

Thème 3 : L'énergie : Conversions et transferts

Chapitre 18 : premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie

1. Energie interne d'un système

Activité 1 : Energie interne

1.1. Système macroscopique

Définition : Un système macroscopique est

Il faut toujours définir le système que l'on étudie.

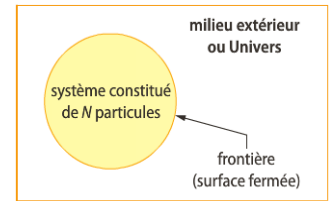


Fig. 1 Notion de système.

1.2. Energie interne

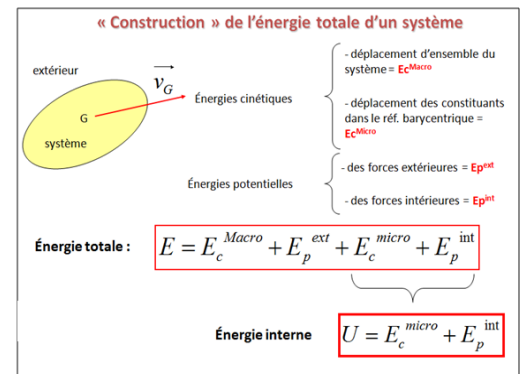
L'énergie d'un système se décompose en :

- Energies microscopiques

- ✓ énergies cinétiques des particules composant le système, qui sont en mouvement du fait de leur agitation thermique,
- ✓ énergies potentielles d'interactions électromagnétiques entre atomes (liaisons au sein des molécules), entre ions (cohésion d'un cristal ionique) ou entre molécules (liaisons hydrogène)

- Energies macroscopiques

- ✓ énergie cinétique du système s'il est en mouvement,
- ✓ énergies potentielles du système en interaction avec son environnement.



Définition : L'énergie interne d'un système, notée U, en joules (J),

1.3. Variation d'énergie interne pour un système :

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.

Définition :

La capacité thermique C

Système	Capacité thermique C (J·K ⁻¹)
1 kg d'eau liquide	4185
1 kg d'aluminium solide	897
1 kg d'huile	environ 2 000

Définition :

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 :

ΔU : variation d'énergie interne du corps, en Joule (J)
 ΔT : variation de température du corps, en degré Celsius (°C)
C : capacité thermique du corps (J·°C⁻¹)

13 Capacités thermiques de différents systèmes.

$$\Delta U = U_{\text{finale}} - U_{\text{initiale}} ; \text{ de même } \Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}$$

Remarque :

1. U.S.I. : ΔU en J, T en K et C en J·K⁻¹
2. Comme il s'agit d'une variation de température, on peut raisonner directement sur des températures en degré Celsius. $T(K) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$
3. La capacité thermique d'un corps est proportionnelle à sa masse m :



C : capacité thermique du corps (J·°C)
m : masse du corps (kg)
c : capacité thermique massique du corps (J·kg⁻¹·°C⁻¹)

Chapitre 18 : premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie

Exemples :

1. On place une pièce de 20 centimes d'euro à température ambiante (à 20°C) dans une casserole d'eau maintenue en ébullition (à 100°C).
Calculer la variation d'énergie interne de cette pièce, de capacité thermique $C = 2,12 \text{ J.K}^{-1}$.
2. Un bain-marie utilisé en chimie contient 1,7 L d'eau initialement à une température $T_1 = 20^\circ\text{C}$. Au bout de quelques minutes, la résistance chauffante du bain-marie permet d'obtenir ce même volume d'eau à une température $T_2 = 64^\circ\text{C}$.
Calculer la variation de l'énergie interne de ce volume d'eau.
Données : $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $\rho_{\text{eau}} = 1,00 \text{ kg.L}^{-1}$.

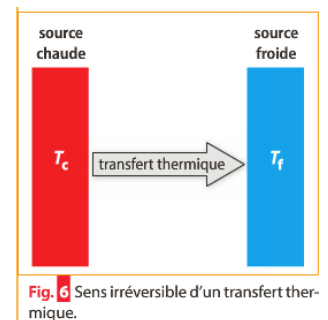
Exercices : 13 p 372 (corrigé dans le livre), 12 p 372 (corrigé dans le livre)

2. Transferts thermiques et modes de transfert

On appelle **transfert thermique**,

Un transfert thermique entre deux corps se produit,

Le transfert thermique



Interprétation à l'échelle microscopique des transferts thermiques dans la matière

