

Thermodynamique : premier principe et transferts thermiques

Pourquoi un café brûlant refroidit-il vite au début, puis de plus en plus lentement ? Et pourquoi la Terre serait-elle un glaçon à -18°C sans son atmosphère ?

Ce que tu vas savoir faire

- Exploiter l'équation d'état du gaz parfait $pV = nRT$ et en connaître les limites
- Effectuer un bilan d'énergie avec le premier principe $\Delta U = W + Q$ en respectant les signes
- Calculer une variation d'énergie interne $\Delta U = mc\Delta T$ pour un système incompressible
- Identifier les trois modes de transfert thermique et exploiter la relation $\Phi = \Delta T / R_{th}$
- Établir et résoudre l'équation différentielle de l'évolution de la température au contact d'un thermostat (loi de Newton), et la simuler par la méthode d'Euler
- Estimer la température moyenne de la Terre par un bilan radiatif (albédo, effet de serre)

À revoir avant de commencer

- Énergie cinétique, potentielle, mécanique et travail d'une force (fiche 10)
- Quantité de matière, masse molaire, volume molaire (Seconde)
- Puissance et énergie : $E = P \cdot \Delta t$, conversion $\text{J} \leftrightarrow \text{kWh}$ (Première)
- Fonction exponentielle et dérivée (maths)
- Équations différentielles $y' = ay + b$ (fiches 04, 05)

1 Le cours

1. Du microscopique au macroscopique : le modèle du gaz parfait

Avant un long trajet sur autoroute, on vérifie la pression des pneus « à froid ». Pourquoi ? Parce qu'en roulant, l'air du pneu s'échauffe et sa pression augmente. Pour comprendre ce genre de phénomène, on décrit la matière à deux échelles : l'échelle **microscopique** (des milliards de milliards de molécules en mouvement désordonné) et l'échelle **macroscopique** (ce qu'on mesure : pression, température, volume).

Définitions – Système et grandeurs d'état

- Un **système thermodynamique** est la portion de matière (très grand nombre d'entités) que l'on étudie ; tout le reste est l'**extérieur**. Un système **fermé** n'échange pas de matière avec l'extérieur.
- Son état est décrit par des **grandeurs macroscopiques** : pression p (Pa), volume V (m^3), température T (K), quantité de matière n (mol), masse volumique $\rho = \frac{m}{V}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).
- La **température thermodynamique** T s'exprime en kelvins : T (K) = θ ($^{\circ}\text{C}$) + 273,15. Le zéro absolu (0 K) est la température la plus basse possible.

Loi – Équation d'état du gaz parfait

Dans le modèle du **gaz parfait**, les molécules sont assimilées à des points matériels **sans interaction** entre elles (hors chocs). Pour un gaz parfait :

$$pV = nRT$$

p : pression en pascals (Pa) ; V : volume en m^3 ; n : quantité de matière en mol ; T : température en kelvins (K) ; $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$: constante des gaz parfaits.

Avec $n = \frac{m}{M}$, on obtient la masse volumique du gaz : $\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$ (M en $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Exemple résolu – La bouteille de plongée

Une bouteille de plongée de volume $V = 12 \text{ L}$ contient de l'air sous $p = 200 \text{ bar}$ à $\theta = 20^\circ \text{C}$. On assimile l'air à un gaz parfait de masse molaire $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Calculer la quantité de matière puis la masse d'air. Donnée : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$.

Solution

Conversions : $p = 200 \times 10^5 = 2,00 \times 10^7 \text{ Pa}$; $V = 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; $T = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ K}$.

Calcul littéral puis numérique : $n = \frac{pV}{RT} = \frac{2,00 \times 10^7 \times 12 \times 10^{-3}}{8,314 \times 293,15} \approx 98 \text{ mol}$ (on garde la valeur non arrondie 98,5 mol pour la suite).

$m = nM = 98,5 \times 29 \times 10^{-3} \approx 2,9 \text{ kg}$. (À 200 bar, le modèle du gaz parfait n'est qu'approximatif : voir ci-dessous.)

Interprétation microscopique

- La **pression** d'un gaz est due aux innombrables **chocs des molécules** sur les parois : plus les chocs sont nombreux et violents, plus la pression est grande.
- La **température** mesure l'**agitation thermique** : plus les molécules vont vite (en moyenne), plus la température est élevée. À 0 K, l'agitation serait minimale.

Limites du modèle du gaz parfait

Le modèle est valable pour les gaz **peu denses** : **faibles pressions** (quelques bars au plus) et températures **loin de la liquéfaction**. À haute pression ou basse température, les molécules sont proches : leur **volume propre** et leurs **interactions** ne sont plus négligeables, et $pV = nRT$ devient inexact. Il ne s'applique jamais aux liquides ni aux solides.

2. L'énergie interne d'un système

Un verre d'eau posé sur une table est immobile : son énergie mécanique ne varie pas. Pourtant, si on le chauffe, il stocke de l'énergie. Cette énergie « cachée » à l'échelle microscopique, c'est l'**énergie interne**.

