

Thermodynamique : énergie interne et transferts thermiques

COURS • P12 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	8
Méthodes et pièges	9
Vers le PASS	9
Exercices	10
Corrigés	11

Ce que tu dois savoir faire

- Décrire un système thermodynamique par ses variables d'état (pression, volume, température, quantité de matière) et convertir une température en kelvins.
- Énoncer les hypothèses du modèle du gaz parfait et exploiter l'équation d'état $P V = n R T$, en citant ses limites de validité.
- Définir l'énergie interne d'un système et l'interpréter à l'échelle microscopique.
- Énoncer et appliquer le premier principe de la thermodynamique $\Delta U = W + Q$, avec la convention de signe des énergies reçues.
- Exploiter la relation $\Delta U = C \Delta T = m c \Delta T$ pour un système incompressible, et réaliser un bilan d'énergie de type calorimétrique.
- Identifier les trois modes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement) et en donner une interprétation microscopique.
- Exploiter la relation entre flux thermique, écart de température et résistance thermique, y compris pour des parois en série.
- Établir et résoudre l'équation différentielle de l'évolution de la température d'un système selon la loi de Newton, et interpréter la constante de temps.
- Effectuer un bilan d'énergie pour le système Terre-atmosphère et expliquer l'effet de serre.

Cours

1. Système thermodynamique et variables d'état

Un **système** est la partie de l'Univers que l'on choisit d'étudier ; tout le reste est le **milieu extérieur**. Un système est **fermé** s'il n'échange pas de matière avec l'extérieur, **isolé** s'il n'échange ni matière ni énergie. Dans ce chapitre, les systèmes étudiés sont fermés.

L'état d'un système macroscopique à l'équilibre est décrit par un petit nombre de **variables d'état** mesurables : pression P , volume V , température T , quantité de matière n . Elles résument le comportement moyen d'un nombre gigantesque d'entités (de l'ordre de 10^{23} dans un échantillon courant).

La **température** est liée à l'agitation des entités microscopiques : plus elles s'agitent, plus la température est élevée. En thermodynamique, on utilise la **température absolue**, en kelvins (K) :

$$T \text{ (en K)} = \theta \text{ (en } ^\circ\text{C)} + 273,15$$

Le zéro absolu (0 K, soit $-273,15^\circ\text{C}$) correspond à l'agitation minimale ; il n'existe pas de température plus basse. Un écart de température a la même valeur en kelvins et en degrés Celsius : passer de 20°C à 30°C , c'est augmenter T de 10 K.

2. Le modèle du gaz parfait

Hypothèses du modèle. Un gaz parfait est un gaz dont :

- les entités sont assimilées à des points matériels (leur volume propre est négligeable devant le volume occupé par le gaz) ;
- les entités n'interagissent pas entre elles à distance, sauf lors de chocs brefs.

Ce modèle décrit bien les gaz réels lorsque les entités sont très espacées, c'est-à-dire à **basse pression** (de l'ordre de quelques bars au plus) et à température pas trop basse, loin de la liquéfaction.

Équation d'état. Pour un gaz parfait :

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

avec P en Pa, V en m^3 , n en mol, T en K et $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (constante des gaz parfaits). Toutes les unités doivent être celles du Système international : c'est la source d'erreur la plus fréquente.

Conséquences.

- À n et T fixés, $P \times V = \text{constante}$: c'est la loi de Boyle-Mariotte, déjà rencontrée.
- À n et V fixés, $P / T = \text{constante}$: la pression d'un gaz enfermé augmente quand on le chauffe (pneu au soleil, bouteille près d'une flamme).
- À n et P fixés, $V / T = \text{constante}$: un gaz chauffé à pression constante se dilate.
- Le **volume molaire** $V(m) = V / n = R T / P$ ne dépend que de T et P , pas de la nature du gaz. À 20°C sous $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$: $V(m) = 8,314 \times 293,15 / 1,013 \times 10^5 \approx 2,41 \times 10^{-2} \text{ m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$, soit $24,1 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$; à 0°C , $22,4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$.
- La masse volumique d'un gaz parfait de masse molaire M vaut $\rho = m / V = n M / V = P M / (R T)$. Elle augmente avec la pression et diminue quand la température augmente : c'est pourquoi l'air chaud monte.

Interprétation microscopique. La pression vient des chocs des entités sur les parois. Si l'on chauffe à volume constant, les entités vont plus vite : les chocs sont plus fréquents et plus violents, la pression augmente. Si l'on comprime à température constante, le même nombre d'entités se trouve dans un volume plus petit : les chocs par unité de surface sont plus fréquents, la pression augmente.

3. L'énergie interne

L'énergie totale d'un système comprend :

- une énergie mécanique **macroscopique** : énergie cinétique de son mouvement d'ensemble et énergie potentielle de position (pesanteur par exemple) ;
- une énergie **microscopique**, appelée **énergie interne** U .

Définition. L'énergie interne U d'un système est la somme des énergies cinétiques microscopiques de ses entités (agitation thermique : translation, rotation, vibration) et des énergies potentielles d'interaction entre ces entités (liaisons, interactions intermoléculaires). Elle s'exprime en joules.

On ne sait pas mesurer U elle-même, mais seulement ses **variations** $\Delta U = U(\text{final}) - U(\text{initial})$. U est une **fonction d'état** : sa variation ne dépend que des états initial et final, pas du chemin suivi.