Trois modes possibles de transfert thermiques existent :

- **la conduction**, seul mode de transfert dans les solides :

les entités microscopiques constituant le système sont très proches les unes des autres ; d'une zone chaude vers une zone plus froide du système, l'agitation thermique se propage de proche en proche, sans transport de matière

- **la convection**, mode de transfert rencontré dans les fluides (liquides ou gaz) :

Il implique un déplacement d'ensemble des entités microscopiques sous forme de courants de convection (ces courants sont dus à une densité des zones froides supérieure à celle des zones chaudes)

- **le rayonnement** :

l'absorption ou l'émission de rayonnement par le système modifie l'agitation thermique. Ce mode de transfert peut s'effectuer dans le vide puisque l'énergie absorbée ou émise est transportée par des ondes électromagnétiques qui peuvent se propager dans le vide.

Exercices : 17 p 372 (corrigé dans le livre)

Chapitre 18 : premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie

3. Flux thermique et résistance thermique

Un **transfert thermique noté Q** n'est pas instantané et s'effectue donc pendant une durée notée Δt .
La vitesse de ce transfert thermique est alors donnée par le flux thermique Φ :



Unités S.I. : Q en J, Δt en s et Φ en W

(le flux est homogène à une puissance, c'est-à-dire à une énergie sur un temps)

Flux thermique à travers une paroi plane

Considérons un **transfert thermique Q** par conduction, à travers une paroi plane d'épaisseur e et de surface S .

Ce transfert thermique, irréversible, s'effectue de la face 1 la plus chaude (température T_1) de la paroi vers la face 2 la plus froide ($T_1 > T_2$) de la paroi ($T_1 > T_2$).

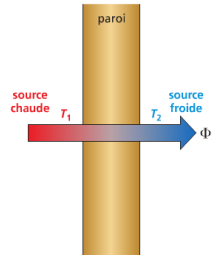
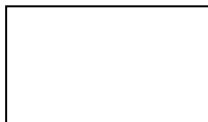


Fig. 7 Transfert thermique à travers une paroi.

Quand les températures T_1 et T_2 restent constantes au cours du temps, l'expression du flux thermique s'écrit :



où R_{th} est la résistance thermique de la paroi

Unités : Φ en W, T en K (ou en $^{\circ}C$) et R_{th} en $K \cdot W^{-1}$ (ou en $^{\circ}C \cdot W^{-1}$)

La résistance thermique de la paroi, R_{th} , dépend :

- de son épaisseur e
- de la surface S traversée par le flux thermique
- du matériau constitutif de la paroi

Exercices : 19 p 373, 20 p 373

4. Premier principe de la thermodynamique

On considère que le système est au repos à l'échelle macroscopique (énergie mécanique macroscopique constante) et qu'il est fermé autrement dit qu'il n'échange pas de matière avec l'extérieur.

La variation d'énergie totale d'un **système au repos à l'échelle macroscopique** est égale à sa variation d'énergie interne : **$\Delta E_{tot} = \Delta U$**

Enoncé du premier principe de la thermodynamique :

La variation d'énergie interne d'un système fermé au repos est égale :

- W : énergie échangée avec l'extérieur sous forme de travail (J)
- Q : énergie échangée avec l'extérieur sous forme de transfert thermique (J)
- ΔU : variation d'énergie interne du système (J)

IMPORTANT : les transferts thermiques **Q** et les travaux **W** sont des **grandeurs algébriques** :

- **positives** si le système **reçoit** de l'énergie
- **négatives** si le système **perd** de l'énergie

Remarque :

- Le 1^{er} principe de la thermodynamique sert à effectuer l'étude thermique ou le bilan thermique.
- Quand les transferts d'énergie conduisent à une augmentation d'énergie du système, on a $\Delta U > 0$.
- Pour un système incompressible, au sein duquel a lieu une transformation thermodynamique sans travail ($W = 0J$), le premier principe nous donne :

Thème 3 : L'énergie : Conversions et transferts

Chapitre 18 : premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie

Exemples :

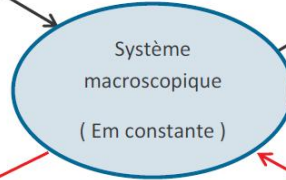
1) $\Delta U = \Delta W + \Delta Q = W_1 + W_2 + Q_1 + Q_2$

Transfert thermique
reçu

$Q_1 > 0$

Transfert thermique
cédé

$Q_2 < 0$

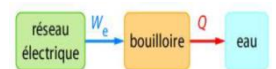


Travail cédé

$W_1 < 0$

$W_2 > 0$

Travail reçu



2) Si le système étudié est la bouilloire.

