



19.1 Le modèle du gaz parfait

19.1.1 Conditions nécessaires afin de modéliser un gaz comme parfait

À retenir

Un gaz peut être modélisé comme un **gaz parfait** si :

- les molécules qui composent ce gaz n'interagissent pas entre elles : absence d'interactions intermoléculaires ;
- les molécules ont une taille négligeable devant la distance qui les sépare : elles peuvent être considérées comme ponctuelles ;
- la pression est relativement faible. En effet, plus la pression est élevée, plus le nombre de molécules est grand dans un volume donné et les molécules interagissent entre elles.

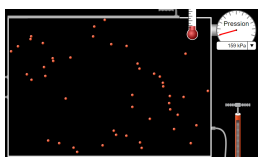


FIGURE 1 – Pression faible : modèle du gaz parfait utilisable

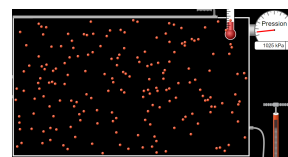


FIGURE 2 – Pression élevée : modèle du gaz parfait inutilisable, il faut développer de nouveaux modèles.

19.1.2 Équation d'état d'un gaz parfait

Σ ♥ Formule à connaître

L'équation d'état d'un gaz est une relation qui relie les différentes grandeurs thermodynamiques entre elles. L'équation d'état d'un gaz parfait est :

$$P V = n R T$$

avec :

- P la pression du gaz en pascal (Pa) ;
- V le volume en mètre cube (m^3) ;
- n la quantité de matière en moles (mol) ;
- R la constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- T la température en kelvin (K).

Remarque

Pour une quantité de matière constante et une température constante, on retrouve la loi de Boyle-Mariotte vue en 1^{re} : la pression d'un gaz est inversement proportionnelle à son volume, $P V = K$ avec K une constante.

19.2 Énergie interne d'un système thermodynamique

19.2.1 L'énergie interne, une mesure de l'énergie au niveau microscopique

L'énergie totale d'un système thermodynamique comme un fluide correspond à une partie macroscopique et une partie microscopique.

À retenir

Un **système thermodynamique** est un ensemble contenant un nombre élevé d'entités chimiques. En terminale, seuls les **systèmes fermés** sont étudiés ; un système fermé ne peut pas échanger de matière avec le milieu extérieur.

- Au niveau macroscopique, ces énergies sont déjà connues. Si le fluide est en mouvement dans un champ de pesanteur, il possède une énergie cinétique $E_{c,macro}$ et une énergie potentielle de pesanteur $E_{pp,macro}$.
- Au niveau microscopique, les particules qui composent le fluide sont en mouvement permanent même si le fluide est macroscopiquement au repos : c'est l'énergie cinétique microscopique $E_{c,micro}$, appelée également **agitation thermique**. Si les particules interagissent entre elles, elles possèdent une énergie potentielle d'interaction notée $E_{p,micro}$.

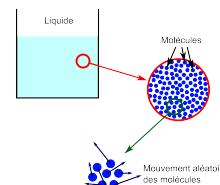


FIGURE 3 – Le liquide est macroscopiquement au repos mais les molécules sont en mouvement au niveau microscopique

La somme des deux énergies au niveau microscopique est appelée **énergie interne du système** et se note U . Elle s'exprime, comme toutes les énergies, en joules.

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

Lorsqu'un système est macroscopiquement au repos, $E_{c,macro} = E_{pp,macro} = 0$, donc la variation d'énergie totale du système est égale à sa variation d'énergie interne ΔU :

$$\Delta E_{tot} = \Delta U$$

19.2.2 Lien entre variation d'énergie interne et variation de température

Formule à connaître

Il est possible de relier la variation de température d'un système à son énergie interne par la relation :

$$\Delta U = m c \Delta T$$

avec :

- m la masse du système en kilogramme (kg) ;
- c la capacité calorifique massique en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;
- ΔT la variation de température en kelvin (K).

La capacité calorifique massique correspond à l'énergie à fournir à 1 kg du système pour augmenter sa température de 1 K.

Plus l'agitation thermique est élevée, plus l'énergie thermique du système est importante.

19.3 Énoncé du premier principe

À retenir

La variation d'énergie interne d'un système fermé au repos macroscopique correspond à la somme du travail et de l'énergie thermique échangés avec le milieu extérieur :

$$\Delta U = W + Q$$

avec :

- W le travail échangé avec le milieu extérieur en joule (J) ;
- Q l'énergie thermique (anciennement appelée chaleur) échangée avec le milieu extérieur en joule (J).

