

Thermodynamique

Maxime Muller

July 13, 2025

Contents

1	Thermodynamique	2
1.1	Les gaz parfaits	2
1.2	Energie d'un système thermodynamique	2
1.3	Energie interne d'un système thermodynamique	3
1.4	Mode de transfert thermique	4
1.5	Conduction thermique	5
1.6	Bilan d'énergie	6
1.7	Bilan thermique du système Terre atmosphère	6
1.8	Evolution de la température d'un système au contact d'un thermostat	7

Chapter 1

Thermodynamique

1.1 Les gaz parfaits

1.1.1 Modèle

Definition 1.1.1 (Gaz parfaits). Un gaz est constitué par des molécules ou par des atomes en mouvement incessant et désordonné. On parle de gaz parfait lorsque :

- Les entités n'ont pas d'interaction entre-elles. Elles sont donc suffisamment éloignées les unes des autres.
- Les entités sont assimilées à des points matériels (leur volume est négligeable)

1.1.2 Equation des gaz parfaits

Theorem 1.1.1 (Loi des gaz parfaits). Soit un gaz parfait formé par une quantité de matière n de gaz parfait (en mol). Sa pression P (en Pa), sa température T (en K) et son volume V (en m³) vérifient la relation :

$$PV = nRT$$

avec $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

1.1.3 Limites des gaz parfaits

L'équation des gaz parfaits reste valable tant que les hypothèses énoncées par [Definition 1.1.1](#) restent vérifiées. On considère généralement que ces hypothèses sont vérifiées pour des pressions inférieures à $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

1.2 Energie d'un système thermodynamique

Definition 1.2.1 (Energie d'un système thermodynamique). Un système thermodynamique est une portion de l'espace délimité par opposition au milieu extérieur. Le système peut être ouvert, fermé, isolé, ou non isolé. Dans un référentiel galiléen, on a :

$$E = E_{c,micro} + E_{p,micro} + E_{c,macro} + E_{p,macro}$$

Avec :

- Des énergies macroscopiques E_{macro}
 - Potentielles : $E_{p, macro}$, comme par exemple : E_{pp}
 - Cinétique : $E_{c, macro}$, le mouvement d'ensemble du système

- Des énergies microscopiques
 - Potentielles : $E_{p, \text{micro}}$, comme par exemple : les interactions moléculaires du système, ou l'énergie liée à la masse
 - Cinétiques : $E_{c, \text{micro}}$, comme par exemple l'agitation thermique

1.3 Energie interne d'un système thermodynamique

Definition 1.3.1 (Energie interne d'un système thermodynamique). L'énergie interne U (en J), d'un système thermodynamiques est la somme des énergies microscopiques du système :

$$U = E_{p, \text{micro}} + E_{c, \text{micro}}$$

1.3.1 Capacité thermique

Definition 1.3.2 (Capacité thermique). Hors changement d'état, la variation d'énergie interne ΔU d'un système condensé est reliée à la variation de la température ΔT par :

$$\Delta U = C \Delta T$$

avec :

- ΔU en J
- C en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
- ΔT en K

Remark (Remarques). • On peut aussi avoir ΔT en $^{\circ}\text{C}$

- On utilise souvent la capacité thermique massique (en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) ou la capacité thermique molaire (en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$). On a alors :

$$\begin{aligned} \Delta U &= C_m \cdot m \cdot \Delta T \\ &= C_n \cdot n \cdot \Delta T \end{aligned}$$

- Si $\Delta U > 0$ le système reçoit de l'énergie alors que si $\Delta U < 0$, le système cède de l'énergie.

