

Thermodynamique et enjeux énergétiques

1 Du microscopique au macroscopique

À l'échelle humaine, la matière est constituée d'un nombre colossal d'entités (atomes, ions, molécules). Pour décrire un système de N particules, à l'échelle *microscopique*, grâce aux lois de la mécanique classique, il faut étudier pour chaque particule sa position (3 variables d'espace, par exemple x , y et z) et sa vitesse (3 autres variables, par exemple v_x , v_y et v_z). Cela fait un total de $6N$ variables, ce qui pose plusieurs questions.

- Sommes-nous en mesure de résoudre un tel système, ne serait-ce que de façon approchée?
- Dans la mesure où nous en serions capables, cela présente-t-il un intérêt, quand nous savons que ces systèmes physiques sont chaotiques, c'est-à-dire qu'une infime variation de leurs conditions initiales mènent à des comportements divergents?

À ces deux questions nous pouvons répondre par la négative, ce qui ouvre une alternative : l'approche *statistique* du comportement du système. En effet, la loi des grands nombres (appelée "Théorème centrale limite" par les physiciens et mathématiciens) joue en notre faveur dans l'étude macroscopique du problème. Du chaos microscopique se détache un comportement déterministe pour le système dans son ensemble. Il en résulte que l'on peut décrire son état physique d'équilibre par un nombre restreint de *variables émergentes*. Ces variables, dénuées de sens à l'échelle du constituant unique, prennent toute leur importance dans la description des échanges d'énergie entre le système avec son environnement. La température, la pression ou encore le volume en sont les incarnations les plus fréquentes; ce sont ces variables qui sont pertinentes à la description du système et qui forgent notre expérience sensible lorsque nous interagissons avec le système. Par exemple, lorsque nous plongeons la main dans l'eau chaude, nous ressentons un transfert de chaleur, et non les collisions des particules contre nos

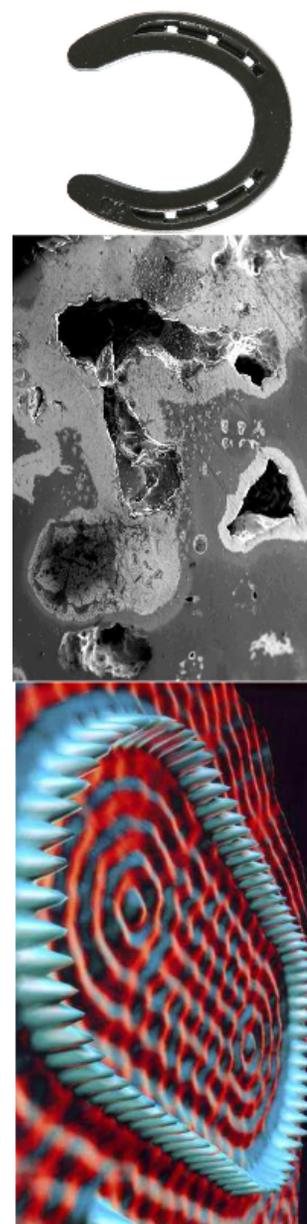


FIGURE 18.1: Le fer à différentes échelles, du macroscopique au microscopique.

mains! Ce chapitre pose les fondamentaux de la thermodynamique; il donne le vocabulaire pour comprendre les transferts thermiques.

Définition 18.1: La mole (Rappel)

La *mole* est l'unité SI de mesure de quantité de matière (symbole mol) équivalant à celle d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 g de carbone 12.

Définition 18.2: Constante d'Avogadro

Le nombre d'Avogadro permet d'appréhender un ordre de grandeur du nombre de particules en jeu dans un système macroscopique. Il est défini comme le nombre d'entités contenues dans une mole.

$$N_a = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

	Ions Cu^{2+}	Mole d'ions Cu^{2+}
Masse (g)	1.05×10^{-22}	63.5
Charge (C)	3.2×10^{-19}	1.9×10^5

FIGURE 18.2: Pour obtenir les masse et charge d'une mole de composé, nous multiplions les masse et charge d'un constituant par le nombre d'Avogadro.

2 Énergie interne d'un système

2.1 Notion d'énergie interne

Définition 18.3: Énergie interne

On appelle *énergie interne* U d'un système macroscopique l'énergie qui résulte de :

- L'énergie cinétique de ses constituants. (voir fig. 18.3)
- L'énergie potentielle des interactions entre constituants.

Calculées dans le référentiel du centre de masse du système.

L'énergie cinétique est liée à l'agitation thermique désordonnée des entités du système. Plus la température d'un corps est élevée, plus l'agitation thermique des particules qui le constituent est importante et plus leurs énergies cinétiques microscopiques sont grandes. L'énergie totale d'un système macroscopique est alors la somme de son énergie interne et de son énergie mécanique (qui résulte de contributions macroscopiques).