- Si la température augmente, l'agitation augmente : la part cinétique de U augmente.
- Lors d'un changement d'état (fusion, vaporisation), la température reste constante mais les interactions entre entités changent : c'est la part potentielle de U qui varie. La variation vaut $\Delta U = m \times L$, où L est l'énergie massique de changement d'état (pour la fusion de la glace, $L \approx 3,34 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$).
- Dans un gaz parfait, il n'y a pas d'interactions à distance : U n'a pas de part potentielle d'interaction et ne dépend que de la température.

4. Le premier principe de la thermodynamique

Un système fermé peut échanger de l'énergie avec l'extérieur de deux façons :

- par **travail** W : transfert associé à une action mécanique macroscopique (déplacement d'un piston, frottement, action d'un agitateur) ou à un courant électrique (travail électrique) ;
- par **transfert thermique** Q (souvent appelé chaleur dans le langage courant) : transfert désordonné d'énergie à l'échelle microscopique, dû à un écart de température.

Énoncé. Pour un système fermé dont l'énergie mécanique macroscopique ne varie pas (système au repos à l'échelle macroscopique), la variation d'énergie interne entre deux états est égale à la somme des énergies échangées avec l'extérieur :

$$\Delta U = W + Q$$

Convention de signe. W et Q sont comptés **positivement** s'ils sont **reçus** par le système et **négativement** s'ils sont **cédés**. Un système qui reçoit 500 J de travail et cède 200 J par transfert thermique voit son énergie interne augmenter de $\Delta U = 500 + (-200) = +300 \text{ J}$.

Dans le cas général où l'énergie mécanique du système varie aussi, le premier principe s'écrit $\Delta(E(m) + U) = W + Q$. Ce principe exprime la **conservation de l'énergie** : l'énergie ne se crée pas et ne disparaît pas, elle se transfère ou se convertit.

Cas particuliers.

- Système isolé : $W = 0$ et $Q = 0$, donc $\Delta U = 0$.
- Transformation **adiabatique** (parois parfaitement isolantes, ou transformation trop rapide pour qu'un transfert thermique ait lieu) : $Q = 0$, donc $\Delta U = W$. Une pompe à vélo chauffe quand on comprime l'air rapidement.
- Résistance chauffante plongée dans l'eau : la résistance reçoit un travail électrique et le cède à l'eau sous forme de transfert thermique. Pour le système {eau}, $\Delta U = Q > 0$.
- Lors d'un freinage, le travail des forces de frottement convertit l'énergie cinétique du véhicule en énergie interne des disques et des plaquettes, qui s'échauffent.

5. Capacité thermique et calorimétrie

Pour un système **incompressible** (solide ou liquide) qui ne change pas d'état, la variation d'énergie interne est proportionnelle à la variation de température :

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

- C est la **capacité thermique** du système, en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$: l'énergie qu'il faut lui fournir pour élever sa température de 1 K.
- c est la **capacité thermique massique** du matériau, en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, et $C = m c$.

Matériau	c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Eau liquide	$4,18 \times 10^3$
Glace	$2,1 \times 10^3$
Aluminium	897
Fer	$4,5 \times 10^2$
Cuivre	385

La capacité thermique massique de l'eau est particulièrement élevée : il faut beaucoup d'énergie pour chauffer l'eau, et elle en restitue beaucoup en se refroidissant. Les océans amortissent ainsi les variations de température du climat, et l'eau, majoritaire dans les organismes vivants, stabilise leur température.

Calorimétrie. Un calorimètre est une enceinte quasi adiabatique. Si l'on y met en contact plusieurs corps de températures différentes, le système global est isolé : $\Delta U(\text{total}) = 0$, donc la somme des variations d'énergie interne des différentes parties est nulle. Les corps chauds cèdent de l'énergie, les corps froids en reçoivent, jusqu'à une température finale commune (équilibre thermique). Pour deux masses d'eau m_1 à T_1 et m_2 à T_2 , sans perte :

$$m_1 c (T(f) - T_1) + m_2 c (T(f) - T_2) = 0, \text{ d'où } T(f) = (m_1 T_1 + m_2 T_2) / (m_1 + m_2).$$

Le calorimètre lui-même, avec ses accessoires, a une capacité thermique propre qu'il faut parfois inclure dans le bilan.

6. Les modes de transfert thermique

Un transfert thermique se produit **spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid**, jamais l'inverse. Il s'arrête lorsque les températures sont égales. On distingue trois modes.

La conduction. L'énergie se transmet de proche en proche, **sans déplacement macroscopique de matière** : les entités les plus agitées transmettent une partie de leur énergie à leurs voisins lors des chocs ou par les vibrations du réseau (dans les métaux, les électrons libres y contribuent beaucoup). C'est le mode dominant dans les solides. La poignée d'une casserole métallique chauffe par conduction. Les métaux sont de bons conducteurs thermiques ; l'air immobile, la laine, le polystyrène expansé sont de bons isolants.

La convection. L'énergie est transportée par un **déplacement macroscopique de matière** dans un fluide. Le fluide chauffé, moins dense, monte ; le fluide froid, plus dense, descend : des courants de

convection se forment (convection naturelle). Un ventilateur ou une pompe crée une convection forcée. Exemples : chauffage d'une pièce par un radiateur, circulation du sang qui transporte l'énergie vers la peau, courants marins et atmosphériques.

Le rayonnement. Tout corps émet un rayonnement électromagnétique qui dépend de sa température ; ce rayonnement transporte de l'énergie et peut être absorbé par un autre corps. Ce mode ne nécessite **aucun support matériel** : c'est ainsi que l'énergie du Soleil traverse le vide spatial. À température ambiante, les corps émettent surtout dans l'infrarouge (une caméra thermique le détecte) ; le Soleil, très chaud, émet surtout dans le visible.