Définition – Énergie interne U

L'énergie interne U (en J) d'un système est la somme :

- des **énergies cinétiques microscopiques** des entités (agitation thermique, liée à la température) ;
- des **énergies potentielles d'interaction** microscopiques entre les entités (liées à l'état physique : solide, liquide, gaz).

L'énergie totale du système est $E = E_m + U$, où $E_m = E_c + E_p$ est l'énergie mécanique **macroscopique**.

Relation – Variation d'énergie interne d'un système incompressible

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

$$\Delta U = C \Delta T = m c \Delta T \quad \text{avec } \Delta T = T_{\text{finale}} - T_{\text{initiale}}$$

ΔU en J ; C : capacité thermique du système en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$; m : masse en kg ; c : capacité thermique **massique** en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ΔT en K (un écart de 1 K vaut un écart de 1 °C).

Matériau	eau liquide	glace	huile	aluminium	fer	cuivre	plomb
$c \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$	$4,18 \times 10^3$	$2,1 \times 10^3$	$\approx 2 \times 10^3$	897	449	385	129

L'eau a une capacité thermique massique très élevée : il faut beaucoup d'énergie pour la chauffer, et elle rend beaucoup d'énergie en refroidissant (rôle régulateur des océans sur le climat).

Exemple résolu – La bouilloire

On chauffe 1,5 L d'eau ($m = 1,5 \text{ kg}$) de 20 °C à 100 °C avec une bouilloire de puissance $P = 2000 \text{ W}$. Calculer ΔU , puis la durée minimale de chauffe (sans pertes).

Solution

$$\Delta U = mc(T_f - T_i) = 1,5 \times 4,18 \times 10^3 \times (100 - 20) \approx 5,0 \times 10^5 \text{ J.}$$

Sans pertes, toute l'énergie électrique sert à chauffer l'eau : $P \Delta t = \Delta U$, d'où $\Delta t = \frac{\Delta U}{P} = \frac{5,016 \times 10^5}{2000} \approx 2,5 \times 10^2 \text{ s}$, soit environ 4 min.

3. Le premier principe de la thermodynamique

L'énergie d'un système ne peut varier que s'il en échange avec l'extérieur. Il existe deux manières d'échanger de l'énergie : par un **travail** W (action mécanique qui déplace son point d'application, travail électrique...) ou par un **transfert thermique** Q (échange désordonné d'agitation microscopique, dû à une différence de température).

Premier principe de la thermodynamique

Pour un système **fermé**, la variation de son énergie totale entre deux états est égale à la somme des énergies échangées avec l'extérieur :

$$\Delta E = \Delta E_m + \Delta U = W + Q$$

Si le système est **macroscopiquement au repos** ($\Delta E_m = 0$) :

$$\Delta U = W + Q$$

ΔU , W et Q en joules (J). **Convention** : W et Q sont **comptés positivement s'ils sont reçus** par le système, négativement s'ils sont cédés.

Méthode – Effectuer un bilan d'énergie

1. **Définir le système** (et vérifier qu'il est fermé, au repos ou non).
2. Préciser l'**état initial** et l'**état final** (températures, etc.).
3. **Recenser les transferts** W et Q avec l'extérieur et fixer leurs **signes** (reçu : +, cédé : -).
4. Écrire le premier principe $\Delta U = W + Q$ (ou $\Delta E_m + \Delta U = W + Q$), puis exprimer $\Delta U = mc\Delta T$ si le système est incompressible.
5. Isoler l'inconnue, faire l'application numérique et **vérifier la cohérence du signe**.

Exemple résolu – Les disques de frein

Une voiture de masse $M = 1200 \text{ kg}$ roulant à $v = 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ freine jusqu'à l'arrêt sur une route horizontale. On suppose que toute son énergie cinétique est convertie en énergie interne des disques de frein (acier, masse totale $m = 8,0 \text{ kg}$, $c = 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), sans transfert thermique vers l'air pendant le freinage. Estimer l'élévation de température des disques.

Solution

Système : {voiture + disques}, fermé. Il n'échange pas d'énergie avec l'extérieur pendant le freinage (on néglige l'action de l'air ; les forces de freinage entre plaquettes et disques sont intérieures au système, et la force exercée par la route sur les roues ne travaille pas car les roues roulent sans glisser) : $W + Q = 0$.

Premier principe : $\Delta E_m + \Delta U = 0$, avec $\Delta E_m = 0 - \frac{1}{2}Mv^2$ et $\Delta U = mc\Delta T$ (seuls les disques s'échauffent).

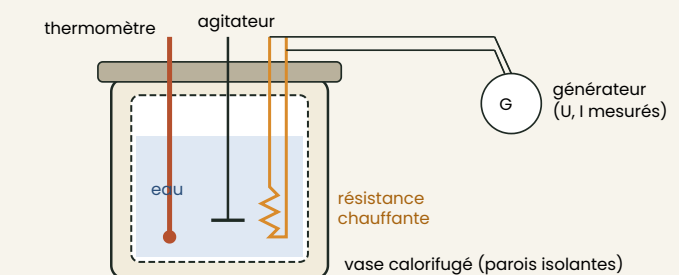
$$\text{D'où } \Delta T = \frac{Mv^2}{2mc}. \text{ Avec } v = \frac{90}{3,6} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} : \Delta T = \frac{1200 \times 25^2}{2 \times 8,0 \times 460} \approx 1,0 \times 10^2 \text{ K}.$$

Les disques gagnent environ 100°C en un seul freinage : c'est pourquoi ils sont ventilés.

