Ch. 11 : Système thermodynamique

1. Energie interne d'un système
2. Premier principe de la thermodynamique
3. Modes de transfert d'énergie

1. Energie interne d'un système

1.1. Définitions

La matière est constituée d'un nombre trop grand d'entités (atomes, molécules, ions) pour que l'on puisse appliquer les lois de la physique classique à l'échelle microscopique. On est donc obligé de décrire le comportement collectif d'un grand nombre d'entités à l'aide de grandeurs physiques MACROSCOPIQUES, mesurables à l'échelle humaine, telles que la pression ou la température.

La constante d'Avogadro $\mathcal{N}_A$ permet de faire le lien entre le MICROSCOPIQUE et le MACROSCOPIQUE. La *mole* est une unité de quantité de matière qui contient autant d'entités qu'il y a d'atomes dans 12 g de carbone 12, soit $\mathcal{N}_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ atomes.

Un système macroscopique est une portion d'espace limitée par une surface, contenant un grand nombre d'entités assimilées à des points matériels.

L'énergie totale E_{TOT} d'un système physique (par exemple une pomme) se décompose en :

- Energies microscopiques U
  - Les énergies cinétiques des particules composant le système qui sont en mouvement du fait de leur agitation thermique liée à la température.
  - Les énergies potentielles d'interaction entre atomes, ions, molécules…
- Energies macroscopiques E_m
  - L'énergie cinétique du système s'il est en mouvement (la pomme tombe par exemple)
  - Les énergies potentielles (de pesanteur, électrique, élastique)

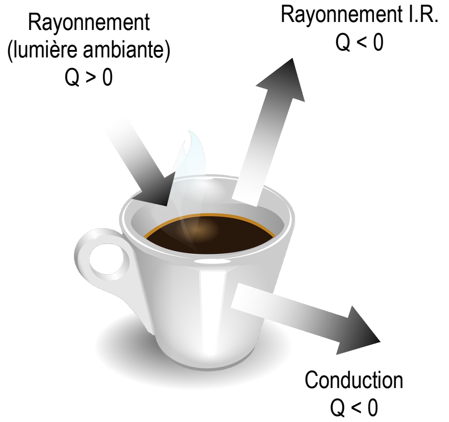
A retenir :

L'ENERGIE INTERNE notée U d'un système est la grandeur macroscopique définie comme la somme des énergies cinétiques et potentielles MICROSCOPIQUES des entités constituants le système.

Ainsi, l'énergie totale d'un système physique est égale à :

$$\boxed{E_{TOT} = E_m + U}$$

E_m ou énergie mécanique en J
U ou énergie interne en J

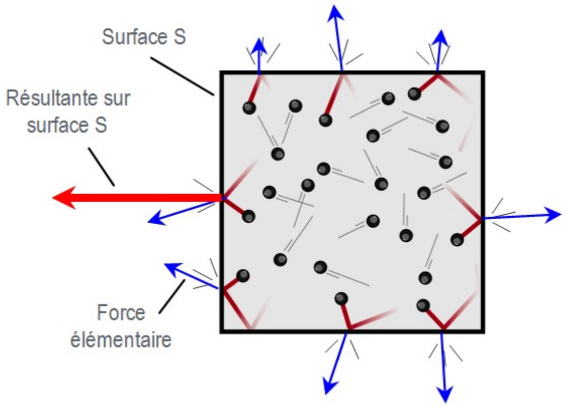


A noter :

- On ne mesure que la variation ΔU de l'énergie interne, entre un état initial et un état final.
- Cette variation est la conséquence d'échanges d'énergie du système avec l'extérieur, sous forme de travail W ou par transfert thermique Q.
- Dans le cas où le système étudié n'interagit pas avec son environnement (système isolé), son énergie interne reste constante : $\Delta U = 0\ J$
- Par convention, W et Q sont POSITIFS s'ils sont reçus par le système et NEGATIFS s'ils sont cédés par le système.