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

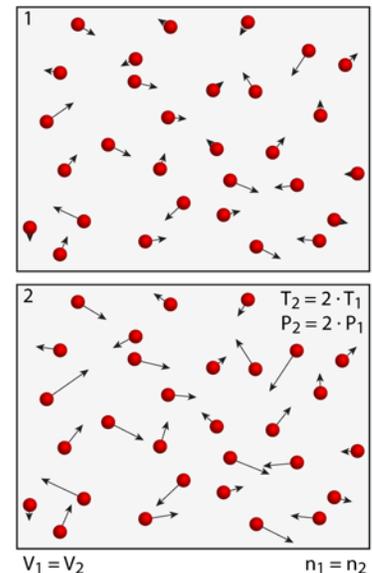


FIGURE 18.3: L'énergie interne d'un corps est due à l'énergie cinétique de ses constituants et à l'énergie potentielle de leur interaction. Crédits image

2.2 Variation d'énergie interne d'un système

Définition 18.4: Variation d'énergie interne

La *variation d'énergie interne* ΔU d'un système est la conséquence d'échanges d'énergie avec l'extérieur. Il existe deux modes de transfert d'énergie : par travail W ou par transfert thermique (chaleur) Q .

Par convention, l'énergie interne U d'un système augmente ($\Delta U > 0$) si ce dernier reçoit un travail W ou de la chaleur Q . Inversement U diminue $\Delta U < 0$ si le système cède du travail W ou de la chaleur Q . À cause de cette convention, il est *crucial de définir le système d'étude en thermodynamique*

Si l'énergie mécanique du système est constante, on a alors :

$$\Delta U = W_{reçu} - W_{cédé} + Q_{reçue} - Q_{cédée} = 0$$

Exemple : Une pompe à chaleur (PAC) est une machine thermique qui fonctionne en réalisant un transfert thermique entre deux sources :

- Une source froide : l'environnement extérieur (sol du jardin - air environnant - eau d'une nappe)
- Une source chaude : l'intérieur du logement.

Elle est constituée d'un circuit fermé et étanche dans lequel circule un fluide frigorigène à l'état liquide ou gazeux selon les organes qu'il traverse. On distingue quatre organes :

- *L'évaporateur* : le fluide frigorigène passe de l'état liquide à l'état vapeur en prélevant une partie de l'énergie contenue dans l'air extérieur.
- *Le compresseur* : le fluide frigorigène à l'état vapeur est comprimé par le compresseur à moteur électrique.
- *Le condenseur* : Le fluide frigorigène, sous forme de vapeur haute pression, passe de l'état vapeur à l'état liquide dans le condenseur. En se condensant, il cède de la chaleur à l'eau du circuit de chauffage qui alimente les radiateurs, le parquet chauffant ou les ventilo-convecteurs.
- *Le détendeur* : la pression au sein du fluide liquide est diminuée, afin de faciliter sa vaporisation lors de son retour dans l'évaporateur.

Le fluide frigorigène prélève donc une chaleur Q_F à l'environnement et restitue une chaleur Q_C au logement : pour réaliser ce transfert inverse du sens spontané, une dépense d'énergie sous forme de travail électrique W est nécessaire.

BILAN ÉNERGÉTIQUE : (voir fig 18.5)

$$\Delta U = W + Q_F - Q_C$$

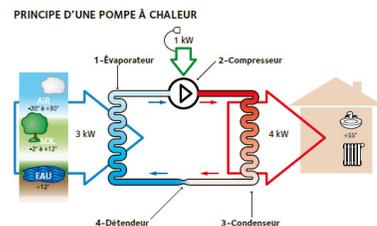


FIGURE 18.4: Principe d'une pompe à chaleur

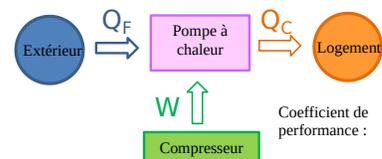


FIGURE 18.5: Transferts thermiques en jeu dans le fonctionnement de la pompe à chaleur.

2.3 Capacité thermique d'un corps condensé

Définition 18.5: Capacité thermique d'un corps condensé

Pour un corps en phase condensée (état solide ou liquide) ne subissant pas de changement d'état et passant d'une température initiale à une température finale, la variation d'énergie interne a pour expression :

$$\Delta U = C\Delta T = C(T_F - T_I)$$

où C est la capacité thermique du corps en JK^{-1} ; $\Delta U = U_F - U_I$ est la variation d'énergie interne, exprimée en joule (J); et $\Delta T = T_F - T_I$ est la variation de température en kelvin (K).

INTERPRÉTATION PHYSIQUE : La capacité thermique C d'un corps correspond à l'énergie qu'il faut lui fournir pour élever sa température de 1K (resp 1°C).