Au labo – Mesurer une capacité thermique massique (calorimétrie)

Méthode électrique. On place une masse m d'eau (ou de liquide étudié) dans un calorimètre muni d'une résistance chauffante alimentée sous une tension U , parcourue par un courant I . On agite et on relève la température toutes les 30 s pendant une durée Δt . Le système {liquide + calorimètre} reçoit le travail électrique $W = UI\Delta t$; si le calorimètre est parfait, $Q \approx 0$ et $(mc + C_{\text{cal}})\Delta T = UI\Delta t$. La pente de la droite $\theta = f(t)$ donne c .

Méthode des mélanges. On plonge un solide chaud dans de l'eau froide du calorimètre et on mesure la température finale d'équilibre. Le système global est isolé : $\Delta U_{\text{eau}} + \Delta U_{\text{solide}} (+\Delta U_{\text{cal}}) = 0$ (voir exercice 2).



Calorimètre : un récipient isolé limite les transferts thermiques avec l'extérieur.

4. Les transferts thermiques

Le transfert thermique se fait **spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid**, jusqu'à l'égalité des températures (équilibre thermique). Il ne s'arrête que lorsque les températures sont égales.

Définitions – Les trois modes de transfert thermique

- **Conduction** : transfert de proche en proche de l'agitation thermique, **sans déplacement de matière** à l'échelle macroscopique. Mode principal dans les solides (casserole dont le manche chauffe). Les métaux sont bons conducteurs ; l'air immobile, la laine de verre, le polystyrène sont des isolants.
- **Convection** : transfert associé à un **déplacement macroscopique de matière** dans un fluide (liquide, gaz) : l'eau chaude monte dans une casserole, l'air chaud monte au-dessus d'un radiateur.
- **Rayonnement** : transfert par **ondes électromagnétiques** émises ou absorbées ; il se propage **même dans le vide**. Tout corps émet un rayonnement qui dépend de sa température (infrarouge à température ambiante) : Soleil, braises, corps humain.

Définition – Flux thermique

Le **flux thermique** Φ est l'énergie transférée thermiquement par unité de temps : c'est une **puissance**. Si Φ est constant pendant Δt :

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad \Phi \text{ en watts (W)}, Q \text{ en J}, \Delta t \text{ en s.}$$

Relation – Résistance thermique d'une paroi

À travers une paroi dont les faces sont aux températures $T_1 > T_2$ (en régime permanent), le flux thermique qui va de la face 1 vers la face 2 est proportionnel à l'écart de température :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

Φ en W ; $T_1 - T_2$ en K ; R_{th} : **résistance thermique** en $K \cdot W^{-1}$. Plus R_{th} est grande, plus la paroi est isolante.

Pour une paroi plane d'épaisseur e (m), de surface S (m^2) et de conductivité thermique λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), l'expression (donnée dans les sujets) est $R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$. Pour des parois accolées (**en série**), les résistances thermiques s'additionnent.

Matériau	cuivre	acier	béton	verre	eau	bois	laine de verre, polystyrène	air immobile
λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	≈ 400	≈ 50	$\approx 1,5$	≈ 1	0,6	$\approx 0,15$	$\approx 0,035$	0,025

Exemple résolu – Simple ou double vitrage ?

Une fenêtre de surface $S = 2,0 \text{ m}^2$ sépare une pièce à 20°C de l'extérieur à 5°C (températures supposées égales à celles des faces du vitrage). Comparer le flux thermique à travers : (a) un simple vitrage de 4 mm ($\lambda_{\text{verre}} = 1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ; (b) un double vitrage « 4-16-4 » (deux verres de 4 mm séparés par 16 mm d'air immobile, $\lambda_{\text{air}} = 0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Solution

$$(a) R_{th} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{4 \times 10^{-3}}{1,0 \times 2,0} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}, \text{ donc } \Phi = \frac{20 - 5}{2,0 \times 10^{-3}} = 7,5 \times 10^3 \text{ W.}$$

(b) Couche d'air : $R_{\text{air}} = \frac{16 \times 10^{-3}}{0,025 \times 2,0} = 0,32 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. En série : $R_{\text{tot}} = 2 \times 2,0 \times 10^{-3} + 0,32 = 0,324 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$, donc $\Phi = \frac{15}{0,324} \approx 46 \text{ W}$.

C'est l'**air immobile** qui isole : le flux est divisé par plus de 150 ! (En réalité, les échanges par convection et rayonnement près des vitres et dans la lame d'air modifient ces valeurs : le calcul donne un ordre de grandeur.)

5. Évolution de la température au contact d'un thermostat

Un café à 90°C posé dans une pièce à 20°C refroidit d'abord vite, puis de plus en plus lentement : plus l'écart de température est faible, plus le transfert thermique est lent. C'est ce que décrit la loi de Newton.

Un **thermostat** est un système dont la température T_{th} reste **constante** quels que soient les échanges thermiques qu'il subit (l'air d'une pièce, l'océan, l'atmosphère pour un petit objet...).