1.2. Agitation thermique et pression

La pression exercée par un fluide dans une enceinte est due aux chocs des particules constituant ce fluide avec les parois. Chaque particule qui percute une surface engendre sur elle une force dite élémentaire.
La fréquence de ces chocs et leur intensité augmentent en fonction de l'agitation thermique du gaz dans l'enceinte, et donc de sa température : si $T\nearrow$ alors $P\nearrow$



A retenir :

En additionnant toutes les forces élémentaires s'exerçant simultanément sur une surface S, on obtient une résultante F perpendiculaire à cette surface.
La pression P exercée par le fluide sur la surface est donnée par la relation :

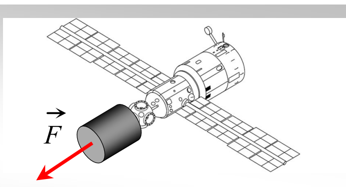
$$\boxed{P = \frac{F}{S}}$$

P en Pa (pascals)
F en N
S en m^2

A noter :

- La vitesse moyenne des molécules d'air lors des chocs avec une surface à température ambiante est d'environ 1500 km/h.
- 101 300 Pa = 1 013 hPa = 1,000 atm
- 100 000 Pa = 10^5 Pa = 1 bar

Exercice 1 :



Soit un module cylindrique d'une station orbitale évoluant dans le vide supposé parfait de l'espace.

1. Calculer la quantité d'air à placer dans ce module de longueur L = 5,0 m et de rayon R =1,8 m pour qu'il y règne une pression de 0,80 atmosphère avec une température de 18°C.
2. Calculer la force F que subit la paroi circulaire du module du fait de l'air qui y est emprisonné.

2. Premier principe de la Thermodynamique

2.1. Energie interne d'un système incompressible

On considère un système solide ou liquide qui n'échange de l'énergie que par transfert thermique sans changer d'état physique.
Lorsqu'un corps de masse m, liquide ou solide, passe d'une température initiale T_I à une température finale T_F, sa variation d'énergie interne ΔU a pour expression :

$$\Delta U = m \cdot c \cdot (T_F - T_I)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\boxed{\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\boxed{\Delta U = C \cdot \Delta T}$$

ΔU en J
ΔT en kelvins K ou degrés celsius °C
m en kg
c en $J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}$ ou en $J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}°C^{-1}$
C en $J{\cdot}K^{-1}$ ou en $J{\cdot}°C^{-1}$

A noter :

- La grandeur c est appelée « capacité thermique massique » du solide ou du liquide en question. Elle représente l'énergie qu'il faut fournir pour augmenter de 1 K la température d'un kilogramme de ce solide ou liquide.
- La grandeur C est appelée « capacité thermique » du système de masse m. Elle est définit telle que : $\boxed{C = m \times c}$

Exemples de capacités thermiques :

Matériau	Eau	Cuivre	Ethanol	Brique	Verre	Aluminium
c ($J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}$)	4180	385	2430	840	720	897

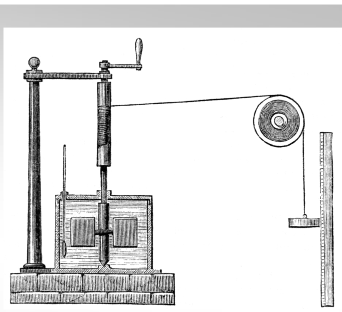
Exercice 2 :

1. Quelle énergie faut-il fournir à 1,0 kg d'eau pour élever sa température de 2,0°C ?
2. Calculer la variation d'énergie interne de 150 L d'eau chauffés de 15°C à 65°C.
3. Calculer la température finale d'un morceau de cuivre de 500 g à 312 K recevant une énergie de 10 000 J.
4. Calculer la capacité thermique d'un bloc d'aluminium de dimension 20 × 15 × 50 cm sachant que ρ_{Al} = 2,7 kg/L.

2.2. Enoncé du principe

Lorsqu'un système thermodynamique immobile échange de l'énergie thermique Q et/ou du travail W avec l'extérieur, son énergie interne U varie selon l'équation : $\boxed{\Delta U = W + Q}$

Exercice 3 :



L'appareil de Joule (figure ci-contre) est un dispositif qui chauffe légèrement de l'eau contenue dans une cuve en utilisant l'énergie libérée par une masse m qui chute d'une hauteur h.

1. Déterminer le travail produit par une masse m de 4,5 kg chutant d'une hauteur de 90 cm.
2. D'après le schéma ci-contre, décrire la manière dont l'énergie produite par ce travail est transférée à l'eau de la cuve.
3. Déterminer la température finale des 20 L d'eau à l'intérieur de la cuve sachant qu'au départ, l'eau était à 22,370 °C. Conclure.

Exercice 4 :

On plonge un morceau de cuivre de masse m_{Cu} = 2,5 kg à T_{Cu} = 350 K dans un volume de 10,0 L d'eau pure initialement à la température de θ_i = 12,0 °C. Le système {eau + cuivre} est supposé adiabatique dès l'introduction du morceau de cuivre dans l'eau.