Les valeurs de Q et W peuvent être positives ou négatives. Si le système reçoit de l'énergie, cette valeur est comptée positivement.

Remarque

W correspond au travail échangé avec le milieu extérieur : cela peut être un travail mécanique lors de la compression d'un gaz, un travail électrique (par exemple si l'on chauffe de l'eau à l'aide d'une résistance chauffante)... Il n'existe aucune formule prédéfinie pour calculer la valeur de l'énergie thermique échangée Q .

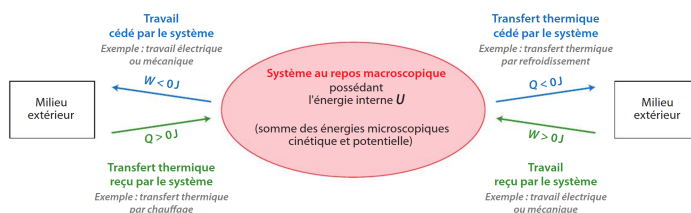


FIGURE 4 – Les deux transferts d'énergie possibles : énergie thermique et travail

Remarque

Un transfert d'énergie thermique s'effectue toujours du système thermodynamique chaud vers le système froid.

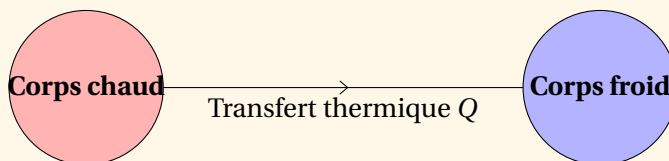


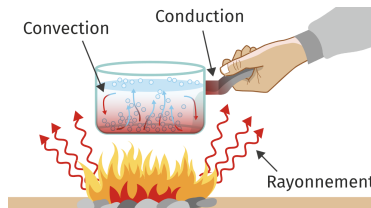
FIGURE 5 – Sens du transfert thermique

19.4 Les différents types de transferts thermiques

♥ À retenir

Il existe trois modes de transfert thermique :

- la **convection** : un déplacement du fluide dans le système par agitation manuelle ou par déplacement à cause d'une variation de densité due à des températures différentes ;
- la **conduction** : la chaleur se propage de proche en proche dans le matériau sans déplacement de matière. Les « bons » conducteurs électriques sont en général de bons conducteurs de la chaleur ;
- le **rayonnement** : échange de chaleur à distance. L'énergie se propage à l'aide d'ondes électromagnétiques : cet échange est possible dans le vide, comme la chaleur apportée par le Soleil.



19.5 Flux et transfert thermique

19.5.1 Puissance / flux thermique

Σ ♥ Formule à connaître

Le **flux d'énergie thermique** (ou **puissance thermique**) se définit comme l'énergie thermique échangée par unité de temps. Le flux thermique possède la dimension d'une puissance :

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

- ϕ le flux thermique en watt (W) ;
- Q l'énergie thermique en joule (J) ;
- Δt la durée en seconde (s).

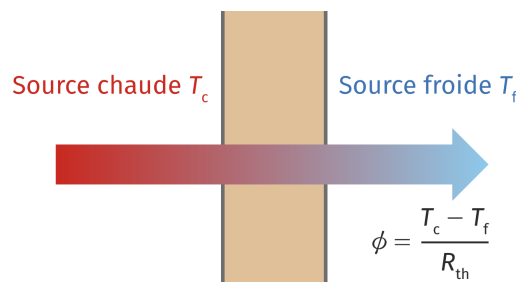
19.5.2 Lien entre flux thermique et résistance thermique

💡 Formule à savoir utiliser

Le flux d'énergie thermique peut également être relié à la différence de température et à la résistance thermique d'une paroi par la relation :

$$\phi = \frac{T_c - T_f}{R_{th}}$$

où R_{th} correspond à la résistance thermique de la paroi qui s'exprime en $K \cdot W^{-1}$. Plus la résistance thermique d'un matériau est élevée, plus le transfert thermique sera faible à travers celui-ci : le matériau est donc un bon isolant thermique si R_{th} est élevé.