W_e correspond à l'énergie reçue du réseau électrique par la bouilloire et Q l'énergie fournie à l'eau par celle-ci.

Ici $W_e > 0$ et $Q < 0$

Exercice : Piscine chauffée

De nombreux dispositifs existent pour chauffer l'eau des piscines l'hiver. Parmi les plus performants et économiques à l'usage figure le chauffage par pompe à chaleur (PAC). La pompe à chaleur est une machine thermique ditherme qui fonctionne entre une source de température variable au cours du temps et une source de température constante, en recevant de l'énergie électrique. Pendant le chauffage, la piscine est équipée d'un couvre-piscine qui rend négligeable les échanges thermiques entre l'eau et l'air extérieur.

Donnée. Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

1. On étudie le fonctionnement de la PAC d'une piscine à l'extérieur pendant l'hiver. La température de l'air extérieur où est placée la PAC est de 10°C . Avant chauffage, la température initiale de l'eau vaut 10°C .

Identifier ce qui sera la source froide et ce qui sera la source chaude lors du fonctionnement de la PAC.

2. Représenter un diagramme énergétique faisant apparaître le système {PAC} et les transferts énergétiques Q_f et Q_c dont ce système est le siège.

3. Que se passe-t-il au niveau microscopique pour l'eau pendant le fonctionnement de la PAC ?

4. La piscine contient une masse $m_{\text{eau}} = 10,0$ tonnes d'eau.

a. Calculer la variation d'énergie interne de l'eau quand la température de l'eau a atteint 27°C .

b. En déduire la valeur de Q_c , transfert thermique fourni par la PAC à la source chaude.

5. a. La PAC fonctionne comme une machine cyclique. Établir le bilan énergétique du système {PAC}.

b. La PAC a reçu un transfert thermique $Q_f = 4,7 \times 10^8 \text{ J}$ de la source froide. En déduire la valeur de l'énergie électrique W_e reçue.

6. a. L'efficacité ε de la PAC est définie par la valeur absolue du rapport de l'énergie utile sur l'investissement requis. Déterminer l'efficacité ε de la PAC.

b. Quelle énergie électrique W_e' aurait dû fournir une série de résistances chauffantes pour obtenir la même température ?

c. La PAC est-elle un dispositif de chauffage performant ?

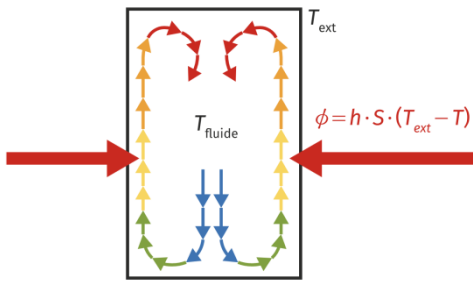
➤ Coups de pousse

1. Choisir les sources selon leur température finale.
2. Indiquer le sens des transferts par rapport au système.
3. La température de l'eau varie.
4. a. $1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$; $1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$.
b. Q_c est défini par rapport au système {PAC} et non par rapport à l'eau.
5. a. Pour une machine cyclique, $\Delta U = 0$.
b. Le travail reçu par le système doit être positif.
6. a. L'efficacité peut être supérieure à 1, ce n'est pas un rendement.
b. Reprendre le bilan d'énergie sans source froide : $W_e' + Q_c = 0$.

Chapitre 18 : premier principe de la thermodynamique et bilan d'énergie

5. Loi phénoménologique de Newton

5.1. Bilan d'énergie (Voir Tp18 : transfert thermique)



Lorsqu'un système incompressible de température T échange uniquement de l'énergie avec une paroi thermostatée à une température T_{ext} , le premier principe de la thermodynamique s'écrit :

Or

On a donc soit (1)

On a déjà vu que (2) avec m la masse du fluide et c sa capacité thermique massique.

