

Exercices 2 Transferts thermiques

Application : murs multicouches, isolation d'un logement, bilan radiatif terrestre, refroidissements

7 exercices · niveau ●●○ · durée conseillée : 1 h 45 · calculatrice autorisée

★ À RETENIR — Ce qu'il faut savoir faire à la fin de la feuille

- Traiter une paroi composée : résistance thermique totale, flux, températures d'interface, calcul d'économies d'énergie.
- Établir un bilan radiatif du système Terre-atmosphère : albédo, loi de Stefan-Boltzmann, effet de serre, forçage radiatif.
- Exploiter un relevé expérimental de refroidissement et une simulation Python par la méthode d'Euler.

Exercice 1 La coupe d'un mur isolé

●●○

Le mur de la figure 1, de surface $S = 24,0 \text{ m}^2$, sépare une pièce à 19°C de l'extérieur à 2°C .

- 1.1 Calculer la résistance thermique de chacune des trois couches, puis la résistance thermique totale du mur et le flux thermique qui le traverse.
- 1.2 En régime permanent, le flux thermique est le même à travers chaque couche. Justifier cette affirmation par un bilan d'énergie sur une couche.
- 1.3 En déduire l'écart de température aux bornes de chaque couche, puis les températures des deux interfaces.
- 1.4 Représenter l'allure du profil de température dans l'épaisseur du mur. Dans quelle couche la pente est-elle la plus forte ? Relier cette observation à λ .
- 1.5 Quel pourcentage de la résistance thermique totale la laine minérale apporte-t-elle ? Quelle épaisseur de parpaing aurait la même résistance thermique que la laine ?

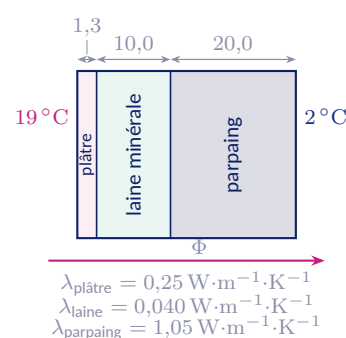


Figure 1 — Coupe du mur (intérieur à gauche ; épaisseurs en cm, échelle non respectée)

Exercice 2 Jusqu'où faut-il isoler les combles ?

●●○

Le plafond d'un pavillon a une surface $S = 90,0 \text{ m}^2$ et une résistance thermique propre (charpente et plaques) $R_0 = 1,00 \times 10^{-2} \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$. On déroule par-dessus une laine de verre de conductivité $\lambda = 0,040 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et d'épaisseur e . Pendant la saison de chauffe, d'une durée de 180 j, l'écart moyen de température entre le logement et les combles vaut 15°C .

■ DONNÉES 1 kWh = $3,6 \times 10^6 \text{ J}$ • prix du kWh : 0,25 €

$e \text{ (cm)}$	10,0	20,0	30,0	40,0
$R_{\text{th}} \text{ (K}\cdot\text{W}^{-1}\text{)}$				
$\Phi \text{ (W)}$				

- 2.1 Exprimer la résistance thermique totale du plafond isolé en fonction de e , puis recopier et compléter le tableau ci-dessus.

- 2.2** Comparer les gains de flux obtenus en passant de 10 cm à 20 cm, de 20 cm à 30 cm, puis de 30 cm à 40 cm, et expliquer ce comportement à partir de l'expression de R_{th} .
- 2.3** Calculer, pour les deux premiers de ces trois passages, l'énergie économisée sur une saison de chauffe (en kWh) puis l'économie en euros.
- 2.4** Chaque couche de 10 cm supplémentaire coûte 1 080 € posée. Calculer le temps de retour sur investissement dans les deux cas et conclure sur l'épaisseur à conseiller.

Exercice 3 Le ballon d'eau chaude



Un chauffe-eau contient $V = 200$ L d'eau maintenue à 60°C par une résistance chauffante. Il est placé dans un garage à 15°C . Sa cuve est entourée d'une mousse isolante d'épaisseur $e = 5,0$ cm, de conductivité $\lambda = 0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; la surface d'échange vaut $S = 2,8 \text{ m}^2$ et l'on assimile la paroi à une paroi plane.

■ **DONNÉES** $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ • masse volumique de l'eau : $1,00 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$ • $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$ • prix du kWh : 0,25 €

- 3.1** Calculer la résistance thermique de l'isolant, puis le flux thermique perdu par le ballon.
- 3.2** En déduire l'énergie perdue en 24 h, en kWh, puis le coût annuel de ces seules pertes.
- 3.3** Le ballon est mis hors tension. Justifier que la loi de Newton s'écrit ici $\Phi = \frac{1}{R_{th}} (T_{\text{ext}} - T)$, puis montrer que le temps caractéristique vaut $\tau = m c R_{th}$. Le calculer en heures.
- 3.4** Calculer la température de l'eau 24 h après la coupure, puis la durée nécessaire pour qu'elle descende de 60°C à 50°C . Pourquoi conseille-t-on de couper le chauffe-eau lors d'une absence de plusieurs jours ?

Exercice 4 Un refroidissement au laboratoire



On verse $m = 200$ g d'eau chaude dans un bécher et on relève sa température au cours du temps. L'air de la salle est à $T_{\text{ext}} = 21,0^\circ\text{C}$ et la surface d'échange du bécher vaut $S = 3,6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$. On pose $\theta = T - T_{\text{ext}}$.

