

TERMINALE SPÉCIALITÉ · PHYSIQUE-CHIMIE · L'ÉNERGIE : CONVERSIONS ET TRANSFERTS ·
CHAPITRE 18



R. RINGUET · 2026 – 2027

Approfondissement Transferts thermiques

Démonstrations, ponts thermiques, atmosphère modèle, inertie d'un bâtiment :
pour aller plus loin

7 exercices · niveau ●●● · durée conseillée : 2 h · calculatrice autorisée

★ À RETENIR — Ce que cette feuille ajoute au cours

- Démontrer *entièrement* l'expression $R_{th} = e/(\lambda S)$, la loi d'association en série, l'équation différentielle de Newton et sa solution.
- Aller plus loin : ponts thermiques, modèle d'atmosphère à une couche, inertie thermique d'un bâtiment, contrôle thermique d'un satellite.

Enfin, les passages « *hors programme* » ne sont pas exigibles au baccalauréat : les relations nécessaires y sont fournies.

Exercice 1 Démontrer la résistance thermique d'une paroi

●●●

(Hors programme — pour aller plus loin.) On admet la **loi de Fourier** : dans un matériau où la température ne dépend que de l'abscisse x , le flux thermique traversant une surface S perpendiculaire à (Ox) vaut $\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dx}$.

A. La paroi simple. Un mur d'épaisseur e et de surface S sépare deux milieux aux températures $T_1 > T_2$.

- 1.1 Le régime est permanent et le mur ne contient aucune source d'énergie. En effectuant un bilan d'énergie sur la tranche comprise entre les abscisses x et $x + dx$, justifier que Φ ne dépend pas de x .
- 1.2 En déduire que $\frac{dT}{dx}$ est constante, donc que T est une fonction affine de x . Exprimer alors Φ en fonction de λ , S , e , T_1 et T_2 , et conclure que $R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$.

B. La paroi composée. Le mur est maintenant formé de deux couches accolées, d'épaisseurs e_1 et e_2 et de conductivités λ_1 et λ_2 ; on note T_i la température de l'interface.

- 1.3 Justifier que le flux thermique est le même dans les deux couches. Écrire $T_1 - T_i$ puis $T_i - T_2$ en fonction de Φ , et en déduire que $R_{th} = R_1 + R_2$.
- 1.4 Montrer que la pente du profil de température dans une couche est inversement proportionnelle à son λ .
- 1.5 **Application.** $S = 15,0 \text{ m}^2$, béton côté intérieur ($e_1 = 20,0 \text{ cm}$, $\lambda_1 = 1,10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et polystyrène côté extérieur ($e_2 = 12,0 \text{ cm}$, $\lambda_2 = 0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), avec 20°C à l'intérieur et -2°C à l'extérieur. Calculer Φ , la température d'interface et les deux pentes ; tracer le profil de température.
- 1.6 On place maintenant le polystyrène du côté intérieur. Calculer la nouvelle température d'interface. Dans quelle configuration le béton risque-t-il de descendre au-dessous de 0°C ? Quel argument cela donne-t-il en faveur de l'isolation par l'extérieur ?

Exercice 2 L'équation différentielle de Newton, de A à Z

●●●

Un corps homogène de masse m , de capacité thermique massique c et de surface S , à la température uniforme $T(t)$, échange avec un milieu de température constante T_{ext} selon la loi de Newton $\Phi = h S (T_{ext} - T)$.

- 2.1 Appliquer le premier principe au corps entre les dates t et $t + dt$; en déduire l'équation différentielle $\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{ext}}{\tau}$, où l'on exprimera τ en fonction de m , c , h et S .