Si on ne tient compte que du transfert conducto-convectif, le flux thermique s'exprime selon la loi de Newton :

Lorsqu'un fluide est au contact d'une paroi fine thermostatée, le flux thermique conducto-convectif s'exprime en fonction de l'écart entre la température du système T et celle de la paroi.

h : coefficient de transfert thermique, dit coefficient de Newton ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
 S : surface d'échange entre le système et la paroi (m^2)

(1) et (2) donne

En remplaçant Φ , on obtient :

Pour des petites variations du temps, cela donne :

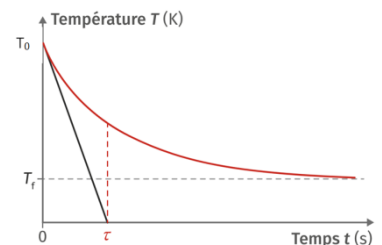
Cette équation est une équation différentielle. La variation de température d'un système au cours du temps est proportionnelle à la différence de température entre le système et le thermostat.

5.2. Résolution de l'équation différentielle :

Elle peut s'écrire sous la forme :

Avec et se nomme

La solution de cette équation différentielle a pour expression :

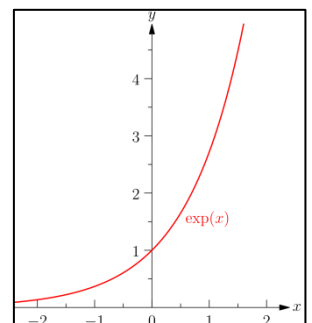


L'évolution de la température se traduit par une fonction exponentielle décroissante qui tend vers la température du thermostat T_{ext}

Démonstration :

La loi de Newton est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec second membre constant du type : $y' + a \cdot y = b$

Elle admet une solution du type : $y(t) = A \cdot e^{-a \cdot t} + B$



On en déduit donc pour notre situation que : $T(t) = A \cdot e^{-t/\tau} + B$

Détermination de A et B avec les conditions finale et initiale :

- quand $t \rightarrow +\infty$, $-t/\tau \rightarrow -\infty$, on a $e^{-t/\tau} \rightarrow 0$ donc $T(+\infty) = T_{\text{ext}}$ (l'équilibre est atteint) soit $B = T_{\text{ext}}$
- quand $t \rightarrow 0$, on a $e^{-t/\tau} \rightarrow 1$ donc $T(0) = T_0 = A + B$ soit $A = T_0 - B = T_0 - T_{\text{ext}}$

D'où la nouvelle expression de la solution : $T(t) = (T_0 - T_{\text{ext}}) \cdot e^{-t/\tau} + T_{\text{ext}}$

Exercice :

La gourde du randonneur : du passé au présent

I Exploiter des informations ; effectuer des calculs ; discuter un modèle.

Avant l'arrivée des bouteilles isothermes en acier, les gourdes étaient souvent de simples bouteilles en aluminium anodisé. Un randonneur remplit une telle gourde, de masse $m_1 = 172$ g, d'une boisson chaude de masse $m_2 = 750$ g à la température $\theta_i = 50$ °C. La température de l'air extérieur est $\theta_e = 5$ °C, supposée constante : l'air extérieur est un thermostat. On considère le système {boisson et gourde} comme un système incompressible de température uniforme, de surface $S = 4,0 \times 10^{-2}$ m². Par conduction thermique, la surface externe de la gourde atteint très rapidement la température initiale de la boisson sans prélèvement d'énergie.



1. Identifier le fluide qui échange de l'énergie par convection avec le système, puis effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour ce système.
2. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température θ du système.
3. Résoudre cette équation différentielle et montrer que l'évolution de la température au cours du temps est donnée par la relation : $\theta = (\theta_i - \theta_e) \times e^{-\frac{h \times S}{(m_1 + m_2) \times c} \times t} + \theta_e$, avec t en seconde et θ en degré Celsius
4. En ne considérant que le seul transfert thermique par convection, calculer la température de la boisson dans la bouteille au bout de 2 heures, le flux étant supposé constant. Conclure.
5. Les gourdes isothermes actuelles, en acier, peuvent désormais maintenir les boissons chaudes pendant 12 heures dans des conditions hivernales. Ce type de gourde comporte une double enveloppe d'acier comprenant une épaisseur vide d'air. Expliquer pourquoi il est possible de maintenir ainsi la température d'une boisson chaude au cours d'une durée si importante.

Données

- Loi de Newton : $\Phi = h \times S \times (\theta_e - \theta)$ avec Φ le flux convectif entre le milieu extérieur et le système, et h le coefficient d'échange convectif dans l'air ($h = 10$ W · m⁻² · °C⁻¹).
- Capacité thermique massique du système étudié : $c = 3,6 \times 10^3$ J · kg⁻¹ · °C⁻¹.
- On néglige tout transfert thermique autre que convectif.