Loi phénoménologique de Newton (transferts conducto-convectifs)

Le flux thermique **reçu** par un système de température T , de surface d'échange S , au contact d'un fluide thermostat de température T_{th} , est :

$$\Phi = h S (T_{\text{th}} - T)$$

Φ en W ; h : coefficient d'échange conducto-convectif en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; S en m^2 ; températures en K (ou $^\circ\text{C}$, seul l'écart compte). Si $T > T_{\text{th}}$, $\Phi < 0$: le système **cède** de l'énergie.

Établir l'équation différentielle À SAVOIR ÉTABLIR

Système : incompressible, de capacité thermique $C = mc$, au repos, n'échangeant aucun travail ($W = 0$).

Entre t et $t + dt$, sa température varie de dT et il reçoit $\delta Q = \Phi dt$. Premier principe : $dU = \delta Q$, soit $C dT = hS(T_{\text{th}} - T) dt$.

En divisant par $C dt$:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{hS}{C} (T_{\text{th}} - T) \iff \frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{\text{th}}}{\tau} \quad \text{avec } \tau = \frac{C}{hS} = \frac{mc}{hS}.$$

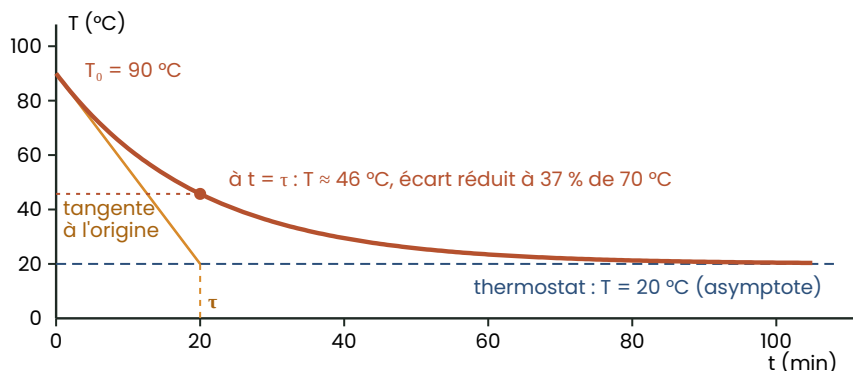
Résolution : c'est une équation $y' = ay + b$ avec $a = -\frac{1}{\tau}$ et $b = \frac{T_{\text{th}}}{\tau}$. Ses solutions sont $T(t) = K e^{-t/\tau} + T_{\text{th}}$ (solution générale de l'équation homogène + solution particulière constante T_{th}). La condition initiale $T(0) = T_0$ donne $K = T_0 - T_{\text{th}}$.

Vérification : $\frac{dT}{dt} = -\frac{T_0 - T_{\text{th}}}{\tau} e^{-t/\tau}$ et $\frac{T}{\tau} = \frac{T_0 - T_{\text{th}}}{\tau} e^{-t/\tau} + \frac{T_{\text{th}}}{\tau}$: la somme vaut bien $\frac{T_{\text{th}}}{\tau}$.

Loi d'évolution de la température

$$T(t) = T_{th} + (T_0 - T_{th}) e^{-t/\tau} \quad \tau = \frac{mc}{hS} \text{ (en s)}$$

- La température tend vers T_{th} (équilibre thermique) ; l'écart $T - T_{th}$ décroît exponentiellement.
- À $t = \tau$, l'écart ne vaut plus que $e^{-1} \approx 37\%$ de l'écart initial (il a diminué de 63 %). À $t = 5\tau$, il reste moins de 1 % : on considère l'équilibre atteint.
- La tangente à l'origine coupe l'asymptote $T = T_{th}$ à la date $t = \tau$.
- Plus τ est grand (grande masse, faible surface, faible h), plus l'évolution est lente.



Refroidissement d'un café ($T_0 = 90\text{ °C}$, $T_{th} = 20\text{ °C}$, $\tau = 20\text{ min}$) : lecture graphique de τ .

Exemple résolu – Le café qui refroidit

Avec les valeurs de la figure ($T_0 = 90\text{ °C}$, $T_{th} = 20\text{ °C}$, $\tau = 20\text{ min}$) : (a) quelle est la température au bout de 15 min ? (b) au bout de combien de temps le café est-il à 50 °C ?

Solution

(a) $T(15) = 20 + (90 - 20) e^{-15/20} = 20 + 70 e^{-0,75} \approx 53\text{ °C}$.

(b) On résout $50 = 20 + 70 e^{-t/\tau}$: $e^{-t/\tau} = \frac{30}{70}$, donc $t = \tau \ln\left(\frac{70}{30}\right) = 20 \times \ln(2,33) \approx 17\text{ min}$.

Méthode – Déterminer τ à partir d'un relevé expérimental

- **Méthode des 37 %** : on cherche la date où $T - T_{th} = 0,37 (T_0 - T_{th})$; cette date est τ .
- **Méthode de la tangente à l'origine** : elle coupe l'asymptote $T = T_{th}$ en $t = \tau$.
- **Méthode du logarithme** : $\ln(T - T_{th}) = \ln(T_0 - T_{th}) - \frac{t}{\tau}$ est une fonction **affine** du temps. Si les points sont alignés, la loi de Newton est validée et la pente vaut $-\frac{1}{\tau}$ (cas $T_0 > T_{th}$; sinon on utilise $\ln(T_{th} - T)$).