19.6 Bilan radiatif de la Terre

19.6.1 Puissance surfacique d'un corps noir



Formule à savoir utiliser

La **loi de Stefan-Boltzmann** permet de calculer la puissance surfacique émise par un corps noir en fonction de sa température de surface :

$$P_{\text{surfacique}} = \sigma \times T^4$$

avec :

- T la température de surface du corps noir en kelvin (K) ;
- $P_{\text{surfacique}}$ la puissance surfacique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;
- σ la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

19.6.2 L'albédo terrestre

L'**albédo terrestre** correspond au rapport entre le rayonnement réfléchi par la Terre et le rayonnement incident (celui du Soleil au niveau de la Terre). C'est donc un nombre sans unité compris entre 0 et 1 :

$$A = \frac{P_{\text{réfléchi}}}{P_{\text{incident}}}$$

- Un albédo proche de 1 signifie que l'ensemble du rayonnement est réfléchi : les surfaces blanches telles que la neige ont un albédo très élevé.
- Un albédo proche de 0 signifie que l'ensemble du rayonnement est absorbé : les surfaces noires telles que le bitume ou les toits d'un bâtiment ont un albédo très faible.

L'albédo moyen à la surface de la Terre est de $A = 0,31$. Voici quelques exemples d'albédo à la surface de la Terre :

Surface	Corps noir	océan	sols (bitume)	neige	miroir parfait
Albédo	0	0,07	0,16	0,85	1

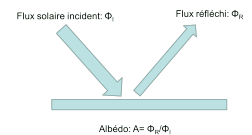


FIGURE 6 – Rapport entre flux réfléchi et flux incident

19.7 Bilan de puissance

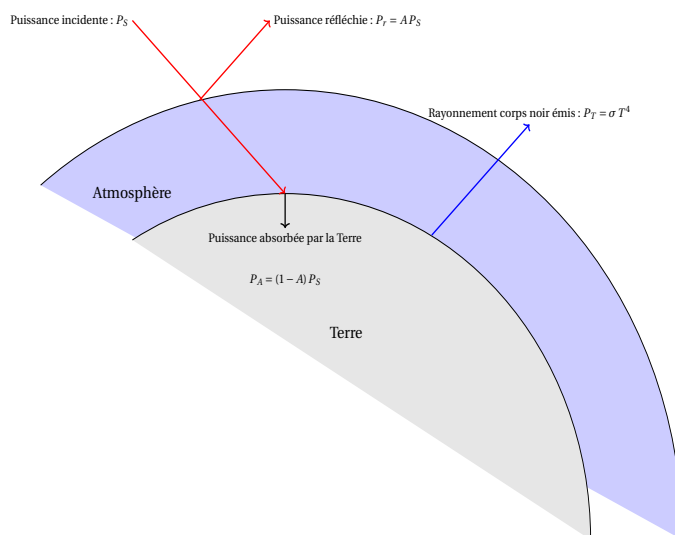
Dans cette partie, nous allons réaliser un bilan très simplifié.

Dans ce modèle simpliste, où l'on ne tient pas compte des multiples réflexions du flux dans l'atmosphère dues aux gaz à effet de serre (GES), on peut réaliser un bilan d'énergie. La Terre étant à l'équilibre thermique, tout ce qui est reçu par la Terre est égal à tout ce qui est émis : on obtient un bilan de puissance $P_A = P_T$. En remplaçant, il vient que :

$$(1 - A) P_S = \sigma T^4$$

et on peut calculer la température à la surface de la Terre :

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1 - A) P_S}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0,31) \times 340}{5,7 \times 10^{-8}}} = 253 \text{ K} = -20^\circ \text{C}$$



Dans ce modèle, si l'on ne tient pas compte de l'effet de serre, la température à la surface de la Terre serait d'environ -20°C . Les GES vont créer une réflexion supplémentaire des flux émis par la Terre, ce qui va « piéger » une partie du rayonnement émis et entraîner une augmentation de la température d'une trentaine de degrés nécessaire à la vie sur Terre.

À retenir

La formule $T = \sqrt[4]{\frac{(1 - A) P_S}{\sigma}}$ montre que si l'**albédo diminue**, la **température d'équilibre à la surface de la Terre augmente**.

Selon certaines études (GIEC), l'effet des GES est un facteur beaucoup plus important dans l'augmentation de la température à la surface de la Terre que la diminution de l'albédo, mais c'est très difficile à prévoir... Une augmentation de la température provoque la fonte des glaces et une augmentation de la surface d'eau à la surface du globe, ce qui entraîne une diminution de l'albédo.