Trois modes de transfert thermique

Conduction : de proche en proche, sans déplacement de matière

Convection : transport par un fluide en mouvement

Rayonnement : ondes électromagnétiques, même dans le vide

Repères complémentaires, sans séquence causale

7. Flux thermique et résistance thermique

Le **flux thermique** Φ est l'énergie transférée thermiquement par unité de temps :

$\Phi = Q / \Delta t$, en watts (W), avec Q en J et Δt en s.

À travers une paroi dont les faces sont maintenues aux températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$), en régime permanent (températures qui ne varient plus dans le temps), le flux est proportionnel à l'écart de température :

$$\Phi = (T_1 - T_2) / R(\text{th})$$

$R(\text{th})$ est la **résistance thermique** de la paroi, en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. Plus elle est grande, plus la paroi est isolante. Pour une paroi plane homogène d'épaisseur e , de surface S , faite d'un matériau de conductivité thermique λ (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), on donne :

$$R(\text{th}) = e / (\lambda \times S)$$

Une paroi est donc d'autant plus isolante qu'elle est épaisse, de petite surface et faite d'un matériau peu conducteur. Ordres de grandeur de λ : cuivre 390, béton environ 1,5, verre environ 1,0, bois environ 0,15, laine de verre environ 0,04, air immobile environ $0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Parois en série. Si le flux traverse successivement plusieurs couches (mur puis isolant), les résistances thermiques s'ajoutent : $R(\text{totale}) = R_1 + R_2 + \dots$ Une couche très isolante, même mince, fait chuter le flux. C'est le principe du double vitrage, où une lame d'air (ou de gaz) immobile sépare deux vitres.

Cette relation est l'analogue de la loi d'Ohm : l'écart de température joue le rôle de la tension et le flux celui de l'intensité.

8. La loi de Newton du refroidissement

On considère un système de capacité thermique C , de température $T(t)$ uniforme, en contact avec un milieu extérieur de grande taille à la température constante $T(\text{ext})$ (un **thermostat** : l'air d'une pièce, l'eau d'un lac). Le transfert entre le système et le milieu se fait surtout par convection à sa surface.

Loi phénoménologique de Newton. Le flux thermique cédé par le système au milieu extérieur est proportionnel à l'écart de température :

$$\Phi = h \times S \times (T - T(\text{ext}))$$

où S est l'aire de la surface d'échange et h le coefficient d'échange conducto-convectif (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), qui dépend du fluide et de son mouvement. Cette loi est valable pour des écarts de température modérés.

Équation différentielle. Pendant une petite durée dt , le système cède l'énergie Φdt et ne reçoit pas de travail. Le premier principe donne $C dT = -\Phi dt$, soit :

$$C \times dT/dt = -h S (T - T(\text{ext}))$$

En posant $\tau = C / (h S)$, homogène à un temps (en s) :

$$dT/dt + T / \tau = T(\text{ext}) / \tau$$

Résolution. C'est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants. Sa solution, avec la condition initiale $T(0) = T_0$, est :

$$T(t) = T(\text{ext}) + (T_0 - T(\text{ext})) \times \exp(-t / \tau)$$

Vérification : $dT/dt = -(T_0 - T(\text{ext})) \exp(-t/\tau) / \tau = -(T - T(\text{ext})) / \tau$, ce qui est bien l'équation ; et $T(0) = T(\text{ext}) + T_0 - T(\text{ext}) = T_0$.

Interprétation.

- L'écart $T - T(\text{ext})$ décroît exponentiellement ; T tend vers $T(\text{ext})$ (équilibre thermique).
- La **constante de temps** τ fixe la rapidité de l'évolution : à $t = \tau$, l'écart initial a été divisé par $e \approx 2,72$, donc 63 % du chemin vers $T(\text{ext})$ est parcouru ; à $t = 5\tau$, l'écart restant est inférieur à 1 % de l'écart initial, et l'on considère l'équilibre atteint.
- La tangente à la courbe à l'origine coupe l'asymptote $T = T(\text{ext})$ à l'instant $t = \tau$: c'est une méthode graphique pour lire τ .
- $\tau = C / (hS)$ est grand pour un système de grande capacité thermique et de petite surface d'échange : un grand volume d'eau se refroidit lentement, un objet mince rapidement. Un animal de petite taille a une surface relativement grande devant sa masse et perd son énergie plus vite.
- La même loi décrit le réchauffement d'un objet froid placé dans un milieu plus chaud ($T_0 < T(\text{ext})$).

Refroidissement selon Newton

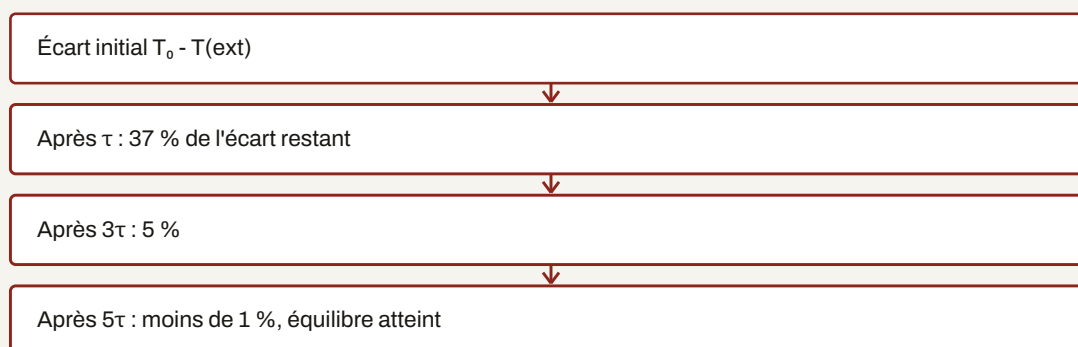


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

9. Le bilan radiatif terrestre et l'effet de serre

Le rayonnement solaire reçu. Au sommet de l'atmosphère, une surface perpendiculaire aux rayons solaires reçoit une puissance par unité de surface appelée constante solaire, environ $1\,361\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. La Terre intercepte ce rayonnement sur un disque d'aire πR^2 , mais le répartit, du fait de sa rotation, sur sa surface totale $4\pi R^2$. La puissance moyenne reçue par mètre carré de surface terrestre vaut donc $1\,361 / 4 \approx 340\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