■ **DONNÉES** $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

t (min)	0	3	6	9	12	15	20	25	30
T ($^\circ\text{C}$)	80,0	71,8	64,7	58,6	53,4	48,9	42,7	37,9	34,2

- 4.1** En admettant la loi de Newton, montrer que $\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau}$, puis que $\ln \theta$ est une fonction affine de t de coefficient directeur $-1/\tau$. Calculer θ et $\ln \theta$ (θ en $^\circ\text{C}$) pour $t = 0$ min, 15 min et 30 min.
- 4.2** Les neuf points $(t; \ln \theta)$ sont alignés. Déterminer le coefficient directeur de la droite obtenue, en min^{-1} , puis la valeur de τ en minutes et en secondes. Que peut-on conclure sur le modèle ?
- 4.3** En déduire la valeur du coefficient h , avec son unité, puis la température prévue à $t = 45$ min. Citer un phénomène, absent du modèle, qui rend le refroidissement réel d'un bécher ouvert plus rapide que prévu.

Exercice 5 Python : simuler un refroidissement par la méthode d'Euler



L'équation différentielle du refroidissement précédent s'écrit $\frac{dT}{dt} = \frac{T_{\text{ext}} - T}{\tau}$; la méthode d'Euler consiste à écrire, sur un petit intervalle de durée Δt , $T(t + \Delta t) \approx T(t) + \Delta t \times \frac{dT}{dt}$.

```

1 Text, tau = 21.0, 1200.0      # en degres Celsius et en secondes
2 dt = 30.0
3 t, T = 0.0, 80.0
4 temps, temperature = [t], [T]
5 while t < 1800.0:
6     T = ...                  # ligne a completer
7     t = t + dt
8     temps.append(t)
9     temperature.append(T)
10 print(round(temperature[-1], 1))

```

- 5.1** Que représentent les variables T_{ext} et τ ? Pourquoi le pas Δt doit-il rester petit devant τ ? Compléter la ligne 6.
- 5.2** Calculer « à la main » les deux premières valeurs de température calculées par le programme, aux dates 30 s et 60 s.
- 5.3** Calculer la valeur exacte à $t = 60$ s avec $T(t) = T_{\text{ext}} + (T_0 - T_{\text{ext}})e^{-t/\tau}$, puis l'écart relatif avec la valeur approchée. Dans quel sens Euler se trompe-t-il ici ?
- 5.4** Le programme affiche 33.9. Comparer à la valeur exacte à $t = 1800$ s et indiquer comment améliorer la précision de la simulation.

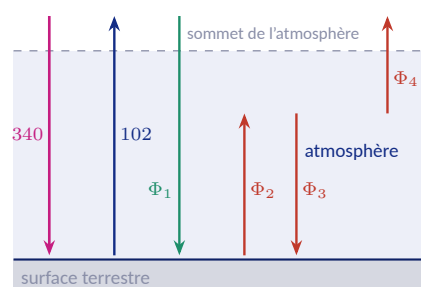
Exercice 6 Le bilan radiatif du système Terre-atmosphère



Le Soleil apporte au sommet de l'atmosphère un flux surfacique $S_0 = 1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ mesuré perpendiculairement aux rayons. L'albédo du système Terre-atmosphère vaut $a = 0,30$. La figure 2 représente, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ et en moyenne sur l'ensemble de la surface terrestre, les flux échangés.

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

- 6.1** Justifier que le flux solaire moyen reçu par mètre carré de surface terrestre vaut $S_0/4$, et vérifier la valeur $340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ de la figure 2. En déduire Φ_1 et Φ_4 .
- 6.2** La surface terrestre se comporte comme un corps rayonnant à $T_s = 288 \text{ K}$. Calculer Φ_2 .
- 6.3** En écrivant que la surface terrestre reçoit autant de puissance qu'elle en émet, en déduire Φ_3 . Quel phénomène ce flux traduit-il ? Citer deux gaz qui en sont responsables.
- 6.4** Sans atmosphère, le sol devrait rayonner Φ_1 : calculer la température correspondante et l'écart avec 288 K .
- 6.5** L'accroissement des gaz à effet de serre est équivalent à un *forçage radiatif* de $2,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$: le flux émis vers l'espace devient inférieur de $2,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ au flux absorbé. Vu de l'espace, le système Terre-atmosphère rayonne comme un corps à la température de la question 6.4. Calculer la température pour laquelle ce corps émettrait $2,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ de plus, ce qui rétablirait l'équilibre, et l'élévation de température correspondante.
- 6.6** La fonte des glaces fait passer l'albédo de $0,30$ à $0,28$: calculer la nouvelle température de la question 6.4. Pourquoi parle-t-on de *rétroaction positive* ?



340 : flux solaire incident
102 : renvoyé vers l'espace (albédo)
 Φ_1 : absorbé par la surface
 Φ_2 : émis par la surface
 Φ_3 : réémis vers le sol
 Φ_4 : émis vers l'espace

Figure 2 — Flux moyens, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

Exercice 7 Le temps de réponse d'un thermomètre



La sonde d'un thermomètre ($m = 12 \text{ g}$, $c = 460 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $S = 6,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), initialement à 20°C , est plongée dans un bain thermostaté à 55°C ; dans l'eau agitée, $h = 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

- 7.1** Calculer le temps caractéristique τ de la sonde dans l'eau.
- 7.2** Quelle température le thermomètre indique-t-il 20 s après l'immersion ? Quelle erreur commet-on en lisant à cet instant ?
- 7.3** Déterminer la durée au bout de laquelle l'écart avec la température du bain devient inférieur à $0,5^\circ \text{C}$. Quelle consigne pratique en déduire ?
- 7.4** La même sonde est utilisée dans l'air, où $h = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$: calculer le nouveau temps caractéristique et commenter. Citer enfin deux modifications de la sonde qui réduiraient son temps de réponse.