19.8 Évolution de la température d'un corps au contact d'un thermostat

19.8.1 Loi phénoménologique de Newton

Formule à savoir utiliser

Un système porté à une température initiale T est en contact avec un **thermostat** (système échangeant de l'énergie thermique sans variation de température). Le système échange alors un flux thermique avec le thermostat égal à :

$$\phi = h S (T_{\text{ext}} - T)$$

avec :

- h un coefficient d'échange convectif à l'interface entre le système et le milieu extérieur ;
- S la surface de contact entre le système thermodynamique et le milieu extérieur.

La formule n'est pas à connaître, elle sera fournie. Par contre, il faut savoir **établir l'équation différentielle** qui va suivre.

19.8.2 Comment établir l'équation différentielle ?

Soit un système fermé, incompressible, initialement à la température T , placé en contact avec un thermostat de température T_{ext} .

D'après le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U = W + Q$$

Or, pour un système incompressible, le travail des forces de pression est nul, donc $W = 0$, il vient que :

$$\Delta U = Q = m c \Delta T$$

On sait également que :

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{donc} \quad \phi = m c \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

et d'après la loi phénoménologique de Newton :

$$\phi = h S (T_{\text{ext}} - T) \quad \text{donc} \quad h S (T_{\text{ext}} - T) = m c \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Si l'on fait tendre Δt vers 0, on obtient l'équation différentielle sur la température T du premier ordre à second membre constant suivante :

$$h S (T_{\text{ext}} - T) = m c \frac{dT}{dt}$$

En réorganisant :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{h S}{m c} T = \frac{h S}{m c} T_{\text{ext}}$$

Analyse dimensionnelle

On voit d'après le premier terme que l'on divise une température par un temps. Le terme $\frac{m c}{h S}$ doit donc également avoir la dimension d'un temps. Comme en électricité, on appelle cette constante τ : c'est le **temps caractéristique du système**. En posant $\tau = \frac{m c}{h S}$, il vient que :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau} T = \frac{1}{\tau} T_{\text{ext}}$$

19.8.3 Solution de l'équation différentielle

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$T = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + B$$

On utilise les conditions aux limites pour déterminer les constantes A et B .

Pour $t \rightarrow \infty$:

On sait qu'au bout d'une durée très longue, la température du système sera égale à la température du thermostat T_{ext} :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + B \right) = \boxed{B = T_{\text{ext}}}$$

Pour $t = 0$:

À $t = 0$, on sait que $T = T_0$, or

$$T = A \exp\left(-\frac{0}{\tau}\right) + B = \boxed{A + B = T_0}$$

Or $B = T_{\text{ext}}$, donc $A = T_0 - T_{\text{ext}}$.

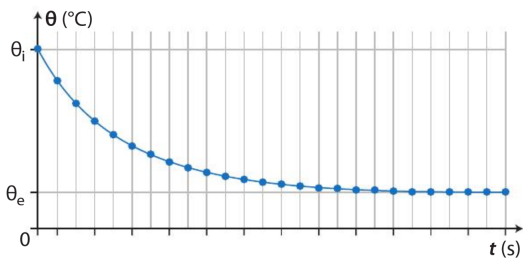
La solution générale est donc :

$$T = (T_0 - T_{\text{ext}}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_{\text{ext}}$$

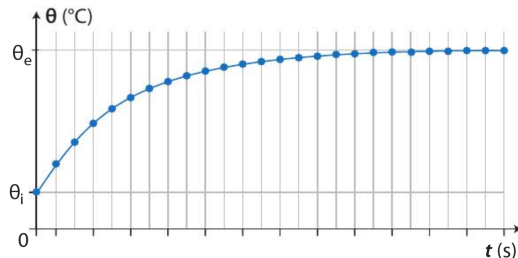
Le profil de température est donc une exponentielle croissante ou décroissante (en fonction du signe de $T_0 - T_{\text{ext}}$), où l'on considère que, d'après les propriétés de l'exponentielle, la température finale est égale à celle du thermostat au bout de 5τ .

Allure de la courbe donnant la température d'un système en contact avec un thermostat, en fonction du temps

Refroidissement du système incompressible : $\theta_i > \theta_e$



Réchauffement du système incompressible : $\theta_e > \theta_i$



Maîtrise				
Compétence				
Identifier les conditions d'application du modèle du gaz parfait.				
Exploiter l'équation d'état du gaz parfait.				
Définir l'énergie interne d'un système thermodynamique.				
Exploiter le premier principe de la thermodynamique.				
Différencier les trois modes de transfert thermique.				
Utiliser la loi de Stefan-Boltzmann pour calculer la puissance surfacique émise par un corps noir.				
Établir un bilan radiatif simplifié de la Terre.				