

Thermodynamique

TERMINALE

1 Décrire un système : le modèle du gaz parfait

Définition

Un **système thermodynamique** est décrit par des grandeurs **macroscopiques** — pression P , volume V , température thermodynamique T (en **kelvins**), masse volumique ρ — qui résultent toutes du comportement d'un très grand nombre d'entités microscopiques.

Propriété

Lecture microscopique des grandeurs macroscopiques :

- la **température** traduit *l'agitation thermique* : plus T est grande, plus la vitesse moyenne des entités est élevée ;
- la **pression** résulte des innombrables *chocs* des entités sur les parois ;
- la **masse volumique** traduit le nombre d'entités par unité de volume.

Propriété

Équation d'état du gaz parfait :

$$P V = n R T$$

P en Pa, V en m^3 , n en mol, T en K et $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$.

Le modèle suppose des entités **ponctuelles** et **sans interaction** entre elles. Il échoue donc aux **fortes pressions** (le volume propre des entités n'est plus négligeable) et aux **basses températures**, où les interactions provoquent la liquéfaction — qu'aucun gaz parfait ne connaîtrait.

Méthode — Exploiter l'équation d'état

Quel volume occupe $n = 1,0$ mol de dioxygène à $\theta = 20^\circ\text{C}$ sous $P = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$?

1. Convertir la température en kelvins — l'erreur la plus fréquente :

$$T = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

2. Isoler le volume :

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{1,0 \times 8,314 \times 293}{1,013 \times 10^5} = 2,4 \times 10^{-2} \text{ m}^3 = 24 \text{ L}$$

3. Contrôle : on retrouve le volume molaire usuel des gaz, environ 24 L/mol dans les conditions ambiantes. ✓

2 Énergie interne et premier principe

Définition

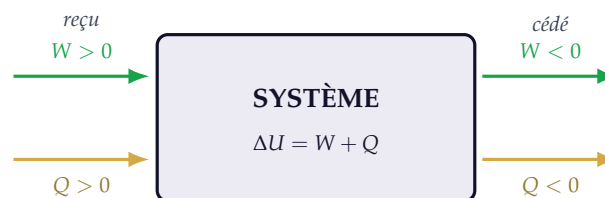
L'**énergie interne** U d'un système est la somme de toutes les énergies *microscopiques* qu'il contient : énergies cinétiques d'agitation des entités, énergies d'interaction entre elles, énergies de liaison. Elle s'exprime en joules.

Définition

Premier principe de la thermodynamique. Pour un système au repos dont l'énergie mécanique ne varie pas :

$$\Delta U = W + Q$$

ΔU est la **variation** d'énergie du système ; W le **travail** et Q le **transfert thermique** *reçus* de l'extérieur.



La convention est toujours la même : ce qui est *reçu* par le système est compté **positivement**, ce qui est *cédé* est compté **négativement**. Et surtout : ΔU décrit l'*état* du système, tandis que W et Q décrivent des *échanges* avec l'extérieur — ce ne sont pas des grandeurs de même nature.

Propriété

Sens spontané d'un transfert thermique : l'énergie va toujours du corps le plus **chaud** vers le corps le plus **froid**, jamais l'inverse.

3 Capacité thermique d'un système incompressible

Propriété

Pour un système **incompressible** (liquide ou solide), l'énergie interne ne dépend que de la température :

$$\Delta U = C \Delta T = m c (T_f - T_i)$$

C est la **capacité thermique** du système (J/K) et c sa **capacité thermique massique** (J/(kg K)).

Capacités thermiques massiques : eau liquide $c = 4185 \text{ J}/(\text{kg K})$; aluminium $900 \text{ J}/(\text{kg K})$; air $1000 \text{ J}/(\text{kg K})$. Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$.

Méthode — Bilan énergétique d'un chauffage

Une bouilloire de puissance $\mathcal{P} = 2,0 \text{ kW}$ chauffe $V = 1,5 \text{ L}$ d'eau de 20°C à 100°C .