Au labo – Suivre un refroidissement

De l'eau chaude (environ 70 °C) refroidit dans un bécher posé dans la salle (thermostat à T_{th}). Une sonde reliée à une interface d'acquisition (ou un microcontrôleur) relève T toutes les 10 s pendant 30 min. Le tracé de $\ln(T - T_{th})$ en fonction de t est une droite : la loi de Newton est validée et la pente donne τ . Avec un bécher isolé (laine, polystyrène), h diminue donc τ augmente.

6. Le bilan radiatif de la Terre et l'effet de serre

La Terre reçoit le rayonnement du Soleil et émet elle-même de l'infrarouge. Sa température moyenne est stable car **la puissance absorbée égale la puissance émise**.

Loi de Stefan-Boltzmann et albédo (lois données dans les sujets)

- **Loi de Stefan-Boltzmann** : un corps (modélisé comme un « corps noir ») de température de surface T émet une puissance par unité de surface $p = \sigma T^4$ (p en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, T en K, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).
- **Albédo** A : fraction de la puissance solaire reçue qui est **réfléchie** (sans nombre ni unité, entre 0 et 1). Neige fraîche : $\approx 0,8$; océan : $\approx 0,06$; Terre en moyenne : $A \approx 0,30$.

Exemple résolu – Température de la Terre sans effet de serre

La Terre (rayon R_T) reçoit du Soleil une puissance surfacique $S_0 = 1,36 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ sur son disque apparent de surface πR_T^2 . Elle réfléchit une fraction $A = 0,30$ et émet selon la loi de Stefan-Boltzmann par toute sa surface $4\pi R_T^2$. Estimer sa température d'équilibre T_e en l'absence d'atmosphère.

Solution

Puissance absorbée : $P_{\text{abs}} = (1 - A) S_0 \pi R_T^2$. Puissance émise : $P_{\text{ém}} = \sigma T_e^4 \times 4\pi R_T^2$.

À l'équilibre, $P_{\text{abs}} = P_{\text{ém}}$: $T_e = \left(\frac{(1 - A) S_0}{4\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{0,70 \times 1,36 \times 10^3}{4 \times 5,67 \times 10^{-8}} \right)^{1/4} \approx 255 \text{ K}$, soit environ -18°C .

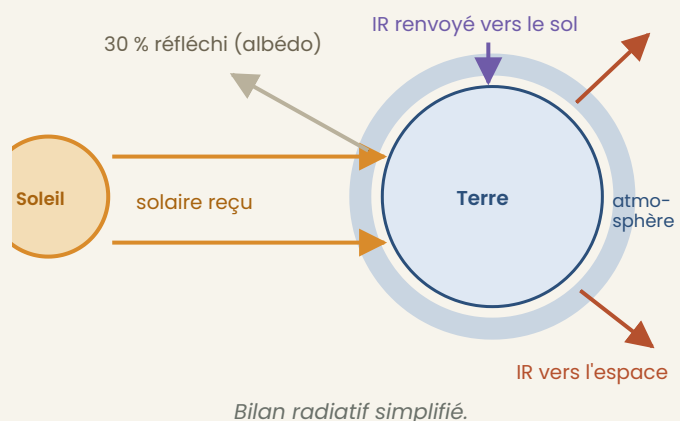
Or la température moyenne réelle est d'environ 288 K (15°C). Les 33 K d'écart sont dus à l'**effet de serre**.

Effet de serre et rôle de l'albédo (qualitatif)

- L'atmosphère est quasi transparente au rayonnement visible du Soleil, mais certains gaz (H_2O , CO_2 , CH_4 ...)

absorbent l'infrarouge émis par le sol et en **réémettent une partie vers le sol**. Le sol reçoit donc plus de puissance et se réchauffe jusqu'à un nouvel équilibre : c'est l'**effet de serre**, naturel et indispensable à la vie.

- L'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre due aux activités humaines renforce cet effet : réchauffement climatique.
- Si l'albédo **augmente** (plus de neige, de nuages bas), la Terre absorbe moins : T_e **diminue**. La fonte des glaces diminue l'albédo, ce qui accentue le réchauffement (rétroaction positive).