L'albédo. Une partie du rayonnement est directement réfléchi vers l'espace (nuages, glaces, surfaces claires) : la fraction réfléchi est l'**albédo** A , environ 0,30 pour la Terre. La puissance absorbée par m^2 vaut en moyenne $(1 - A) \times 340 \approx 238\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

L'émission terrestre. La Terre, chauffée, émet un rayonnement infrarouge. Pour un corps noir, la puissance émise par unité de surface suit la **loi de Stefan-Boltzmann** (relation donnée) : $p = \sigma T^4$, avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.

Équilibre radiatif. La température moyenne de la Terre est stable lorsque la puissance absorbée est égale à la puissance émise vers l'espace. Sans atmosphère, l'égalité $\sigma T^4 = 238\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ donnerait $T \approx 255\text{ K}$, soit environ $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Or la température moyenne de surface est d'environ 288 K ($15\text{ }^\circ\text{C}$).

L'effet de serre. L'atmosphère est presque transparente au rayonnement solaire visible mais absorbe une grande partie du rayonnement infrarouge émis par la surface, grâce aux gaz à effet de serre (vapeur d'eau, dioxyde de carbone CO_2 , méthane CH_4). Elle réémet ce rayonnement dans toutes les directions, en particulier vers le sol. La surface reçoit donc à la fois le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge de l'atmosphère : à l'équilibre, elle est plus chaude que sans atmosphère. À 288 K , elle émet environ $\sigma \times 288^4 \approx 390\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, bien plus que les $238\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ qui finissent par partir vers l'espace. Les échanges par convection et par évaporation-condensation de l'eau complètent ce bilan.

Si la concentration en gaz à effet de serre augmente, l'atmosphère renvoie davantage d'infrarouge vers le sol : le bilan devient momentanément positif et la température de surface s'élève jusqu'à un nouvel équilibre. Une baisse de l'albédo (fonte des glaces) agit dans le même sens : c'est une rétroaction qui amplifie le réchauffement.

Bilan radiatif simplifié

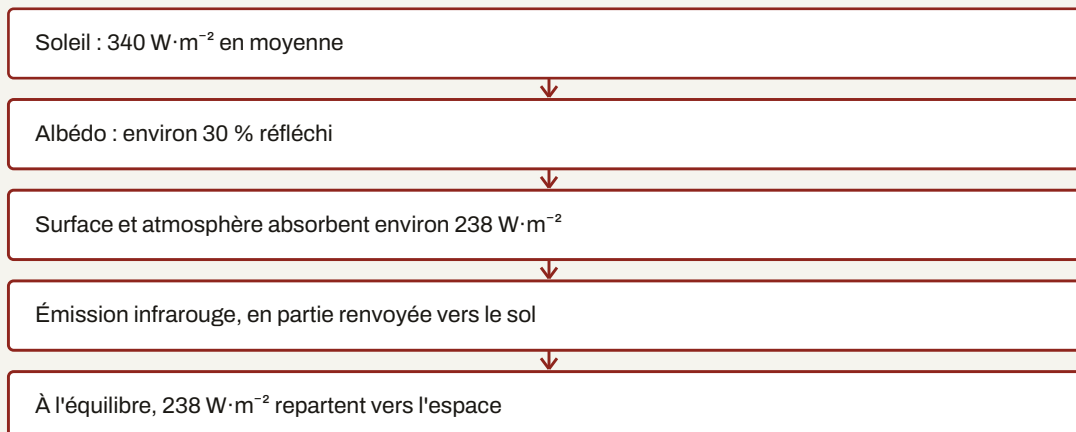


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

À l'équilibre, un système reçoit exactement autant d'énergie qu'il en perd par unité de temps. Toute perturbation de l'un des termes déplace la température jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint.

Exemples résolus

Exemple 1 : une bouteille de plongée

Énoncé. Une bouteille de plongée de volume intérieur 12,0 L contient de l'air comprimé sous 200 bar à 20,0 °C. On assimile l'air à un gaz parfait. Données : $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; 1 bar = 10^5 Pa ; $P(\text{atm}) = 1,013 \text{ bar}$. a) Calculer la quantité de matière d'air. b) Quel volume cet air occuperait-il à 20,0 °C sous la pression atmosphérique ? c) La bouteille, oubliée au soleil, atteint 50,0 °C. Calculer la nouvelle pression. d) Discuter la validité du modèle.

Résolution. a) Conversions : $P = 200 \times 10^5 \text{ Pa} = 2,00 \times 10^7 \text{ Pa}$; $V = 12,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$; $T = 293,15 \text{ K}$. $n = PV / (RT) = 2,00 \times 10^7 \times 12,0 \times 10^{-3} / (8,314 \times 293,15) = 2,40 \times 10^5 / 2\,437 \approx \mathbf{98,5 \text{ mol}}$. b) À n et T constants, $P V =$ constante : $V' = V \times P / P' = 12,0 \times 200 / 1,013 \approx 2,37 \times 10^3 \text{ L}$, soit $\mathbf{2,37 \text{ m}^3}$. c) À n et V constants, $P / T =$ constante : $P' = 200 \times 323,15 / 293,15 \approx \mathbf{220 \text{ bar}}$. La pression augmente d'environ 10 %, d'où la consigne de ne pas exposer une bouteille de gaz à la chaleur. d) À 200 bar, les molécules sont proches les unes des autres : leur volume propre et leurs interactions ne sont plus tout à fait négligeables. Le modèle du gaz parfait donne un **ordre de grandeur correct**, mais pas une valeur précise.