1. Calculer la capacité thermique C_E de l'eau.
2. Calculer la capacité thermique C du morceau de cuivre.
3. Etablir l'égalité traduisant le transfert d'énergie du cuivre à l'eau en fonction de C_E, C, θ_i, T_{Cu} et T_F, la température finale du système.
4. Calculer T_F.

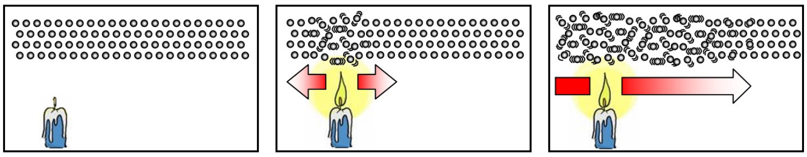
3. Modes de transfert thermique

Il existe trois différentes possibilités pour un système d'échanger de l'énergie avec l'extérieur par transfert thermique :

CONDUCTION – CONVECTION – RAYONNEMENT

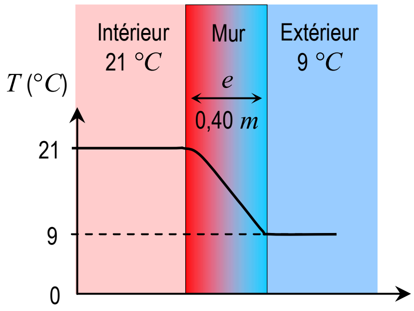
3.1. La conduction

Barre de métal — L'agitation thermique se propage



Si l'on chauffe localement de la matière, on agite alors les atomes qui la constituent. C'est l'agitation thermique.
Les atomes agités vont transmettre de proche en proche leur agitation aux atomes voisins : c'est le phénomène de conduction thermique.
Cette agitation est diffusée à partir de la partie chauffée du métal. Comme les atomes sont plus agités lorsqu'on les chauffe, ils ont besoin de plus de place : la matière se dilate.

Gradient de température dans un mur :



Le flux thermique (ou puissance) Φ à travers une surface est la puissance thermique qui la traverse. Ce flux évalue la vitesse du transfert thermique Q pendant une durée Δt.
Il va spontanément de la source chaude vers la source froide et est IRREVERSIBLE :

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

Φ en W (watts)
Δt en s
Q en J

Exemple :

Un mur laisse passer en une heure une energie de $1{,}73{\cdot}10^{5}$ J. Le flux thermique correspondant est :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{1{,}73\cdot 10^5}{3600} = 48{,}1\ W$$

La résistance thermique d'un corps traduit sa capacité à s'opposer au transfert thermique.
Pour une paroi plane dont les deux faces sont aux températures T_1 (intérieur) et T_2 (extérieur) avec $T_1 > T_2$, traversée par un flux thermique Φ, la résistance thermique R est définie par :

$$\boxed{R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi}}$$

Φ en W (watts)
T en K ou $°C$
R_{th} en $K{\cdot}W^{-1}$

Pour une paroi plane, la résistance dépend de :

- son épaisseur e
- sa surface S
- sa constitution caractérisée par une conductivité thermique notée λ

Ainsi, la résistance thermique R_{th} est aussi définie par la relation :

$$\boxed{R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}}$$

e en m
S en m^2
λ en $W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}$
R_{th} en $K{\cdot}W^{-1}$

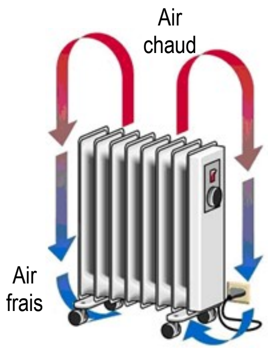
Matériau	λ $(W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1})$
Air	0,026
Polystyrène	0,036
Bois	0,16
Béton	0,92
Verre	1,2
Acier	46
Aluminium	250
Cuivre	390

Exemples de conductivités

A noter :

Lorsque plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique équivalente est égale à la somme des résistances thermiques.

> ***Exercice 5 :***
>
> Dans cet exercice, on considèrera le mur d'épaisseur e = 40 cm décrit plus haut.
>
> 1. Retrouver la dimension de la conductivité thermique.
> 2. Déterminer l'expression de la conductivité thermique en fonction de Φ, e, S, T_1 et T_2.
> 3. En déduire la nature de la matière composant le mur de surface 10 m^2.
> 4. Déterminer la nouvelle résistance thermique de ce mur si l'on y accole 10 cm de polystyrène.
> 5. En déduire la nouvelle valeur Φ' du flux thermique de ce mur isolé. Conclure.