2 Les pièges à éviter

Attention – Les erreurs classiques

- **Les unités dans $pV = nRT$.** Tout en SI : p en **Pa** (pas en bar ni en hPa : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$, $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$), V en m^3 ($1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$), T en **kelvins**. Utiliser des $^\circ\text{C}$ dans $pV = nRT$ donne des résultats absurdes (à 0°C , on trouverait $pV = 0$!). En revanche, un **écart** ΔT a la même valeur en K et en $^\circ\text{C}$.
- **Les signes de W et Q .** Reçu : positif ; cédé : négatif. Un corps qui refroidit a $\Delta U < 0$ et, s'il n'échange que de l'énergie thermique, $Q < 0$. Toujours vérifier que le signe du résultat a un sens physique.
- **Température, chaleur, énergie interne.** La **température** (K) est une grandeur d'état ; le **transfert thermique** Q (J) est un échange ; l'**énergie interne** U (J) est une énergie stockée : ΔU ne dépend que des états initial et final, alors que W et Q n'existent que pendant la transformation. On ne dit donc jamais « le système contient de la chaleur », mais « il **reçoit** un transfert thermique ». On peut chauffer un système sans que sa température change (pendant un changement d'état, l'énergie reçue modifie les interactions microscopiques).
- **Pression absolue et pression relative.** Un manomètre de pneu affiche souvent la surpression par rapport à l'atmosphère. Dans $pV = nRT$, il faut la **pression absolue** (ajouter environ 1 bar si l'énoncé parle de pression relative).
- **Le sens du flux dans la loi de Newton.** $\Phi = hS(T_{\text{th}} - T)$ est le flux **reçu** par le système. Écrire $hS(T - T_{\text{th}})$ par erreur mène à une solution qui diverge (exponentielle croissante), ce qui est physiquement impossible : la température doit tendre vers T_{th} .
- **τ et les durées.** $\tau = \frac{mc}{hS}$ est en **secondes** si toutes les grandeurs sont en SI. Au bout de τ , l'équilibre n'est **pas** atteint (il reste 37 % de l'écart) : il faut environ 5τ .

3 Avec Python

La **méthode d'Euler** permet de résoudre numériquement l'équation $\frac{dT}{dt} = \frac{T_{\text{th}} - T}{\tau}$ sans connaître la solution exacte. Idée : sur un petit pas Δt , on assimile la courbe à sa tangente :

$$T(t + \Delta t) \approx T(t) + \Delta t \times \frac{dT}{dt}(t) = T(t) + \Delta t \times \frac{T_{\text{th}} - T(t)}{\tau}.$$

```
from math import exp

T_th, T0 = 20.0, 90.0      # thermostat et température initiale (°C)
tau, dt = 20.0, 1.0       # constante de temps et pas (min)

t, T = 0.0, T0
print(" t (min) | Euler (°C) | exacte (°C)")
for k in range(61):       # 60 pas de 1 min
    if k % 20 == 0:        # affichage toutes les 20 min
        exacte = T_th + (T0 - T_th) * exp(-t / tau)
        print(f"{t:8.0f} | {T:10.2f} | {exacte:11.2f}")
    T = T + dt * (T_th - T) / tau  # Euler : dT/dt = (T_th - T)/tau
    t = t + dt
```

Python

Affichage obtenu dans la console :

t (min)	Euler (°C)	exacte (°C)
0	90.00	90.00
20	45.09	45.75
40	29.00	29.47
60	23.22	23.49

Python

La méthode d'Euler donne des valeurs un peu trop basses (la tangente « anticipe » la baisse), mais l'écart reste inférieur à 1 °C. En diminuant le pas ($\Delta t = 0,1 \text{ min}$), l'écart devient inférieur à 0,1 °C. Avec matplotlib, on tracerait les deux courbes quasi superposées.

4 Exercices

Exercice 1 – La pression des pneus ★

Un pneu de volume $V = 25 \text{ L}$ (supposé constant) est gonflé à la pression absolue $p_1 = 2,2 \text{ bar}$ à $\theta_1 = 15 \text{ °C}$. L'air est assimilé à un gaz parfait.

1. Calculer la quantité de matière d'air dans le pneu.
2. Après un long trajet, l'air du pneu est à $\theta_2 = 45 \text{ °C}$. Calculer la nouvelle pression p_2 .
3. Interpréter qualitativement cette augmentation à l'échelle microscopique.

Exercice 2 – Identifier un métal par calorimétrie ★★

Un bloc métallique de masse $m_b = 200 \text{ g}$, chauffé à $\theta_b = 95,0 \text{ °C}$, est plongé dans $m_e = 300 \text{ g}$ d'eau à $\theta_e = 20,0 \text{ °C}$ contenue dans un calorimètre de capacité thermique négligeable. La température d'équilibre est $\theta_f = 24,3 \text{ °C}$.

1. Pourquoi peut-on considérer le système {eau + bloc} comme isolé ? Que vaut sa variation d'énergie interne ?
2. Établir l'expression de la capacité thermique massique c_b du métal, puis la calculer.
3. À l'aide du tableau du cours, identifier le métal.

Exercice 3 – Isoler un mur ★★

Un mur de surface $S = 10 \text{ m}^2$ est en béton d'épaisseur $e_1 = 15 \text{ cm}$ ($\lambda_1 = 1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). La face intérieure est à 19 °C , la face extérieure à -1 °C . On donne $R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S}$.

1. Dans quel sens s'effectue le transfert thermique ? Par quel mode, à travers le mur ?
2. Calculer la résistance thermique du mur et le flux thermique qui le traverse.
3. On ajoute une couche de polystyrène de 10 cm ($\lambda_2 = 0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Calculer le nouveau flux, puis l'énergie perdue en 24 h (en kWh).