Exemple 2 : une bouilloire électrique

Énoncé. Une bouilloire de puissance électrique 1 500 W contient 1,00 L d'eau à 20,0 °C. Données : $\rho(\text{eau}) = 1,00 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$; $c(\text{eau}) = 4,18 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. a) Calculer l'énergie nécessaire pour porter l'eau à 100 °C. b) En supposant que toute l'énergie électrique est reçue par l'eau, calculer la durée de chauffage. c) La durée mesurée est de 250 s. Calculer le rendement de la bouilloire et expliquer l'écart.

Résolution. a) Système {eau}, incompressible, sans changement d'état, ne recevant pas de travail : $\Delta U = Q = m c \Delta T = 1,00 \times 4,18 \times 10^3 \times (100 - 20,0) = \mathbf{3,34 \times 10^5 \text{ J}}$. b) L'énergie électrique fournie pendant Δt vaut $P \times \Delta t$. $\Delta t = Q / P = 3,34 \times 10^5 / 1\,500 \approx \mathbf{223 \text{ s}}$. c) Énergie électrique réellement fournie : $1\,500 \times 250 = 3,75 \times 10^5 \text{ J}$. Rendement : $\eta = 3,34 \times 10^5 / 3,75 \times 10^5 \approx \mathbf{0,89}$, soit 89 %. Le reste a servi à chauffer la bouilloire.

elle-même (sa résistance, son corps) et a été transféré à l'air ambiant par conduction, convection et rayonnement.

Exemple 3 : une tasse de café qui refroidit

Énoncé. Une tasse de café à $80,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ est posée dans une pièce à $20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. On admet que sa température suit la loi de Newton : $T(t) = T(\text{ext}) + (T_0 - T(\text{ext})) \exp(-t/\tau)$. Au bout de $10,0\text{ min}$, le café est à $50,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. a) Déterminer τ . b) Quelle est la température au bout de $20,0\text{ min}$? c) À quel instant le café atteint-il $30,0\text{ }^{\circ}\text{C}$?

Résolution. a) À $t = 10,0\text{ min}$: $50,0 - 20,0 = (80,0 - 20,0) \exp(-10,0/\tau)$, donc $\exp(-10,0/\tau) = 30,0 / 60,0 = 0,500$. En prenant le logarithme népérien : $-10,0/\tau = \ln(0,500) = -\ln 2$, d'où $\tau = 10,0 / \ln 2 \approx \mathbf{14,4\text{ min}}$. b) À $t = 20,0\text{ min}$: $\exp(-20,0/\tau) = (\exp(-10,0/\tau))^2 = 0,250$. $T = 20,0 + 60,0 \times 0,250 = \mathbf{35,0\text{ }^{\circ}\text{C}}$. L'écart à la température ambiante est divisé par 2 toutes les $10,0\text{ min}$. c) On cherche t tel que $30,0 - 20,0 = 60,0 \exp(-t/\tau)$, soit $\exp(-t/\tau) = 1/6$. Donc $t = \tau \times \ln 6 = 14,4 \times 1,79 \approx \mathbf{25,8\text{ min}}$.

Méthodes et pièges

- Méthode type pour le gaz parfait : convertis d'abord tout en SI (P en Pa, V en m^3 , T en K), puis écris $P V = n R T$; si n est constant, utilise plutôt $P V / T = \text{constante}$ entre deux états, ce qui évite de calculer n .
- N'utilise jamais une température en degrés Celsius dans $P V = n R T$ ou dans σT^4 : seul le kelvin convient. En revanche, dans un écart ΔT , les deux échelles donnent la même valeur.
- Pour le premier principe, définis toujours le système, puis compte positivement ce qu'il reçoit et négativement ce qu'il cède. Un signe faux sur Q ou W est l'erreur classique.
- Ne confonds pas température et énergie interne : deux corps à la même température peuvent avoir des énergies internes très différentes, et un changement d'état fait varier U à température constante.
- Ne confonds pas capacité thermique C ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, propre à un objet) et capacité thermique massique c ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, propre à un matériau).
- En calorimétrie, écris $\Delta U(\text{total}) = 0$ en faisant la somme des $m c (T(f) - T(\text{initiale}))$ de toutes les parties, avec $T(f)$ inconnue : les signes se placent alors tout seuls.
- Pour des parois successives, additionne les résistances thermiques, jamais les conductivités.
- Pour la loi de Newton, isole l'exponentielle avant de prendre le logarithme ; vérifie toujours que ton résultat est compris entre T_0 et $T(\text{ext})$.

Vers le PASS

En PASS et en LAS, la thermodynamique revient sous deux formes. En chimie, le premier principe s'enrichit des fonctions d'état enthalpie, entropie et enthalpie libre, qui permettent de prévoir le sens d'une réaction et la position d'un équilibre chimique. En biophysique, l'étude des transferts thermiques sert à comprendre la thermorégulation du corps humain : production d'énergie par le métabolisme, pertes par conduction, convection, rayonnement infrarouge de la peau et évaporation de la sueur, rôle de la circulation sanguine dans le transport de l'énergie vers la surface.