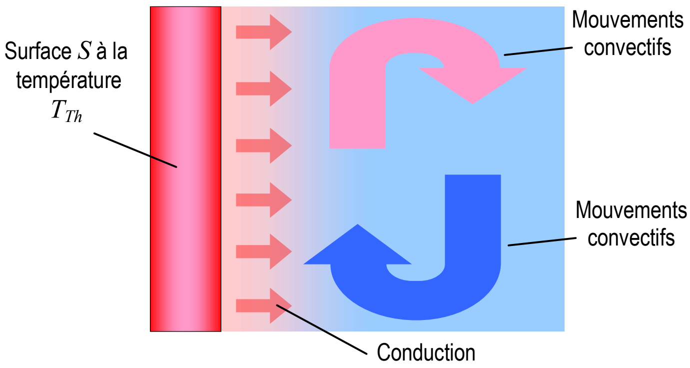


Mouvements de convection

3.2. La convection

La convection est un transfert porté par un mouvement de matière. Elle ne se produit que dans des fluides (fluide = tout ce qui n'est pas solide). Le fluide chauffé, et donc dilaté, s'élève à la verticale de la source de chaleur créant alors un appel de fluide à la base de la source chaude. Le fluide est ainsi brassé. Contrairement à la conduction, il y a un déplacement macroscopique de matière.

Lors d'un transfert par convection, une partie de la chaleur est inévitablement aussi transmise par conduction. On parle alors de transfert conducto-convectif.



Le transfert conducto-convectif est modélisé par la *loi de Newton* suivante :

$$\boxed{\Phi = h \times S \times \left(T_{Th} - T(t)\right)}$$

Φ en W (watts)
T en K ou $°C$
S en m^2
h en $W{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}$

avec h le *coefficient de transfert conducto-convectif.*

Evolution de la température du fluide :

D'après la *loi de Newton*, comme $\Phi = \dfrac{Q}{\Delta t}$ on a donc $\dfrac{Q}{\Delta t} = h \times S \times (T_{Th} - T(t))$ ❶

Pendant une durée très courte notée dt, l'énergie reçue par le fluide chauffé est :

$dU = C \times dT$, avec dT la petite élévation de température du fluide pendant la petite durée dt.

Or, d'après l'équation ❶, pendant cette durée dt, la petite quantité d'énergie donnée par le thermostat au fluide vaut : $\delta Q = h \times S \times (T_{Th} - T(t)) \times dt$

En supposant que l'énergie reçue par le fluide est strictement égale à l'énergie donnée par le thermostat, on a donc :

$$C \cdot dT = h \times S \times (T_{Th} - T(t)) \times dt \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{\frac{dT}{dt} + \frac{h \cdot S}{C} \times T(t) = \frac{h \cdot S}{C} \times T_{Th}} \quad ❷$$

L'équation ❷ est une équation différentielle du type $f'(x) + a \times f(x) = b$

Elle admet alors une solution du type : $\boxed{f(x) = A\, e^{-kx} + B}$

L'évolution de la température du fluide a donc pour expression :

$$T(t) = A \cdot e^{-kt} + B$$

On admet qu'à l'origine du temps, la température du fluide encore non chauffé est notée T_0.

Donc, à $t = 0$, on doit avoir : $T(0) = T_0 \quad \Leftrightarrow \quad T(0) = Ae^{-k\times 0} + B = T_0 \quad \Leftrightarrow \quad A + B = T_0$ ❸

En fin de chauffage (à $t = \infty$), lorsque la température du fluide a atteint la température T_{Th} du thermostat, on aura :

$T(\infty) = T_{Th} \quad \Leftrightarrow \quad T(\infty) = Ae^{-k\times\infty} + B = T_{Th} \quad \Leftrightarrow \quad B = T_{Th}$ ❹

> ***Pour aller plus loin…***
>
> Certaines grandeurs qu'on manipule en thermodynamique sont des fonctions d'état : ce sont des fonctions au sens mathématique du terme, des variables d'état (exemples : volume, température, pression, énergie interne…)
> Ces grandeurs sont caractéristiques d'un système (par exemple, une bouteille de gaz possède une énergie interne), et permettent de déterminer un équilibre thermodynamique. Pour de telles grandeurs, on utilise la notation « d » pour en dénoter une petite variation.
>
> En revanche, d'autres grandeurs en thermodynamiques ne sont PAS des fonctions d'état, mais des quantités « échangées », comme du travail W ou la chaleur Q.
> Pour ne pas les confondre avec une fonction d'état, quand ces quantités échangées sont infinitésimales on les note avec un « δ » (delta minuscule).
> Lorsque les variations sont macroscopiques, on réserve le « Δ » (delta majuscule) aux fonctions d'état et on ne met rien devant les grandeurs qui n'en sont pas.
>
> Ainsi, le premier principe de la thermodynamique s'écrira :
>
> $dU = \delta Q + \delta W$ ou $\Delta U = W + Q$

