

Gaz parfait et bilan d'énergie

1°) Modèle du gaz parfait

a) Système thermodynamique

Thermodynamique : Étude des échanges et des conversions d'énergie entre systèmes.

Un système thermodynamique est un ensemble constitué d'un nombre élevé de particules microscopiques.

Remarque : Un système thermodynamique peut échanger de la matière avec l'extérieur.

Exemples :

- Une casserole d'eau sur le feu peut échanger des molécules d'eau avec l'air : ce système est **ouvert**.
- Une cocotte minute avec sa soupape fermée ne peut rien échanger avec l'extérieur : ce système est **fermé**.

b) Particularités des gaz

L'état **gaz** est celui qui a la masse volumique la plus faible : ses molécules sont très éloignées les unes des autres, contrairement à ce qui se passe dans un solide ou un liquide.

Dans un gaz, les molécules se déplacent en ligne droite, s'entrechoquent et rebondissent sur les parois du récipient.

La **masse volumique** est une mesure de la masse des particules microscopiques contenues dans une unité de volume.

Plus les molécules sont dispersées et/ou plus leur masse est faible, plus la valeur mesurée de la masse volumique du système est faible.

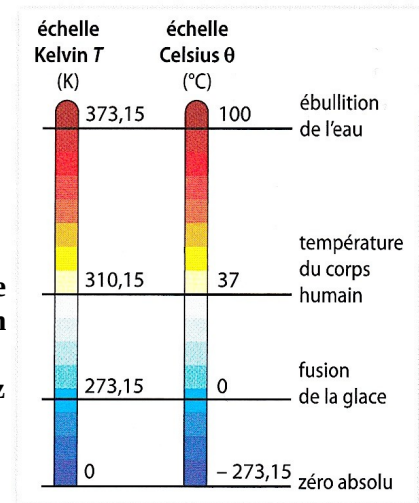
La **température** est une mesure du degré d'agitation microscopique des particules du système.

Plus l'agitation microscopique croît, plus la vitesse des particules augmente, plus la valeur mesurée de la température du système est grande.

La **pression** d'un gaz a pour origine les chocs des particules microscopiques sur les parois.

Plus les chocs sont fréquents, plus la valeur mesurée de la pression du système est élevée.

Grandeur	Température	Pression	Masse volumique
Symbole	T	P	ρ
Unités USI (autres)	K (°C, °F)	Pa (bar, atm, mm Hg)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Mesure	thermomètre	manomètre	par mesure de masse et de volume puis calcul



- La température T est proportionnelle à l'**énergie cinétique microscopique moyenne** des molécules. Elle reflète l'**agitation thermique**.
- La pression P mesure l'**intensité des chocs des molécules de gaz avec la paroi** du récipient. Plus le gaz est dilaté, plus elle est faible.

c) Équation d'état d'un gaz parfait

On dit qu'un gaz peut être considéré comme un **gaz parfait** si le **volume de ses molécules est petit** devant celui occupé par le gaz et s'il n'y a **aucune interaction** entre ces molécules.

On peut alors appliquer l'équation d'état des gaz parfaits :

$$P \times V = n \times R \times T$$

P : pression du gaz (Pa)

V : Volume du gaz (m^3)

n : quantité de matière (mol)

R : constante des gaz parfaits.

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

T : température (K)

Remarques :

- Cette équation n'est plus valable à haute pression ou à basse température.
- Quand la température est constante, cette équation devient $P \times V = cte$, ce qui est l'écriture de la loi de Boyle-Mariotte.

Exemple : À la pression $P = 1,013.10^5$ Pa et à la température $T = 298$ K, une quantité de matière $n = 1,0$ mol de gaz parfait occupe un volume V :

2°) Premier principe de la thermodynamique

a) Énergie d'un système thermodynamique : l'énergie interne U

$$U = E_c(\text{micro}) + E_p(\text{micro}) \quad \text{Toutes ces énergies sont exprimées en joules (J).}$$

C'est l'énergie rendant compte des phénomènes ayant lieu à l'échelle microscopique.

$E_c(\text{micro})$: **énergie cinétique** microscopique due à l'agitation des molécules.

$E_p(\text{micro})$: **énergie potentielle** microscopique due aux interactions entre molécules (attraction/répulsion).

b) Variables d'état

Ce sont des **grandeurs physiques mesurables** permettant de caractériser l'état d'un système.

Exemples : la **température** T (en kelvins), la **pression** P (en pascals).

c) Transfert thermique

Le **transfert thermique** est l'échange d'énergie à l'échelle microscopique entre un système thermodynamique et le milieu extérieur.

Remarque : Un transfert thermique se fait spontanément **du corps chaud vers le corps froid**.