Exercice 4 – Type bac : une canette au frais ★★★

Une canette de soda sortie d'un placard à $\theta_0 = 26,0 \text{ °C}$ est placée dans un réfrigérateur dont l'air est à $\theta_f = 4,0 \text{ °C}$. On étudie le système {canette + contenu}, assimilé à de l'eau de masse $m = 0,34 \text{ kg}$.

Document 1 – Données. $c = 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; surface d'échange de la canette : $S = 0,030 \text{ m}^2$. Loi de Newton : flux thermique reçu par le système $\Phi = hS(\theta_f - \theta)$.

Document 2 — Relevé de température de la canette.

t (min)	0	10	20	30	40	60	80
θ (°C)	26,0	21,1	17,3	14,4	12,1	8,9	7,0

- Justifier que l'air du réfrigérateur peut être considéré comme un thermostat. Préciser le sens du transfert thermique.
- Calculer la variation d'énergie interne du système quand sa température passe de 26,0 °C à 6,0 °C. Commenter son signe.
- En appliquant le premier principe entre t et $t + dt$, établir l'équation différentielle $\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau} = \frac{\theta_f}{\tau}$ et exprimer τ .
- Vérifier que $\theta(t) = \theta_f + (\theta_0 - \theta_f)e^{-t/\tau}$ est solution et respecte la condition initiale.
- Déterminer τ à partir du document 2 (méthode des 37 %), puis vérifier avec le logarithme en utilisant les points $t = 0$ et $t = 80$ min.
- En déduire la valeur du coefficient d'échange h .
- Au bout de combien de temps la canette atteint-elle 6,0 °C ?
- Pressé, on la place plutôt dans le congélateur (−18 °C), en supposant h inchangé. Calculer la nouvelle durée pour atteindre 6,0 °C. Pourquoi ne faut-il pas l'y oublier ?
- Écrire la relation de récurrence permettant de calculer θ_{k+1} à partir de θ_k par la méthode d'Euler, avec un pas Δt .

5 Teste-toi (QCM)

- Une température de 27 °C correspond à :
A. 246 K
B. 300 K
C. 27 K
D. 373 K
- Un gaz reçoit un travail $W = 200$ J et cède un transfert thermique de 500 J. Sa variation d'énergie interne vaut :
A. +700 J
B. −300 J
C. +300 J
D. −700 J
- L'unité SI de la résistance thermique est :
A. $W \cdot K^{-1}$
B. $K \cdot W^{-1}$
C. $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
D. $J \cdot K^{-1}$
- Le seul mode de transfert thermique possible dans le vide est :
A. la conduction
B. la convection
C. le rayonnement
D. aucun
- Un objet est au contact d'un thermostat. À la date $t = 3\tau$, l'écart $|T - T_{th}|$ vaut environ :
A. 63 % de l'écart initial
B. 37 % de l'écart initial
C. 5 % de l'écart initial
D. 0 : l'équilibre est atteint

6 Si l'albédo moyen de la Terre augmentait, sa température d'équilibre radiatif :

A. augmenterait

B. diminuerait

C. resterait identique

D. deviendrait nulle

L'essentiel à retenir

- $T \text{ (K)} = \theta \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15$; pression : chocs des molécules ; température : agitation thermique.
- Gaz parfait : $pV = nRT$ (p en Pa, V en m^3 , T en K, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ; valable aux faibles pressions.
- U = énergies cinétiques microscopiques + énergies potentielles d'interaction ; $E = E_m + U$.
- Système incompressible : $\Delta U = mc \Delta T$ (c en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; eau : $4,18 \times 10^3$).
- Premier principe (système fermé au repos) : $\Delta U = W + Q$, transferts comptés positivement s'ils sont reçus.
- Transfert thermique spontané du chaud vers le froid ; conduction, convection, rayonnement (même dans le vide).
- Flux thermique $\Phi = Q/\Delta t \text{ (W)}$; $\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{th}}}$ (R_{th} en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), $R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S}$.
- Loi de Newton : $\Phi = hS(T_{\text{th}} - T)$ (h en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).
- $T(t) = T_{\text{th}} + (T_0 - T_{\text{th}}) e^{-t/\tau}$ avec $\tau = \frac{mc}{hS}$; 37 % de l'écart à τ , équilibre vers 5τ .
- Euler : $T_{k+1} = T_k + \Delta t \frac{T_{\text{th}} - T_k}{\tau}$.
- Stefan-Boltzmann : $p = \sigma T^4$; Terre sans effet de serre : $T_e = \left(\frac{(1-A)S_0}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 255 \text{ K}$.
- Effet de serre : l'atmosphère absorbe l'IR du sol et en renvoie une partie ; albédo plus grand : Terre plus froide.

Exercice 1

- $p_1 = 2,2 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V = 25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $T_1 = 288,15 \text{ K}$: $n = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{2,2 \times 10^5 \times 25 \times 10^{-3}}{8,314 \times 288,15} \approx 2,3 \text{ mol}$.
- n et V constants : $\frac{p}{T} = \frac{nR}{V}$ est constant, donc $p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2,2 \times \frac{318,15}{288,15} \approx 2,4 \text{ bar}$ (températures obligatoirement en kelvins !).
- En s'échauffant, les molécules s'agitent plus vite : elles heurtent les parois plus souvent et plus violemment, donc la pression augmente.