Avec les relations ❸ et ❹ on obtient : $A = T_0 - T_{Th}$

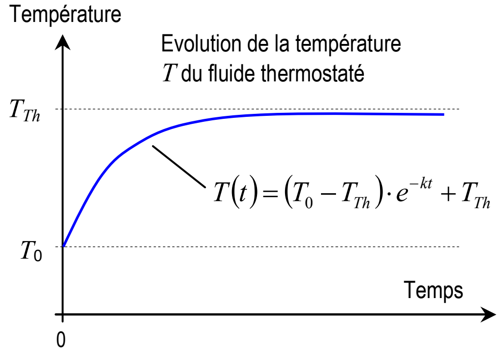
La solution de l'équation différentielle ❷ s'écrit donc : $\boxed{T(t) = (T_0 - T_{Th}) \cdot e^{-kt} + T_{Th}}$

A l'origine du temps, on a : $T(0) = (T_0 - T_{Th}) \cdot e^{-k\times 0} + T_{Th}$

$\Leftrightarrow \quad T(0) = T_0 - T_{Th} + T_{Th} = T_0$

A la fin du chauffage ($t \to \infty$) : $T(\infty) = (T_0 - T_{Th}) \cdot e^{-k\times\infty} + T_{Th}$

$\Leftrightarrow \quad T(\infty) = T_{Th}$



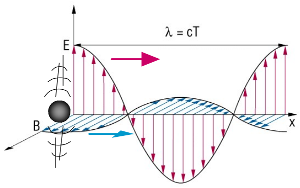
Exercice 6 : *Donnée :* La grande calorie : 1 Cal = 4180 J

Un nageur nage pendant une heure dans une piscine à θ_E = 28,3°C. La température de la surface de sa peau, supposée constante, est de θ_P = 34,2°C. Le coefficient conducto-convectif vaut dans ces conditions 10,0 $kW \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$.

1. Calculer l'énergie thermique Q cédée par le nageur à la piscine sachant que la surface de sa peau est de $19{,}0 \cdot 10^3$ cm^2.
2. La perte d'énergie due au mouvement de la nage est alors de 600 $kCal$. Déterminer l'énergie totale perdue par le nageur.

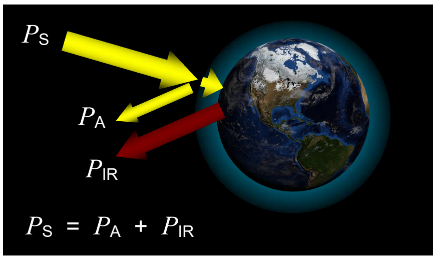
3.3. Le rayonnement

Lumière I.R.



Les particules chargées composant la matière créent autour d'elles un champ électrostatique E. Du fait de l'agitation thermique, ces particules vibrent, accompagnées de leur champ électrique. Or le mouvement du champ électrique va créer un champ magnétique qui va perturber le champ électrique. Cette perturbation du champ électrique va alors perturber le champ magnétique, etc.
C'est la naissance d'une onde électromagnétique. L'énergie perdue par la matière avec le rayonnement lui permet de se refroidir.
Ce mode de transfert est le seul à pouvoir s'effectuer dans le vide.

P_S = 340 W/m^2 puissance solaire reçue
P_A = 100 W/m^2 Albédo
P_{IR} = 240 W/m^2 Rayon IR du sol terrestre



La Terre reçoit du Soleil en moyenne une puissance P_S de 350 W/m^2. En l'absence d'atmosphère et donc d'effet de serre, elle réémettrait toute cette puissance principalement sous forme de lumière infrarouge. Et donc la puissance P_T rayonnée par la Terre serait aussi de 350 W/m^2.

D'après la *loi de Stefan-Boltzmann*, la température à la surface de la Tere serait alors de :

$\boxed{P = \sigma \cdot T^4} \quad \Leftrightarrow \quad T = \sqrt[4]{\dfrac{P}{\sigma}} = \sqrt[4]{\dfrac{340}{5{,}7 \cdot 10^{-8}}} = 280\ K$ soit 7°C environ.

L'effet de serre permet d'avoir en réalité ≈ 15 °C