Les compétences construites ici y sont directement réutilisées : conversion en kelvins, bilan d'énergie avec convention de signe, équation $P V = n R T$ pour les gaz respiratoires et les pressions partielles,

raisonnement sur une évolution exponentielle et sa constante de temps.

Suite en PASS : Thermodynamique et transferts de chaleur

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Un récipient de 2,0 L contient un gaz parfait sous $1,0 \times 10^5$ Pa à 25 °C. Calcule la quantité de matière de gaz. Donnée : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
2. Calcule l'énergie à fournir à un bloc d'aluminium de 200 g pour faire passer sa température de 20 °C à 70 °C. Donnée : $c(\text{Al}) = 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
3. Indique le mode de transfert thermique principal dans chaque situation : a) la poignée en métal d'une poêle chauffe ; b) l'air d'une pièce se réchauffe dans son ensemble grâce à un radiateur ; c) on sent la chaleur d'un feu de camp sur le visage ; d) l'énergie du Soleil parvient à la Terre.
4. Une vitre de surface $1,5 \text{ m}^2$ et d'épaisseur 4,0 mm sépare une pièce à 20 °C de l'extérieur à 5 °C. On suppose que ses deux faces sont à ces températures. Donnée : $\lambda(\text{verre}) = 1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $R(\text{th}) = e / (\lambda S)$. Calcule sa résistance thermique, le flux thermique qui la traverse, puis l'énergie perdue en une heure.
5. Au cours d'une transformation, un gaz reçoit un travail de 300 J et cède un transfert thermique de 120 J. Calcule la variation de son énergie interne et indique si elle augmente ou diminue.

Niveau 2 : type bac

6. Une seringue bouchée. Une seringue bouchée contient 50,0 mL d'air à 20,0 °C sous $1,013 \times 10^5$ Pa, assimilé à un gaz parfait. Donnée : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
a) Calcule la quantité de matière d'air. b) On enfonce lentement le piston jusqu'à 20,0 mL, à température constante. Calcule la nouvelle pression. c) Piston bloqué à 20,0 mL, on plonge la seringue dans de l'eau à 60,0 °C. Calcule la pression une fois l'équilibre thermique atteint. d) Explique microscopiquement les augmentations de pression des questions b) et c).
7. Calorimétrie. On mélange dans un calorimètre 200 g d'eau à 80,0 °C et 300 g d'eau à 20,0 °C. Donnée : $c(\text{eau}) = 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
a) En négligeant la capacité thermique du calorimètre, calcule la température finale. b) Le calorimètre a en réalité une capacité thermique de $50 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ et il est initialement à 20,0 °C avec l'eau froide. Calcule la nouvelle température finale. c) Pourquoi le calorimètre doit-il être un récipient isolant ?
8. Isoler un mur. Un mur de béton de surface $10,0 \text{ m}^2$, d'épaisseur 20,0 cm ($\lambda = 1,50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) sépare une pièce à 19,0 °C de l'extérieur à 4,0 °C. Donnée : $R(\text{th}) = e / (\lambda S)$.
a) Calcule la résistance thermique du mur et le flux thermique qui le traverse. b) On ajoute une couche de laine de verre de 10,0 cm ($\lambda = 0,040 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Calcule la résistance thermique de l'ensemble et le nouveau flux. c) Calcule l'énergie économisée en une journée, en joules puis en kilowattheures ($1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$).
9. Refroidir une bouteille. Une bouteille à 24,0 °C est placée dans un réfrigérateur à 4,0 °C. Sa température suit la loi de Newton avec une constante de temps $\tau = 40 \text{ min}$.
a) Établis l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$, en notant C la capacité thermique de la bouteille et h le produit du coefficient d'échange par la surface, et exprime τ . b) Vérifie que $T(t) = 4,0 + 20,0$

$\exp(-t/\tau)$ en est solution et respecte la condition initiale. c) Calcule la température au bout de 30 min. d) Au bout de combien de temps la bouteille est-elle à 6,0 °C ?

Niveau 3 : vers le PASS

10. Bilan radiatif de la Terre. Données : constante solaire $1\,361\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; albédo $A = 0,30$; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.

a) Justifie que la puissance solaire moyenne reçue par mètre carré de surface terrestre vaut le quart de la constante solaire, et calcule-la. b) Calcule la puissance absorbée par mètre carré. c) En l'absence d'atmosphère, calcule la température d'équilibre de la Terre, en K puis en °C. d) La température moyenne réelle est de 288 K. Calcule la puissance émise par m^2 par la surface à cette température et explique l'écart avec la question b). e) Si l'albédo passait à 0,28 (fonte des glaces), de combien la température de la question c) varierait-elle ?

11. Freinage. Une voiture de 1 200 kg roulant à $90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ freine jusqu'à l'arrêt sur une route horizontale. On admet que toute son énergie cinétique devient de l'énergie interne de ses quatre disques de frein en fer, de 6,0 kg chacun ($c = 4,5 \times 10^2\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), sans transfert vers l'air pendant le freinage.

a) Calcule l'énergie cinétique initiale. b) Applique le premier principe au système {voiture} sous la forme $\Delta(E(m) + U) = W + Q$ et justifie que la diminution d'énergie cinétique se retrouve en énergie interne. c) Calcule l'élévation de température des disques. d) Pourquoi les disques de frein sont-ils souvent ventilés ?