1. L'eau est incompressible et ne reçoit pas de travail : le premier principe se réduit à $\Delta U = Q$.
2. La masse d'eau vaut $m = \rho V = 1,5 \text{ kg}$, et $\Delta T = 100 - 20 = 80 \text{ K}$ — un *écart* de température est

le même en °C et en K.

$$Q = m c \Delta T = 1,5 \times 4185 \times 80 = 5,0 \times 10^5 \text{ J}$$

3. Durée théorique du chauffage, avec $Q = \mathcal{P} \Delta t$:

$$\Delta t = \frac{Q}{\mathcal{P}} = \frac{5,02 \times 10^5}{2,0 \times 10^3} = 2,5 \times 10^2 \text{ s} \approx 4 \text{ minutes}$$

4. En pratique la durée est plus longue : une partie de l'énergie chauffe la bouilloire elle-même et se dissipe dans la pièce.

4 Les trois modes de transfert thermique

Propriété

Mode	Mécanisme	Exemple
Conduction	de proche en proche, sans déplacement de matière	la cuillère dans la casserole
Convection	par déplacement de matière (fluide)	le radiateur qui chauffe la pièce
Rayonnement	par ondes électromagnétiques, sans support	le Soleil qui chauffe la Terre

Définition

Le **flux thermique** Φ est la puissance transférée, en watts. Pour une paroi, il est relié à l'écart de température par la **résistance thermique** R_{th} (K/W) :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{th}}} \quad \text{avec, pour une paroi plane, } R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S}$$

e : épaisseur, S : surface, λ : conductivité thermique du matériau.

Méthode — Isoler un mur

Un mur de béton de surface $S = 20 \text{ m}^2$ et d'épaisseur $e = 20 \text{ cm}$ ($\lambda = 1,0 \text{ W/(m K)}$) sépare une pièce à 20°C de l'extérieur à 5°C .

1. Résistance thermique du mur nu :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{0,20}{1,0 \times 20} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ K/W}$$

2. Flux thermique perdu :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} = \frac{15}{1,0 \times 10^{-2}} = 1,5 \times 10^3 \text{ W}$$

3. On ajoute 10 cm de laine de verre ($\lambda = 0,040 \text{ W/(m K)}$). Les résistances en série **s'additionnent** :

$$R_{\text{iso}} = \frac{0,10}{0,040 \times 20} = 0,125 \text{ K/W} \quad R_{\text{tot}} = 0,125 + 0,010 = 0,135 \text{ K/W}$$

$$\Phi' = \frac{15}{0,135} = 1,1 \times 10^2 \text{ W}$$

4. Le flux est divisé par 13 : c'est l'isolant, et non le mur porteur, qui fait l'essentiel du travail.

5 Le bilan radiatif de la Terre

Propriété

Tout corps de température T rayonne. Pour un corps noir, la **loi de Stefan-Boltzmann** donne la puissance émise par unité de surface :

$$\frac{\mathcal{P}}{S} = \sigma T^4$$

L'**albédo** A est la fraction du rayonnement solaire directement *renvoyée* vers l'espace (nuages, glaces, déserts).

Méthode — Estimer la température moyenne de la Terre

Constante solaire $S_0 = 1361 \text{ W/m}^2$, albédo terrestre $A = 0,30$, rayon terrestre R_T .

1. *Reçu* : la Terre intercepte le rayonnement solaire sur son **disque** de surface πR_T^2 , et n'en absorbe que la fraction $(1 - A)$:

$$\mathcal{P}_{\text{reçu}} = (1 - A) S_0 \pi R_T^2$$

2. *Émis* : elle rayonne par toute sa **sphère**, de surface $4\pi R_T^2$:

$$\mathcal{P}_{\text{émise}} = \sigma T^4 \times 4\pi R_T^2$$

3. À l'équilibre, les deux puissances sont égales. Le terme πR_T^2 se simplifie :

$$(1 - A) S_0 = 4 \sigma T^4 \quad \Rightarrow \quad T = \left(\frac{(1 - A) S_0}{4 \sigma} \right)^{1/4}$$

$$T = \left(\frac{0,70 \times 1361}{4 \times 5,67 \times 10^{-8}} \right)^{1/4} = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$$

4. Or la température moyenne réelle est de 15°C : l'**effet de serre** apporte les 33°C manquants. Les gaz à effet de serre laissent passer le rayonnement solaire visible, mais absorbent le rayonnement infrarouge réémis par le sol et le renvoient partiellement vers la surface.