- 2.2** Vérifier que $T(t) = T_{\text{ext}} + (T_0 - T_{\text{ext}}) e^{-t/\tau}$ est solution de cette équation et respecte la condition initiale $T(0) = T_0$.
- 2.3** Établir l'équation de la tangente à la courbe $T(t)$ à la date $t = 0$ et montrer qu'elle coupe l'asymptote $T = T_{\text{ext}}$ exactement à la date $t = \tau$.
- 2.4** Montrer qu'à la date $t = 5\tau$, l'écart de température initial a été réduit de plus de 99 %.
- 2.5** Le corps est une sphère de rayon R et de masse volumique ρ . Montrer que $\tau = \frac{\rho c R}{3h}$: le temps caractéristique est proportionnel à la taille du corps.
- 2.6 Application.** Pour de l'eau ($\rho = 1,00 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c = 4,18 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et $h = 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, calculer τ pour une gouttelette de rayon 1,0 mm, puis pour une citerne sphérique de rayon 1,5 m. Quelle conséquence pour un petit animal à sang chaud dans le froid ?

Exercice 3 Un modèle d'atmosphère à une couche



(Hors programme — pour aller plus loin.) On modélise l'atmosphère par une couche mince, transparente au rayonnement solaire et totalement opaque au rayonnement infrarouge émis par le sol. Cette couche, à la température T_a , rayonne le flux surfacique σT_a^4 vers le haut et vers le bas (figure 1). Le sol, à la température T_s , rayonne σT_s^4 vers le haut. L'albédo du système vaut $a = 0,30$.

■ **DONNÉES** $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ • constante solaire $S_0 = 1361 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ • $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$

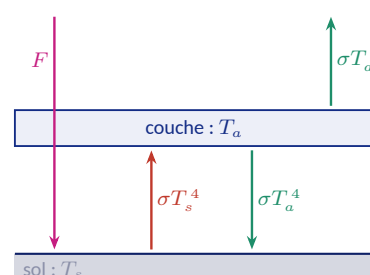


Figure 1 — Le modèle à une couche

- 3.1** Calculer le flux surfacique solaire F absorbé par le sol, moyenné sur toute la surface terrestre.
- 3.2** Écrire le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère et en déduire T_a .
- 3.3** Écrire le bilan radiatif de la surface du sol et montrer que $\sigma T_s^4 = 2F$, puis que $T_s = 2^{1/4} T_a$. Calculer T_s en kelvins et en degrés Celsius.
- 3.4** Comparer à la température moyenne réelle 288 K. Le modèle surestime-t-il ou sous-estime-t-il l'effet de serre ? Citer deux hypothèses trop fortes de ce modèle.
- 3.5** On empile n couches identiques. On admet qu'alors $\sigma T_s^4 = (n+1)F$. Déterminer la valeur (non entière) de n qui redonnerait 288 K, puis celle qui rendrait compte de la surface de Vénus ($T_s = 737 \text{ K}$, $T_a = 227 \text{ K}$). Commenter.

Exercice 4 Le pont thermique



Un mur de $30,0 \text{ m}^2$ est isolé, sauf au droit d'un poteau de béton armé qui le traverse de part en part sur $3,0 \text{ m}^2$. La partie courante ($27,0 \text{ m}^2$) est constituée de 20,0 cm de parpaing ($\lambda = 1,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) doublés de 12,0 cm de laine ($\lambda = 0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ; le poteau est en béton armé sur 20,0 cm ($\lambda = 2,00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), sans isolant. L'écart de température vaut 18°C .

- 4.1** (Hors programme — pour aller plus loin.) Deux parois de résistances R_1 et R_2 sont côte à côte et soumises au même écart de température. Justifier que les flux s'ajoutent, puis que la résistance thermique de l'ensemble vérifie $\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.
- 4.2** Calculer la résistance thermique de la partie courante, celle du poteau, puis celle de l'ensemble du mur.
- 4.3** Calculer le flux thermique traversant chacune des deux zones, puis le flux total. Quel pourcentage de la surface le poteau représente-t-il ? Quel pourcentage des pertes ?

- 4.4 On définit le coefficient surfacique $U = \frac{1}{R_{th} S}$, en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Calculer U pour la partie courante, puis le U moyen du mur. Par quel facteur le pont thermique dégrade-t-il la performance du mur ?
- 4.5 On isole le poteau par l'extérieur avec la même laine de 12,0 cm. Calculer le nouveau flux total et conclure sur l'intérêt de l'isolation par l'extérieur.