12. Pertes par rayonnement de la peau. La peau d'une personne dévêtue, de surface $1,8\text{ m}^2$, est à 33 °C dans une pièce dont les murs sont à 20 °C. On assimile la peau et les murs à des corps noirs dans l'infrarouge. Donnée : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.

a) Calcule la puissance émise par m^2 de peau, puis celle reçue par m^2 de peau en provenance des murs (même formule à la température des murs). b) Déduis-en la puissance nette perdue par rayonnement par tout le corps. c) Compare-la à une production d'énergie au repos d'environ 100 W et conclus sur l'importance du rayonnement.

13. QCM. Indique pour chaque proposition si elle est vraie ou fausse, en justifiant.

A. Doubler la température en degrés Celsius d'un gaz parfait à volume constant double sa pression. B. Lors de la fusion de la glace à 0 °C, l'énergie interne de l'eau augmente alors que sa température ne change pas. C. Le rayonnement est le seul mode de transfert thermique possible dans le vide. D. Pour deux couches isolantes accolées, la résistance thermique totale est la plus petite des deux. E. Selon la loi de Newton, au bout d'une durée τ , la température du système a atteint celle du milieu extérieur.

Corrigés

1. Conversions : $V = 2,0 \times 10^{-3}\text{ m}^3$; $T = 25 + 273,15 = 298,15\text{ K}$. $n = PV / (RT) = 1,0 \times 10^5 \times 2,0 \times 10^{-3} / (8,314 \times 298,15) = 200 / 2\,479 \approx 8,1 \times 10^{-2}\text{ mol}$.

2. $Q = m c \Delta T = 0,200 \times 897 \times (70 - 20) = 0,200 \times 897 \times 50 = 8,97 \times 10^3\text{ J}$, soit environ 9,0 kJ.

3. a) **Conduction** : l'énergie progresse dans le métal de proche en proche, sans déplacement de matière. b) **Convection** : l'air chauffé au contact du radiateur monte et circule dans la pièce. c) **Rayonnement** : le feu émet un rayonnement infrarouge absorbé par la peau (l'air chaud du feu monte et ne vient pas vers le visage). d) **Rayonnement** : c'est le seul mode possible à travers le vide spatial.

4. $R(\text{th}) = e / (\lambda S) = 4,0 \times 10^{-3} / (1,0 \times 1,5) \approx 2,7 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. $\Phi = \Delta T / R(\text{th}) = 15 / 2,67 \times 10^{-3} \approx 5,6 \times 10^3 \text{ W}$.
Énergie perdue en une heure : $Q = \Phi \times \Delta t = 5,6 \times 10^3 \times 3\,600 \approx 2,0 \times 10^7 \text{ J}$. En réalité, les couches d'air au contact des deux faces ajoutent une résistance et réduisent nettement ce flux, mais l'ordre de grandeur montre qu'un simple vitrage isole mal.
5. $W = +300 \text{ J}$ (reçu), $Q = -120 \text{ J}$ (cédé). $\Delta U = W + Q = 300 - 120 = +180 \text{ J}$: l'énergie interne **augmente**.
6. a) $n = PV / (RT) = 1,013 \times 10^5 \times 50,0 \times 10^{-6} / (8,314 \times 293,15) = 5,065 / 2\,437 \approx 2,08 \times 10^{-3} \text{ mol}$.
b) À n et T constants : $P_2 = P_1 \times V_1 / V_2 = 1,013 \times 10^5 \times 50,0 / 20,0 \approx 2,53 \times 10^5 \text{ Pa}$. c) À n et V constants : $P_3 = P_2 \times T_3 / T_2 = 2,53 \times 10^5 \times 333,15 / 293,15 \approx 2,88 \times 10^5 \text{ Pa}$. d) En b), le même nombre de molécules occupe un volume 2,5 fois plus petit : elles frappent plus souvent chaque unité de surface de paroi. En c), les molécules sont plus agitées : les chocs sont plus fréquents et plus violents. Dans les deux cas, la force exercée par unité de surface, donc la pression, augmente.
7. a) Système isolé : $0,200 \times c \times (T(f) - 80,0) + 0,300 \times c \times (T(f) - 20,0) = 0$. D'où $T(f) = (0,200 \times 80,0 + 0,300 \times 20,0) / 0,500 = (16,0 + 6,0) / 0,500 = 44,0 \text{ }^\circ\text{C}$.
b) Le calorimètre ($C = 50 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$) passe aussi de $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ à $T(f)$: $0,200 \times 4\,180 \times (T(f) - 80,0) + (0,300 \times 4\,180 + 50) \times (T(f) - 20,0) = 0$, soit $836 (T(f) - 80,0) + 1\,304 (T(f) - 20,0) = 0$. Donc $2\,140 T(f) = 66\,880 + 26\,080 = 92\,960$, et $T(f) \approx 43,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Le calorimètre absorbe une partie de l'énergie : la température finale est un peu plus basse. c) Pour que le système {eaux + calorimètre} soit isolé : sans isolation, une partie de l'énergie serait transférée à l'air ambiant et le bilan $\Delta U(\text{total}) = 0$ serait faux.
8. a) $R(\text{béton}) = 0,200 / (1,50 \times 10,0) \approx 1,33 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. $\Phi = 15,0 / 1,33 \times 10^{-2} \approx 1,13 \times 10^3 \text{ W}$.
b) $R(\text{laine}) = 0,100 / (0,040 \times 10,0) = 0,250 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. En série : $R(\text{totale}) = 0,0133 + 0,250 \approx 0,263 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. $\Phi' = 15,0 / 0,263 \approx 57 \text{ W}$. Le flux est divisé par environ 20. c) Économie de flux : $1\,125 - 57 \approx 1,07 \times 10^3 \text{ W}$. Sur une journée ($86\,400 \text{ s}$) : $1,07 \times 10^3 \times 86\,400 \approx 9,2 \times 10^7 \text{ J}$, soit $9,2 \times 10^7 / 3,6 \times 10^6 \approx 26 \text{ kWh}$.
9. a) Pendant dt , la bouteille cède $\Phi dt = h S (T - T(\text{ext})) dt$ et ne reçoit pas de travail. Premier principe : $C dT = -h S (T - T(\text{ext})) dt$, d'où $dT/dt = -(T - T(\text{ext})) / \tau$ avec $\tau = C / (h S)$.
b) $dT/dt = -20,0 \exp(-t/\tau) / \tau$; or $T - 4,0 = 20,0 \exp(-t/\tau)$, donc $dT/dt = -(T - 4,0) / \tau$: l'équation est vérifiée. À $t = 0$, $T = 4,0 + 20,0 = 24,0 \text{ }^\circ\text{C}$: la condition initiale est respectée. c) $T(30) = 4,0 + 20,0 \times \exp(-30/40) = 4,0 + 20,0 \times 0,472 \approx 13,4 \text{ }^\circ\text{C}$. d) $6,0 - 4,0 = 20,0 \exp(-t/\tau)$, donc $\exp(-t/\tau) = 0,100$ et $t = \tau \ln 10 = 40 \times 2,30 \approx 92 \text{ min}$.
10. a) La Terre intercepte le flux solaire sur la surface de son disque apparent, πR^2 , mais cette énergie se répartit, au fil de la rotation, sur toute sa surface $4 \pi R^2$, quatre fois plus grande. Puissance moyenne : $1\,361 / 4 \approx 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
b) $(1 - 0,30) \times 340 \approx 238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. c) Équilibre : $\sigma T^4 = 238$, donc $T^4 = 238 / 5,67 \times 10^{-8} = 4,20 \times 10^9 \text{ K}^4$ et $T = (4,20 \times 10^9)^{1/4} \approx 255 \text{ K}$, soit $-18 \text{ }^\circ\text{C}$. d) $p = \sigma \times 288^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times 6,88 \times 10^9 \approx 390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. La surface émet plus que ce que la Terre absorbe du Soleil : c'est possible parce qu'elle reçoit en plus le rayonnement infrarouge renvoyé par l'atmosphère (effet de serre). Vers l'espace, seuls $238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ en moyenne s'échappent, ce qui assure l'équilibre global. e) Puissance absorbée : $0,72 \times 340 \approx 245 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. $T = (245 / 5,67 \times 10^{-8})^{1/4} \approx 256,4 \text{ K}$. Variation : environ $+1,8 \text{ K}$. Une petite baisse de l'albédo suffit à réchauffer sensiblement la planète.
11. a) $v = 90 / 3,6 = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. $E(c) = \frac{1}{2} m v^2 = 0,5 \times 1\,200 \times 25^2 = 3,75 \times 10^5 \text{ J}$.