1.3.2 Chaleur latente de changement d'état

Definition 1.3.3 (Chaleur latente de changement d'Etat). Le transfert thermique Q échangé avec le milieu extérieur lors d'un changement d'état est donné par :

$$Q = m \cdot L$$

Avec :

- Q en J
- m en kg
- L en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

Exemple : la chaleur latente de la fusion de l'eau est : $L_{\text{fus}} = 334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

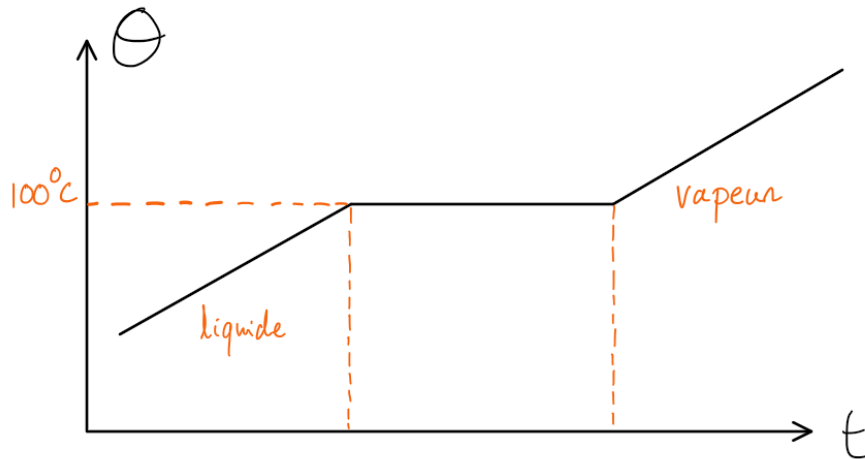


Figure 1.1: Evolution de la température de l'eau, à flux thermique constant

1.4 Mode de transfert thermique

1.4.1 Conduction

Definition 1.4.1 (Conduction). Il y a échange d'énergie de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide sans échange ni mouvement de matière. C'est la conduction.

Exemple : transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'une pièce

1.4.2 Convection

Definition 1.4.2 (Rayonnement). Il y a échange d'énergie de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide avec échange de matière : c'est la convection.

Applications : courants océaniques, chauffage d'une pièce au moyen d'un radiateur, etc.

1.4.3 Rayonnement

Definition 1.4.3 (Rayonnement). Un corps chaud émet un rayonnement électromagnétique qui transporte l'énergie susceptible de chauffer le corps qui le reçoit. Contrairement à la conduction ou la convection qui nécessite la présence d'un milieu matériel pour se propager, le transfert par rayonnement peut s'effectuer dans le vide.

Exemple : lumière du soleil

1.5 Conduction thermique

1.5.1 Flux thermique

On considère une paroi de surface S positionnée le long d'un axe (Ox) .

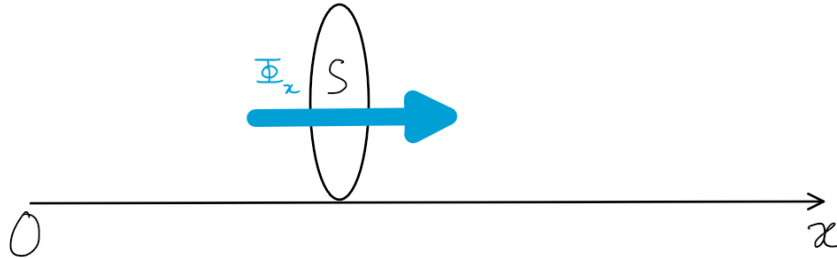


Figure 1.2: Schema du flux thermique au travers d'une paroi de surface S

Definition 1.5.1 (Flux thermique). Le flux thermique Φ_x est la quantité de chaleur Q qui traverse la surface S pendant une durée Δt :

$$\Phi_x = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$$

Avec :

- Φ_x en W
- Q en J
- Δt en s

Lemma 1.5.1 (Sens du transfert). Ce transfert d'énergie s'effectue spontanément et irréversiblement du corps chaud vers le corps froid.

1.5.2 Loi de Fourier

Theorem 1.5.1 (Loi de Fourier). Dans le cas d'un transfert selon une dimension (voir schéma précédent), on a :

$$\Phi_x = -\lambda S \frac{dT}{dx}$$

avec λ la conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

Application à une paroi plane en régime permanent

On considère une paroi plane d'épaisseur e et de surface S constituée d'un matériau de conductivité thermique λ .

Les deux faces sont portées aux températures T_1 et T_2 telles que $T_1 > T_2$.