- Elle dépend de la nature du corps, de son état physique et de sa masse. Dans le cadre de nos applications on négligera sa dépendance en température.
- Cette grandeur caractérise donc la capacité d'un corps à stocker ou à céder de l'énergie interne : à variation de température et masse identique, plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus la variation d'énergie interne ΔU de ce corps est importante.

Définition 18.6: Capacité thermique massique d'un corps pur

Si le corps est pur, on peut écrire

$$C = mc$$

où m est la masse de corps et c est la capacité thermique massique du corps pur, exprimée en $\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$

On parle parfois de capacité *spécifique*, pour bien souligner le fait qu'elle caractérise une *espèce chimique*.

REMARQUES :

1. Comme $C > 0$, si T augmente, $\Delta T > 0 \Rightarrow \Delta U > 0 \Rightarrow U$ augmente. Autrement dit, il faut fournir de l'énergie au corps pour le réchauffer, et il faut qu'il en cède pour refroidir. Ceci est cohérent avec l'image microscopique que l'on se fait de l'agitation thermique.
2. Une différence de température prend la même valeur que l'on utilise des Kelvin ou des °C, car $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273.15$. Il est donc inutile de convertir en kelvins pour calculer ΔT .

EXEMPLES :

- Lors d'une augmentation de température de 1K, un kilogramme de plomb stocke une énergie de 130 J alors qu'un kilogramme d'aluminium stocke une énergie de 897 J : ainsi pour emmagasiner de l'énergie, à variation de température et masse identique, l'aluminium est plus efficace que le plomb.
- L'eau se distingue par sa haute capacité thermique. Pour changer sa température, il faut lui ajouter ou lui extraire une grande quantité de chaleur : l'eau chauffe donc lentement et se refroidit lentement. C'est la raison pour laquelle on l'utilise pour transférer l'énergie thermique dans des radiateurs pour chauffer les maisons.

Matériau	$c(\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1})$
Plomb(s)	130
Aluminium (s)	897
Éthanol	2430
Eau (l)	4185

3 Transferts thermiques

3.1 Différents modes de transferts

L'existence d'une différence de température entre deux systèmes induit un transfert thermique spontané de la partie la plus chaude vers la partie la

plus froide. Un transfert thermique est donc irréversible : le système évolue vers l'état final sans pouvoir revenir spontanément à son état initial. Lorsque les deux systèmes sont à la même température, le transfert thermique cesse : les deux systèmes sont alors à l'équilibre thermique.

On peut interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique suivant trois modes principaux (voir fig. 18.6) :

La conduction ce mode de transfert se produit principalement dans les corps à l'état solide. L'agitation thermique des atomes ou des molécules qui constituent le corps se transmet de proche en proche par collision. Le transfert thermique s'effectue sans déplacement d'ensemble de la matière.

La convection ce mode de transfert se produit dans les fluides (liquides ou gaz) et se traduit par un mouvement d'ensemble des particules du fluide (voir fig.18.7). Par exemple, la convection naturelle qui a lieu dans une casserole s'explique par la variation de la masse volumique de la matière en fonction de la température : les groupes de particules de fluide proches du fond de la casserole sont chauffés. Ils se dilatent donc, deviennent moins denses et ces parcelles se mettent en mouvement spontané vers le haut. Ceux de la surface de la casserole sont refroidis par le contact de la surface avec un milieu moins chaud, se contractent et gagnent en densité, puis plongent.

Le rayonnement Ce mode de transfert est généré par l'émission ou l'absorption d'un rayonnement électromagnétique. En effet, tout corps, du fait de sa température, « rayonne » : il émet des ondes électromagnétiques qui transportent de l'énergie. C'est le seul mode de transfert qui peut avoir lieu dans le vide car les ondes électromagnétiques n'ont pas besoin d'un milieu matériel pour se propager.

L'exemple d'une bouteille Thermos illustre ces trois modes de transferts (voir fig. 18.8) :

- L'intérieur d'une telle bouteille est constitué de deux parois en verre. Dans l'espace entre les parois règne un vide partiel pour limiter les pertes par conduction.
- Une face de chaque paroi est recouverte d'une mince couche argentée pour limiter les pertes par rayonnement.
- Le bouchon de la bouteille limite les pertes par convection.

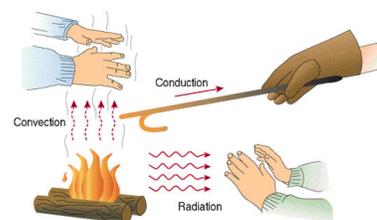


FIGURE 18.6: Illustration des trois modes de transfert thermique.