L'**énergie thermique** transférée se note Q et est exprimée en joules (J). **Par convention, elle est positive si elle est reçue par le système, négative si elle est perdue.**

La **puissance thermique** moyenne associée au transfert d'une énergie thermique Q pendant une durée Δt est donnée par :

$$P_{th} = \frac{Q}{\Delta t}$$

Q en joules (J)

Δt en secondes (s)

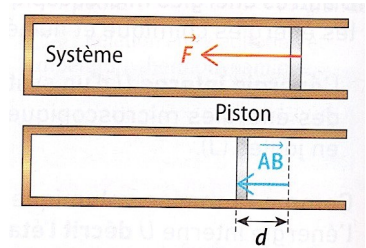
P_{th} en watts (W)

Exemple : Un conducteur ohmique de résistance R parcouru par un courant électrique d'intensité I transforme l'énergie électrique en énergie thermique : c'est l'effet Joule. La puissance thermique associée vaut $P = R.I^2$. Quelle énergie thermique est produite en 1,0 seconde si $R = 4,7 \text{ k}\Omega$ et $I = 1,0 \text{ A}$?

d) Travail reçu par un système

Le **travail**, noté W , mesure la quantité d'énergie échangée entre un système thermodynamique et l'extérieur par déplacement macroscopique. Il est **positif si reçu par le système, négatif s'il est cédé**.

Exemple : Un gaz est placé dans un cylindre muni d'un piston mobile d'aire $S = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. L'air extérieur au piston se trouve à la pression $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Le piston est alors déplacé d'une distance $d = 1,0 \text{ cm}$ dans le sens de la diminution du volume de gaz.



- a) Quelle force pressante F exerce l'air extérieur sur le piston ?
 b) Quel travail reçoit le système {piston+gaz} ?

e) Énoncé du premier principe de la thermodynamique

Lorsqu'un système thermodynamique reçoit une énergie thermique Q et/ou un travail W , son énergie interne varie de $U_{initiale}$ à U_{finale} :

$$\Delta U = U_{finale} - U_{initiale} = W + Q$$

Exemple : Un système reçoit un travail de 100 joules et cède une énergie thermique de 200 joules. Calculez la variation de son énergie interne.

3°) Énergie interne d'un système incompressible

a) Capacité thermique d'un système incompressible

La variation d'énergie interne d'un système incompressible (solide ou liquide) est proportionnelle à sa variation de température. Le coefficient de proportionnalité se note C et s'appelle **capacité thermique**.

$$\Delta U = C \times \Delta T = C \times \Delta \theta$$

Remarque :

- Que la température soit exprimée en kelvins (T) ou en degrés Celsius (θ), la valeur de sa variation est identique.
- Si on connaît la masse du système, on peut calculer sa capacité thermique avec sa **capacité thermique massique** c : $C = m \times c$

Exemple : Une masse $m = 1,5 \text{ kg}$ d'eau de capacité thermique massique $c_e = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ voit sa température passer de $\theta_i = 15^\circ\text{C}$ à $\theta_f = 30^\circ\text{C}$. Calculez la variation de son énergie interne.

b) Bilan d'énergie interne pour un système incompressible

Pour un système incompressible, on peut écrire le premier principe de la thermodynamique :

$$\Delta U = C \times \Delta T = W + Q$$

Or, un système incompressible ne peut subir aucun déplacement macroscopique : le travail qu'il reçoit est par conséquent toujours nul. On peut donc écrire :

$$\Delta U = C \times \Delta T = Q$$

Exemple : Quelle variation de température subit un bloc de fer de capacité thermique 111 J.K⁻¹ recevant une énergie thermique de 310 J ?

4°) Transfert thermique par conduction

La conduction thermique est un mode de transfert thermique par contact mais sans déplacement de matière entre deux systèmes thermodynamiques.

Explication : L'agitation thermique se communique d'atome en atome par contact de proche en proche : un atome agité va percuter un atome immobile et lui communiquer du mouvement.

La puissance thermique transférée à travers une cloison est appelée le **flux thermique** :

$$\Phi_{th} = \frac{T_C - T_F}{R_{th}} = \frac{\theta_C - \theta_F}{R_{th}}$$

$T_C - T_F$ ou $\theta_C - \theta_F$: écart de température en kelvins ou en degrés Celsius.
 Φ_{th} en watts (W).
 R_{th} en kelvins par watt (K.W⁻¹).

La **résistance thermique** d'une cloison parallélépipédique d'épaisseur L et de surface S vaut : $R_{th} = \frac{L}{\lambda S}$

où λ est la conductivité thermique du matériau. λ est grand si le matériau est conducteur de la chaleur (exemple : $\lambda_{acier} > \lambda_{polystyrène}$).

Exemple : Quel est la puissance cédée par le système chaud (ou reçue par le système froid) dans le cas d'un mur de résistance thermique 0,50 K.W⁻¹ dont une face est à 21°C et l'autre à -7°C ?

5°) Transfert thermique par rayonnement

Le rayonnement consiste en un échange de photons par émission et absorption entre deux corps. C'est le seul mode de transfert thermique possible dans le vide.

Loi de Stefan-Boltzmann : La **puissance thermique rayonnée** par un corps noir est :

$$P_{th,ray} = \sigma T_S^4 S$$

$P_{th,ray}$ puissance thermique rayonnée en watts (W).
 T_S température de surface en kelvins (K).
S surface du corps en mètres carrés (m²).
 $\sigma = 5,67.10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴ constante de Stefan-Boltzmann.