Le facteur 4 vient uniquement de la géométrie : la Terre *reçoit* sur un disque et *émet* sur une sphère, quatre fois plus grande. Un albédo plus élevé abaisse la température ; c'est pourquoi la fonte des glaces, en réduisant A , amplifie le réchauffement.

6 La loi de Newton et le refroidissement

Propriété

Un système incompressible en contact avec un **thermostat** à T_e échange un flux thermique proportionnel à l'écart de température — c'est la **loi phénoménologique de Newton** :

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

Méthode — Établir la loi d'évolution de la température

1. Premier principe pendant dt , le système ne recevant que le transfert thermique $\delta Q = -\Phi dt$ (il cède de l'énergie s'il est plus chaud) :

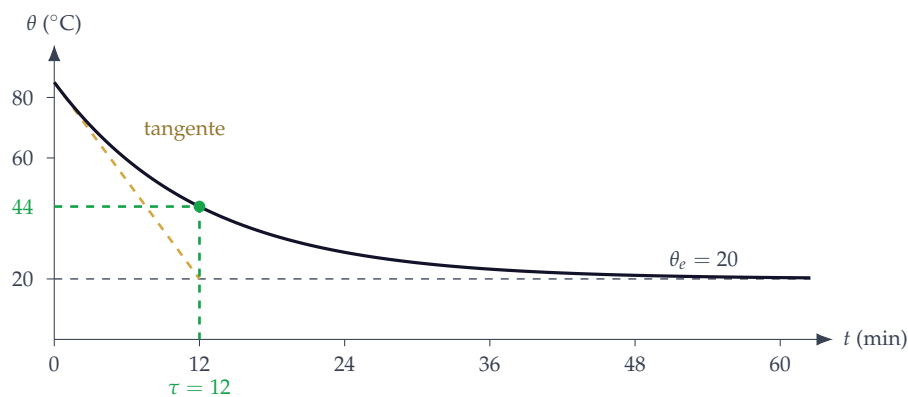
$$m c dT = -h S (T - T_e) dt$$

2. On divise par $mc dt$ et on pose $\tau = \frac{mc}{hS}$:

$$\boxed{\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_e}{\tau}}$$

3. C'est la même équation qu'au chapitre 12 : solution exponentielle plus constante. Le régime permanent impose la constante T_e , la condition initiale $T(0) = T_0$ donne l'amplitude :

$$T(t) = T_e + (T_0 - T_e) e^{-t/\tau}$$



Méthode — Refroidissement d'un café

Un café à $\theta_0 = 85^\circ\text{C}$ refroidit dans une pièce à $\theta_e = 20^\circ\text{C}$, avec $\tau = 12$ min.

1. Température au bout de τ :

$$\theta(12) = 20 + (85 - 20) e^{-1} = 20 + 65 \times 0,368 = 44^\circ\text{C}$$

2. Instant où le café atteint 55°C — température buvable :

$$55 = 20 + 65 e^{-t/12} \iff e^{-t/12} = \frac{35}{65} = 0,538$$

$$t = -12 \ln(0,538) = 7,4 \text{ min}$$

3. Contrôle : $7,4 < \tau = 12$ min, et la courbe est bien au-dessus de 44°C à cet instant. ✓

À retenir

- **Gaz parfait** : $PV = nRT$, avec T en **kelvins**. Modèle en défaut à forte pression et basse température.
- **Premier principe** : $\Delta U = W + Q$. Reçu > 0 , cédé < 0 . Le transfert thermique va toujours du chaud vers le froid.
- **Système incompressible** : $\Delta U = m c \Delta T$.
- Trois modes de transfert : **conduction** (de proche en proche), **convection** (déplacement de matière), **rayonnement** (sans support).
- $\Phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}}$; les résistances thermiques en série **s'additionnent**.
- **Bilan radiatif** : $(1 - A)S_0 = 4\sigma T^4$ donne -18°C ; l'effet de serre apporte 33°C .
- **Loi de Newton** : $T(t) = T_e + (T_0 - T_e) e^{-t/\tau}$ avec $\tau = \frac{mc}{hS}$ — même forme qu'au chapitre 12.
- **Piège** : un *écart* de température est identique en $^\circ\text{C}$ et en K, mais une température absolue doit toujours être convertie.