques peuvent se déplacer dans le vide

2. Flux thermique dans la matière

• Sens du transfert thermique

L'énergie thermique ne se transmet spontanément que dans un sens : du système de plus haute température T_c , appelé source chaude, vers le système de plus basse température T_f , appelé source froide

Un transfert thermique est un transfert d'énergie qui est irréversible



Une transformation est qualifiée d'irréversible si elle ne peut pas repasser naturellement de l'état final à l'état initial, par exemple un café chaud laissé dans sa tasse va transférer son énergie thermique au milieu environnant et donc se refroidir de façon irréversible.

• Flux thermique

Le transfert thermique peut se faire plus ou moins rapidement. Pour évaluer cette vitesse de transfert, on crée une nouvelle grandeur qu'on appelle le flux thermique.

Le flux thermique Φ correspond à l'énergie transférée par unité de temps.

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Φ : flux thermique ($J \cdot s^{-1}$ équivalent aux Watts)
 Q : énergie thermique transférée (J)
 Δt : durée du transfert (s)

Le flux thermique traduit la vitesse du transfert thermique, il s'agit donc d'une puissance, exprimée en Watt (W), on parle d'ailleurs de puissance thermique

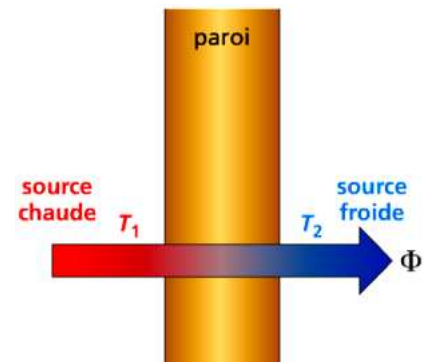
Exemple :

Une habitation est bien isolée si les matériaux qui la constituent assurent un faible flux thermique, permettant ainsi de ralentir les transferts thermiques avec l'extérieur

- **Notion de résistance thermique**

Quand on coupe le chauffage d'une habitation en hivers, sa température va baisser d'autant plus rapidement que l'amplitude de température entre l'intérieur et l'extérieur est importante et que les murs sont mal isolés.

Le flux thermique qui traduit la vitesse de transfert thermique à travers une paroi dépend donc du matériau utilisé et de la différence de température ΔT entre les deux faces de la paroi.



Le flux thermique traversant une paroi par conduction a pour expression :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi : \text{flux thermique (J.s}^{-1} \text{ équivalent aux Watts)} \\ \Delta T : \text{différence de température entre les deux face de la paroi (K ou } ^\circ\text{C)} \\ R_{th} : \text{résistance thermique de la paroi (K.W}^{-1} \text{ ou } ^\circ\text{C.W}^{-1}) \end{array} \right.$$

Pour une même différence de température entre deux faces d'une même paroi, plus la résistance thermique de la paroi est grande et plus le flux thermique est faible. Une paroi de grande résistance thermique est un bon isolant.

IV. Comment établir un bilan énergétique ?

1. Principe de conservation de l'énergie

L'énergie totale ne peut ni être créée ni détruite. Si un système perd ou gagne de l'énergie, cette énergie est obligatoirement cédée ou prise à un autre système. Elle peut cependant être convertie d'une forme à une autre.

Remarque :

Un système est dit isolé s'il n'effectue pas de transfert avec le milieu extérieur. L'énergie totale d'un système isolé se conserve.

Dans l'absolu, on ne peut pas mesurer l'énergie totale d'un système : seules les variations d'énergie sont mesurables.

La variation de l'énergie totale d'un système au repos au cours d'une évolution est égale à la somme des travaux W et des transferts thermiques Q échangés avec le milieu extérieur.

$$\begin{aligned} \Delta E_{tot} &= \Delta U + \Delta E_m \\ &= \Delta U + 0 \text{ (car le système est au repos)} \\ &= Q + W \end{aligned}$$

2. Bilan énergétique et rendement

Pour établir un bilan énergétique, il faut :

- définir le système macroscopique étudié
- relever la nature des transferts énergétiques (par travail ou par transfert thermique) entre ce système et le milieu extérieur
- repérer le sens de ces transferts et leur attribuer un signe positif si le système reçoit de l'énergie ou négatif s'il en perd.

Lorsque l'étude porte sur un convertisseur d'énergie, le bilan est conclu par un calcul de rendement :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{énergie utile transférée}}{\text{énergie totale reçue par le convertisseur}}$$

Ce rendement est souvent exprimé en pourcentage

Application

Comment effectuer un bilan énergétique sur un chauffage solaire ?

L'eau circulant dans le circuit primaire d'un chauffe-eau solaire utilise la puissance solaire reçue, valant $2,2 \cdot 10^3 \text{ W}$, pour chauffer les 200 L d'eau d'un ballon (Fig. 9).

En une heure, l'eau du ballon passe de $T_1 = 15 \text{ °C}$ à $T_2 = 22 \text{ °C}$. Déterminer le rendement du chauffe-eau.

La capacité thermique de l'eau est $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Le système étudié est l'eau du circuit primaire.

Le rayonnement solaire reçu par le capteur chauffe cette eau qui à son tour chauffe l'eau dans le ballon. (Fig. 10)

Le système reçoit en une heure une énergie :

$$E_{\text{reçue}} = 2,2 \cdot 10^3 \times 3600 = 7,9 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Il cède à l'eau du ballon l'énergie Q , égale à l'augmentation de l'énergie interne de l'eau du ballon, de masse $m = 200 \text{ kg}$:

$$Q = mc(T_2 - T_1) = 200 \times 4,2 \cdot 10^3 \times (22 - 15) = 6,7 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Le rendement du chauffe-eau est ainsi :

$$r = \frac{Q}{E_{\text{reçue}}} = \frac{6,7 \cdot 10^6}{7,9 \cdot 10^6} = 0,85$$

L'énergie perdue (15 %) est transférée à l'environnement (tuyaux mal isolés par exemple).

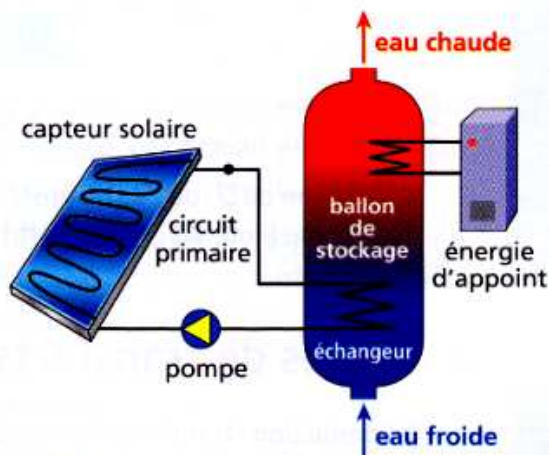


Fig. 9 Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.

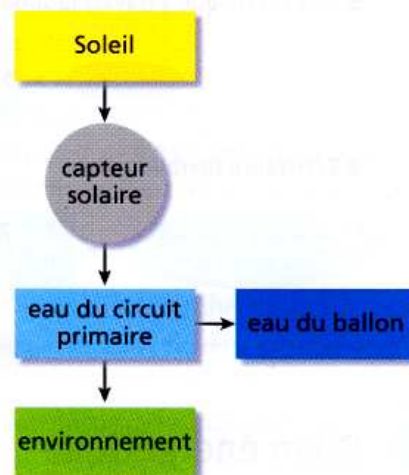


Fig. 10 Chaîne énergétique d'un chauffe-eau solaire.