En régime permanent, le flux thermique traversant la paroi est constant, soit : $\Phi_x = -\lambda S \frac{dT}{dx} = \text{cste}$.

La température T est donc fonction affine de x , soit $T = ax + b$. Les conditions initiales imposent :

$$\begin{cases} T(x=0) = b = T_1 \\ T(x=e) = ae + b = T_2 \end{cases}$$

On a donc : $a = \frac{T_2 - T_1}{e}$. D'où :

$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{e}x + T_2$$

1.5.3 Résistance thermique

En régime permanent, le flux thermique traversant la paroi vaut :

$$\begin{aligned}\Phi_x &= -\lambda S \frac{dT}{dx} \\ &= -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{e} \\ &= -\frac{\lambda S}{e} (\Delta T)\end{aligned}$$

Définition 1.5.2 (Résistance thermique). Par analogie avec l'électricité où l'on a $U = \Delta V = RI$, on définit R_{th} tq :

$$T_2 - T_1 = R_{th} \cdot \Phi_x \Leftrightarrow R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$$

où R_{th} est la résistance thermique de la paroi considérée (en $K \cdot W^{-1}$).

1.6 Bilan d'énergie

1.6.1 Premier principe de la thermodynamique

Theorem 1.6.1 (Premier principe de la thermodynamique). Pour un système macroscopiquement au repos, et telle que $E_p = \text{cste}$, on a :

$$\Delta U = W + Q$$

Avec W le travail des forces extérieures autres que le poids (les forces de pressions par exemple), et Q le transfert thermique (ou chaleur échangé)

1.6.2 Machines thermiques

Définition 1.6.1 (Machine thermique (cyclique)). Les machines thermiques assurent une transformation de chaleur en travail ou inversement. Une machine thermique est dite cyclique si elle retrouve le même état entre deux cycles. Dans ce cas, $\Delta U = 0$.

Corollary 1.6.1 (Types de machines thermiques). On distingue deux types de machines thermiques :

- Les moteurs qui cèdent du travail ($W < 0$)
- Les moteurs qui fournissent du travail ($W > 0$)

Dans les deux cas, la machine thermique échange de la chaleur avec une source chaude et une source froide (Q_c et Q_f).

Corollary 1.6.2 (Application du premier principe). Le premier principe nous dit alors :

$$Q_f + Q_c + W = 0$$

1.7 Bilan thermique du système Terre atmosphère

1.7.1 Modèle du corps noir

Définition 1.7.1 (Corps noir et rayonnement). Le corps noir est un objet physique idéal qui absorbe tout le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit. Cette absorption se traduit par une agitation thermique dit rayonnement du corps noir.

1.7.2 Loi de Stephan-Boltzman

Theorem 1.7.1 (Loi de Stephan-Boltzman). La puissance rayonnée par un corps noir de surface S et de température T est donné par la loi de Stephan Boltzman :

$$P = \sigma T^4 S$$

avec :

- P en W
- T en K
- S en m^2
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, la constante de Stephan-Boltzman

1.7.3 Bilan thermique du système Terre atmosphère

Voir activité 3 page 432

1.8 Evolution de la température d'un système au contact d'un thermostat

1.8.1 Loi phénoménologique de Newton

Theorem 1.8.1 (Loi de Newton). L'énergie échangée $\delta Q(t)$ par une face condensée (solide ou liquide) en contact avec un thermostat de température constante T_{ext} pendant une durée dt est donnée par la relation suivante :

$$\delta Q(t) = hS(T_{ext} - T(t))dt$$

Avec :

- $T(t)$ la température de la face condensée (en K)
- h est le coefficient de transfert conducto-convectif (en $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^2$)
- S la surface d'échange (en m^2)

1.8.2 Application du premier principe

Le bilan d'énergie interne donne : $dU(t) = \delta Q(t)$, or $dU(t) = CdT(t)$.

On en déduit donc l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{hS}{C}T(t) = \frac{hS}{C}T_{ext}$$

La solution de cette équation est :

$$T(t) = T_{ext} + (T_0 - T_{ext})e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Avec $\tau = \frac{C}{hS}$, le temps caractéristique du système.