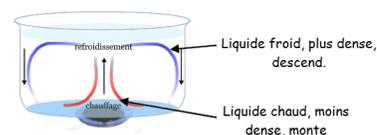


FIGURE 18.7: La convection, c'est le transport thermique par déplacement qui s'opère lors d'un transport macroscopique de matière.

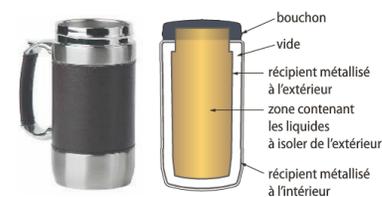


FIGURE 18.8: La bouteille thermos illustre les trois modes de transfert thermique.

3.2 Définition du flux thermique

Définition 18.7: Flux thermique

Le *flux thermique* Φ caractérise la vitesse du transfert thermique Q entre deux corps. Pendant une durée Δt :

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

où Φ s'exprime en watts, Q en joules, et Δt en secondes.

C'est l'analogie thermique de l'intensité électrique, qui caractérise la vitesse du transfert de charge électrique!

3.3 Résistance thermique d'une paroi plane

Définition 18.8: Résistance thermique

On considère un corps chaud à la température T_C et un corps froid à la température $T_F < T_C$, séparés par une paroi plane (voir fig. 18.9). Un transfert thermique Q par conduction s'opère du corps chaud vers le corps froid.

Le flux thermique Φ qui traverse cette paroi dépend du matériau utilisé et de la différence de température ΔT entre les deux faces de la paroi au travers de la résistance thermique du matériau R_{th} :

$$\Delta T = T_C - T_F = R_{th} \Phi$$

INTERPRÉTATION PHYSIQUE : Pour un même écart de température entre les deux faces d'une paroi, plus la résistance thermique de la paroi est grande, plus le transfert thermique à travers cette paroi est lent et plus le flux thermique est faible. Une paroi de grande résistance thermique est un bon isolant thermique.

La résistance thermique R_{th} d'une paroi plan homogène dépend de :

- La conductivité thermique λ du matériau qui la compose. Cette grandeur traduit l'aptitude d'une substance à transmettre l'énergie thermique. Un bon conducteur thermique est caractérisé par une valeur élevée de λ , un bon isolant thermique par une valeur faible de λ .
- Son épaisseur e .
- L'aire de sa surface S . La résistance thermique d'une paroi est d'autant plus grande que l'épaisseur de la paroi est grande, que l'aire de sa surface est petite et que le matériau qui la compose est un bon isolant thermique.

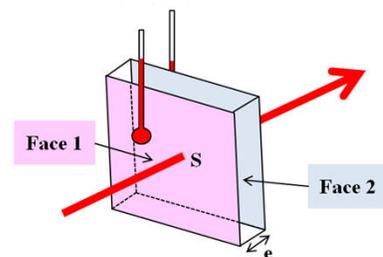


FIGURE 18.9: Résistance thermique d'une paroi plane.

REMARQUE :

Puisque $R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$ La résistance thermique de plusieurs parois accolées les unes à la suite des autres est égale à la somme des résistances thermiques de chaque paroi.

EXEMPLES :

- Les métaux ont une conductivité thermique environ 400 fois plus grande que les autres solides, ceux-ci conduisent la chaleur mieux que la plupart des liquides, enfin ces derniers la conduisent 10 fois mieux que les gaz.
- Les molécules d'un gaz sont très éloignées les unes des autres, ce qui les rend moins apte à transmettre l'énergie thermique par conduction. Les gaz sont donc de mauvais conducteurs thermiques. N'importe quel système qui piège une couche d'air fonctionne comme un bon isolant thermique. C'est le cas du double vitrage, de la laine de verre...

Matériau	λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹) à 20°C
Air	0.0262
Fibre de verre	0.04
Polystyrène expansé	0.036
Bois de chêne	0.16
Eau	0.58
Carton	0.63
Béton	0.92
Verre	1.20
Aluminium	25.0
Cuivre	390

Elle est donnée par la relation :

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

Avec R_{th} en KW^{-1} , e en m, et λ en $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

À la fin de ce chapitre, je sais faire (extrait du B.O.) :

- Extraire et exploiter des informations sur un dispositif expérimental permettant de visualiser les atomes et les molécules.
- Évaluer des ordres de grandeurs relatifs aux domaines microscopique et macroscopique.
- Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques.
- Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.
- Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température pour un corps dans un état condensé.
- Interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique. Connaître les trois modes de transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement).
- Relier le flux thermique au transfert thermique Q.
- Exploiter la relation entre le flux thermique à travers une paroi plane et l'écart de température entre ses deux faces.
- Faire un bilan énergétique dans les domaines de l'habitat ou du transport.
- Argumenter sur des solutions permettant de réaliser des économies d'énergie.