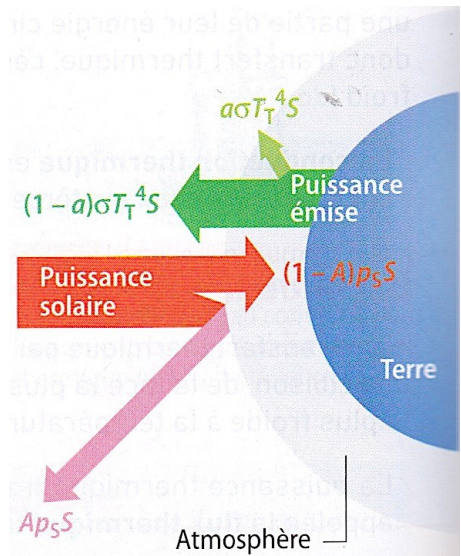
Un « corps noir » est un corps idéal qui absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit.

Exemple : Le Soleil est une sphère de rayon 6,96.10⁸ m et de température de surface 5778 K. Quelle est la puissance rayonnée par le Soleil ?

Explication du phénomène d'effet de serre :

• **Puissance thermique reçue :**

Le système {Terre + atmosphère} est une sphère qui reçoit une énergie thermique solaire de puissance $p_s S$ (avec $p_s = 340 \text{ W.m}^{-2}$). Il en réfléchit la fraction A et en absorbe donc la fraction $(1 - A)$. A s'appelle l'**albédo** terrestre moyen ($A = 0,34$). A est sans unité. Plus la surface est blanche, plus A est proche de 1, plus elle est noire, plus A est proche de 0. La puissance thermique reçue par le système vaut donc $(1 - A)p_s S$.



• **Puissance thermique perdue :**

La Terre (considérée comme un corps noir) émet par rayonnement la puissance thermique $\sigma T_T^4 S$ (avec T_T sa température de surface). L'atmosphère absorbe une fraction a du rayonnement terrestre et la fraction $(1 - a)$ est émise dans le cosmos. a est le **coefficient d'absorption** moyen ($a = 0,45$). Plus la quantité de gaz à effet de serre est grande dans l'atmosphère, plus a est grand. La puissance thermique perdue par le système vaut donc $(1 - a)\sigma T_T^4 S$.

• **Bilan thermique :**

À l'équilibre thermique, on doit avoir $(1 - A)p_s S = (1 - a)\sigma T_T^4 S$.

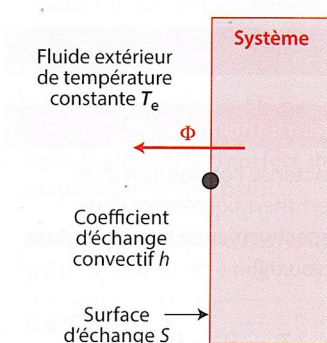
On en déduit
$$T_T = \sqrt[4]{\frac{(1 - A) \times p_s}{(1 - a) \times \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0,34) \times 340}{(1 - 0,45) \times 5,67 \times 10^{-8}}} = 291 \text{ K} = 18,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Conséquences :

- Plus l'albédo A est grand, plus la température est petite. Or, la surface des banquises a tendance à diminuer et donc à provoquer l'augmentation de la température terrestre.
- Plus a est grand, plus la température est grande. Or la quantité de gaz à effet de serre augmente...

6°) Transfert thermique par convection

La convection thermique est un mode de transfert thermique par contact et avec déplacement de matière entre deux systèmes thermodynamiques.



On considère un système incompressible à la température T plongé dans un milieu extérieur de température T_e constante (appelé **thermostat**). Le transfert thermique qui a lieu, principalement par convection, est régi par la **loi de Newton** :

$$\Phi = h \times S \times (T_e - T)$$

Φ flux thermique en watts (W).
 S surface d'échange en mètres carrés (m^2).
 h coefficient d'échange convectif (dépend de la nature du fluide).

> Si $T_e > T$ alors $\Phi > 0$.
 Si $T_e < T$ alors $\Phi < 0$.

On applique le premier principe pour un système incompressible : $\Delta U = Q$.

Or, on a aussi $Q = P_{th} \times \Delta t = \Phi \times \Delta t = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$

Mais on sait que, pour un système incompressible :

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

On en déduit : $m \times c \times \Delta T = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$ et $\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{h \times S}{m \times c} (T_e - T)$

Si $\Delta t \rightarrow 0$ il vient $\frac{dT}{dt} = \frac{h \times S}{m \times c} (T_e - T)$ équation différentielle vérifiée par T .

La solution d'une telle équation est du type : $T = K \times e^{\frac{-h \times S}{m \times c} t} + T_e$

On détermine la constante K grâce aux conditions initiales : à $t = 0$ s, $T = T_i$.

Donc $T_i = K \times e^{\frac{-h \times S}{m \times c} 0} + T_e = K + T_e$ donc $K = T_i - T_e$

La solution de l'équation différentielle est donc : $T = (T_i - T_e) \times e^{\frac{-h \times S}{m \times c} t} + T_e$