b) Système {voiture}. Pendant le freinage, on néglige les échanges avec l'extérieur : $Q = 0$; le travail des forces extérieures est nul ou négligeable (les frottements disque-plaquette sont internes au système, la route horizontale ne fait pas varier l'énergie potentielle). Donc $\Delta(E(m) + U) = 0$, soit $\Delta U = -\Delta E(c) = +3,75 \times 10^5 \text{ J}$: l'énergie cinétique perdue se retrouve en énergie interne des disques. c) Masse totale de fer : $4 \times 6,0 = 24 \text{ kg}$. $\Delta T = \Delta U / (m c) = 3,75 \times 10^5 / (24 \times 4,5 \times 10^2) = 3,75 \times 10^5 / 1,08 \times 10^4 \approx 35 \text{ K}$. d) Après le freinage, les disques doivent céder rapidement cette énergie à l'air, sinon des freinages répétés les échaufferaient de plus en plus. Les ailettes de ventilation augmentent la surface d'échange et favorisent la **convection**, ce qui diminue la constante de temps de refroidissement.

12. a) $T(\text{peau}) = 33 + 273 = 306 \text{ K}$; $T(\text{murs}) = 293 \text{ K}$. Puissance émise par m^2 : $\sigma \times 306^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times 8,77 \times 10^9 \approx 497 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Puissance reçue des murs par m^2 : $\sigma \times 293^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times 7,37 \times 10^9 \approx 418 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

b) Puissance nette perdue : $(497 - 418) \times 1,8 \approx 79 \times 1,8 \approx 1,4 \times 10^2 \text{ W}$. c) Cette perte est du même ordre que la production d'énergie au repos (100 W) : le **rayonnement infrarouge est un mode de perte majeur** pour un corps dévêtu. Le corps ne se refroidit pas pour autant indéfiniment car la peau se refroidit, ce qui réduit la perte, et la vasoconstriction limite le transport d'énergie vers la surface ; les vêtements, en s'interposant, réduisent fortement cet échange.

13. A. **Faux**. La loi $P / T = \text{constante}$ s'écrit avec T en kelvins : passer de 20°C à 40°C fait passer T de 293 K à 313 K, la pression n'augmente que de 7 % environ.

B. **Vrai**. La fusion rompt des interactions entre molécules : la part potentielle de l'énergie interne augmente ($\Delta U = m L > 0$) à température constante. C. **Vrai**. Conduction et convection nécessitent de la matière ; le rayonnement électromagnétique se propage dans le vide. D. **Faux**. En série, les résistances thermiques s'ajoutent : la résistance totale est plus grande que chacune des deux. E. **Faux**. Au bout de τ , il reste 37 % de l'écart initial ; l'équilibre n'est atteint en pratique qu'au bout d'environ 5τ .