Exercice 5 Une maison sans chauffage



Une maison possède une capacité thermique totale $C = mc = 2,5 \times 10^7 J \cdot K^{-1}$ (murs, dalle, mobilier) et une enveloppe de résistance thermique globale $R_{th} = 2,8 \times 10^{-3} K \cdot W^{-1}$. L'extérieur reste à $2^\circ C$.

- 5.1 L'intérieur est maintenu à $20^\circ C$ en régime permanent. Calculer la puissance de chauffage nécessaire.
- 5.2 À $t = 0$, le chauffage tombe en panne. En appliquant le premier principe à la maison, établir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$ et montrer que le temps caractéristique vaut $\tau = R_{th} C$. Le calculer en heures.
- 5.3 Calculer la température intérieure 6 h après la panne, puis la durée au bout de laquelle elle atteint $12^\circ C$.
- 5.4 La maison est rénovée : R_{th} passe à $1,2 \times 10^{-2} K \cdot W^{-1}$, C restant inchangée. Calculer la nouvelle puissance de chauffage, le nouveau temps caractéristique et la température 6 h après une panne. Commenter.
- 5.5 À isolation identique, une maison en béton lourd et une maison à ossature bois ne se refroidissent pas à la même vitesse. Laquelle se refroidit le plus vite ? Justifier à l'aide de l'expression de τ , puis citer un avantage de la maison à forte inertie en été.

Exercice 6 Résolution de problème : le contrôle thermique d'un satellite



Un satellite sphérique de rayon $R = 0,80 m$ est en orbite terrestre, hors de l'ombre de la Terre. Son électronique dissipe en permanence une puissance $P_{int} = 350 W$. Le revêtement de sa surface renvoie vers l'espace une fraction a du rayonnement solaire reçu ; le satellite rayonne, par toute sa surface, comme un corps à la température T obéissant à la loi de Stefan-Boltzmann. Trois revêtements sont disponibles : peinture blanche ($a = 0,80$), revêtement gris ($a = 0,30$), peinture noire ($a = 0,10$).

■ **DONNÉES** $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ • constante solaire $S_0 = 1\,361 W \cdot m^{-2}$ • $T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273$

L'électronique embarquée doit rester en permanence entre $-20^\circ C$ et $50^\circ C$. Déterminer le ou les revêtements qui conviennent. Toute démarche, même partielle, sera valorisée : on établira d'abord l'équation d'équilibre thermique du satellite, puis l'expression littérale de T .

- 6.1 Le satellite passe derrière la Terre : il ne reçoit plus aucun rayonnement solaire. Calculer la température d'équilibre qu'il atteindrait dans cette situation. Pourquoi les satellites embarquent-ils des résistances chauffantes et une isolation multicouche ?
- 6.2 Ce modèle suppose la température uniforme à la surface du satellite. Cette hypothèse est-elle réaliste pour un satellite dont une face est toujours éclairée ? Proposer une solution technique.

Exercice 7 D'où vient la loi de Newton ?



(Hors programme — pour aller plus loin.) Un corps de surface S , à la température $T = T_{ext} + \Delta T$, est entouré de parois à la température T_{ext} . On admettra l'approximation $(1 + x)^4 \approx 1 + 4x$, valable lorsque $|x| \ll 1$.

■ **DONNÉES** $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

- 7.1 Exprimer la puissance nette perdue par rayonnement par ce corps en fonction de σ , S , T et T_{ext} .
- 7.2 En posant $x = \Delta T / T_{ext}$, montrer que pour $|\Delta T| \ll T_{ext}$ cette puissance s'écrit $P \approx 4\sigma T_{ext}^3 S \Delta T$: le rayonnement obéit alors lui aussi à une loi de la forme $\Phi = h_{ray} S (T_{ext} - T)$. Donner l'expression de h_{ray} .
- 7.3 Calculer h_{ray} pour $T_{ext} = 293 K$. Comparer à un coefficient de convection naturelle dans l'air, de l'ordre de $5 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$: que vaut alors le coefficient h « global » d'un objet posé dans une pièce, et quelle part chacun des deux modes y prend-il ?
- 7.4 Comparer, pour $\Delta T = 10 K$ puis $\Delta T = 100 K$, la valeur exacte de P/S et sa valeur approchée. Jusqu'où la loi de Newton est-elle un bon modèle ?