Exercice 2

- Le calorimètre limite les échanges avec l'extérieur (et sa capacité est négligée) : pas de transfert thermique avec l'extérieur ($Q = 0$), pas de travail ($W = 0$). Premier principe : $\Delta U = \Delta U_{\text{eau}} + \Delta U_{\text{bloc}} = 0$.
- $m_e c_e (\theta_f - \theta_e) + m_b c_b (\theta_f - \theta_b) = 0$, d'où $c_b = \frac{m_e c_e (\theta_f - \theta_e)}{m_b (\theta_b - \theta_f)} = \frac{0,300 \times 4,18 \times 10^3 \times 4,3}{0,200 \times 70,7} \approx 3,8 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- La valeur (≈ 381) est proche de celle du **cuivre** ($385 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). L'écart vient des pertes et de la capacité du calorimètre négligée.

Exercice 3

- De l'intérieur (chaud) vers l'extérieur (froid), par conduction à travers le mur.
- $R_1 = \frac{0,15}{1,5 \times 10} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$; $\Phi_1 = \frac{19 - (-1)}{1,0 \times 10^{-2}} = 2,0 \times 10^3 \text{ W}$.
- $R_2 = \frac{0,10}{0,035 \times 10} \approx 0,286 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. En série : $R = R_1 + R_2 \approx 0,296 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$; $\Phi = \frac{20}{0,296} \approx 68 \text{ W}$ (environ 30 fois moins). En 24 h : $Q = \Phi \Delta t = 67,6 \times 86\,400 \approx 5,8 \times 10^6 \text{ J} \approx 1,6 \text{ kWh}$ (contre 48 kWh sans isolant).

Exercice 4

- La masse d'air (et le système de régulation du réfrigérateur) est telle que sa température reste constante malgré l'énergie reçue de la canette : c'est un thermostat. Le transfert se fait de la canette (chaude) vers l'air (froid) : la canette cède de l'énergie.
- $\Delta U = mc(\theta_{\text{fin}} - \theta_0) = 0,34 \times 4,18 \times 10^3 \times (6,0 - 26,0) \approx -2,8 \times 10^4 \text{ J}$. Négatif : l'énergie interne du système diminue, il cède de l'énergie à l'air.
- Pas de travail, donc $dU = \delta Q = \Phi dt$: $mc d\theta = hS(\theta_f - \theta) dt$, d'où $\frac{d\theta}{dt} + \frac{hS}{mc} \theta = \frac{hS}{mc} \theta_f$. Par identification, $\tau = \frac{mc}{hS}$.
- Même calcul que dans l'encadré « Établir l'équation différentielle » du cours (avec θ à la place de T) : en dérivant, $\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau} = \frac{\theta_f}{\tau}$; et $\theta(0) = \theta_f + (\theta_0 - \theta_f) = \theta_0$.
- Écart initial : $26,0 - 4,0 = 22,0 \text{ }^\circ\text{C}$; 37 % de l'écart : $0,37 \times 22,0 \approx 8,1 \text{ }^\circ\text{C}$, soit $\theta = 4,0 + 8,1 = 12,1 \text{ }^\circ\text{C}$, atteint à $t = 40 \text{ min}$: $\tau \approx 40 \text{ min}$.

Logarithme : $\ln(\theta - \theta_f)$ passe de $\ln 22,0 \approx 3,09$ à $\ln 3,0 \approx 1,10$ en 80 min ; pente $\approx \frac{1,10 - 3,09}{80} \approx -0,025 \text{ min}^{-1}$, donc $\tau \approx \frac{1}{0,025} = 40 \text{ min}$. Les deux méthodes concordent.

$$6. h = \frac{mc}{\tau S} = \frac{0,34 \times 4,18 \times 10^3}{2400 \times 0,030} \approx 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ (avec } \tau = 40 \text{ min} = 2400 \text{ s)}.$$

$$7. 6,0 = 4,0 + 22,0 e^{-t/\tau}, \text{ donc } t = \tau \ln\left(\frac{22,0}{2,0}\right) = 40 \ln 11 \approx 96 \text{ min, soit environ 1 h 36 min.}$$

8. Écart initial : $26,0 - (-18) = 44 \text{ }^\circ\text{C}$; il faut atteindre un écart de $6,0 - (-18) = 24 \text{ }^\circ\text{C}$: $t = 40 \ln\left(\frac{44}{24}\right) \approx 24 \text{ min}$. Si on l'oublie, la température continue de baisser vers $-18 \text{ }^\circ\text{C}$: le soda gèle, se dilate et la canette peut éclater.

$$9. \theta_{k+1} = \theta_k + \Delta t \times \frac{\theta_f - \theta_k}{\tau}.$$

QCM

1. B ($27 + 273,15 \approx 300 \text{ K}$) · 2. B ($\Delta U = W + Q = 200 + (-500) = -300 \text{ J}$) · 3. B ($R_{\text{th}} = \Delta T / \Phi$) · 4. C (le rayonnement, onde électromagnétique ; conduction et convection nécessitent de la matière) · 5. C ($e^{-3} \approx 0,050$) · 6. B (plus de puissance réfléchiée, moins de puissance absorbée, donc T_e plus faible).