

Fiche de cours Transferts thermiques

L'essentiel du chapitre en deux pages

définitions · lois · méthodes · à savoir par cœur

1 LES TROIS MODES DE TRANSFERT THERMIQUE

Définition. Un transfert thermique est un transfert d'énergie qui se fait spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Il se produit selon trois modes :

- la **conduction** : de proche en proche, par contact, *sans* déplacement macroscopique de matière (manche d'une casserole, mur d'une maison); elle est efficace dans les métaux, faible dans les isolants;
- la **convection** : par déplacement d'ensemble d'un fluide, les zones chaudes, moins denses, montent (eau qui bout, air au-dessus d'un radiateur);
- le **rayonnement** : par ondes électromagnétiques, sans support matériel, donc *possible dans le vide* (chaleur du Soleil, feu de cheminée).

2 FLUX THERMIQUE ET RÉSISTANCE THERMIQUE

Définition. Le **flux thermique** est l'énergie transférée par unité de temps : $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$, en W (Q en J, Δt en s). C'est la puissance thermique échangée.

Propriété — loi de la résistance thermique. À travers une paroi dont les faces sont aux températures $T_1 > T_2$, en régime permanent,

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

où e est l'épaisseur (m), S l'aire de la paroi (m^2) et λ la **conductivité thermique** du matériau ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); R_{th} s'exprime en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Propriété — parois en série. Des couches accolées et traversées par le *même* flux ont des résistances qui s'ajoutent : $R_{th} = R_1 + R_2 + \dots$. Isoler, c'est augmenter R_{th} : forte épaisseur e et faible conductivité λ (laine de verre, lame d'air d'un double vitrage).

Remarque. Un bon conducteur a un λ élevé (métaux); un bon isolant a un λ faible. L'énergie perdue pendant une durée Δt vaut $Q = \Phi \Delta t$, ce qui donne le coût du chauffage.

3 RAYONNEMENT ET BILAN RADIATIF DE LA TERRE

Propriété — loi de Stefan-Boltzmann. (fournie) Un corps de surface S porté à la température T (en K) rayonne la puissance

$$P = \sigma S T^4, \quad \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}.$$

Définition. L'**albédo** a est la fraction de la puissance solaire incidente directement renvoyée vers l'espace ($a \approx 0,30$ pour la Terre). La Terre, disque de surface πR_T^2 face au Soleil, reçoit $S_0 \pi R_T^2$ et en absorbe la fraction $(1 - a)$; elle rayonne par toute sa surface $4\pi R_T^2$.

Propriété — température d'équilibre. En régime d'équilibre, puissance absorbée = puissance rayonnée, soit $S_0 (1 - a) \pi R_T^2 = \sigma 4\pi R_T^2 T_e^4$, d'où

$$T_e = \left(\frac{S_0 (1 - a)}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 255 \text{ K}, \quad \text{soit} \quad -18^\circ \text{C}.$$

La température moyenne réelle étant de 288 K, l'écart de 33 K est dû à l'**effet de serre** : l'atmosphère est transparente au rayonnement visible du Soleil mais absorbe le rayonnement infrarouge émis par le sol et en réémet une partie vers la surface.

4 LOI DE NEWTON ET REFROIDISSEMENT

Propriété — loi phénoménologique de Newton. Un corps de température uniforme T placé dans un milieu à T_{ext} reçoit le flux thermique $\Phi = h S (T_{\text{ext}} - T)$, où h est le coefficient de transfert surfacique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

Théorème. Le premier principe appliqué au corps ($\Delta U = Q$) donne, pendant dt , l'équation différentielle

$$m c \frac{dT}{dt} = h S (T_{\text{ext}} - T) \quad \text{soit} \quad \frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{\text{ext}}}{\tau}, \quad \tau = \frac{m c}{h S},$$

dont la solution, pour une température initiale T_0 , est $T(t) = T_{\text{ext}} + (T_0 - T_{\text{ext}}) e^{-t/\tau}$.

Définition. τ est le **temps caractéristique** du refroidissement (en s) : l'écart $T - T_{\text{ext}}$ est réduit de 63 % au bout de τ (il n'en reste que 37 %) ; l'équilibre thermique est pratiquement atteint au bout de 5τ . La tangente à l'origine coupe l'asymptote $T = T_{\text{ext}}$ à la date $t = \tau$.

Remarque. Plus la masse ou la capacité thermique sont grandes, plus τ est grand : c'est l'*inertie thermique*. Plus h ou la surface d'échange sont grands, plus le refroidissement est rapide.

■ DONNÉES — Valeurs de référence

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ • constante solaire $S_0 = 1\,361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ • $c_{\text{eau}} = 4,18 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ • λ : béton 1,10, verre 1,00, air 0,026, laine de verre 0,038 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ • $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$.

5 SAVOIR-FAIRE DU CHAPITRE

► SAVOIR-FAIRE

- Identifier les modes de transfert mis en jeu dans une situation concrète et les justifier.
- Calculer un flux thermique, une énergie transférée, une résistance thermique (paroi simple ou couches en série).
- Comparer deux solutions d'isolation et interpréter l'effet d'une épaisseur ou d'une conductivité.
- Mener le bilan radiatif d'une planète et calculer sa température d'équilibre ; interpréter l'effet de serre.
- Établir et résoudre l'équation différentielle de la loi de Newton ; exploiter τ , graphiquement ou par le calcul.

6 EXEMPLES TYPES

★ EXEMPLE — isolation d'un mur

Mur de béton : $e_1 = 20,0 \text{ cm}$, $S = 18,0 \text{ m}^2$, $\lambda_1 = 1,10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, entre 19°C et 4°C . Alors $R_1 = \frac{e_1}{\lambda_1 S} = 1,01 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $\Phi = \frac{15}{1,01 \times 10^{-2}} = 1,5 \times 10^3 \text{ W}$. Avec 12,0 cm de laine de verre ($\lambda_2 = 0,038 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), $R_2 = 0,175 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$, $R_{\text{th}} = R_1 + R_2 = 0,186 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ et $\Phi = 81 \text{ W}$: les pertes sont divisées par 18.

★ EXEMPLE — bilan radiatif

Puissance absorbée $S_0(1 - a)\pi R_T^2$, puissance rayonnée $\sigma 4\pi R_T^2 T_e^4$. L'égalité donne $T_e = \left(\frac{1361 \times 0,70}{4 \times 5,67 \times 10^{-8}} \right)^{1/4} = 255 \text{ K} = -18^{\circ}\text{C}$: sans atmosphère, la Terre serait gelée.

★ EXEMPLE — refroidissement d'un café

$m = 200 \text{ g}$, $c = c_{\text{eau}}$, $S = 4,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, $h = 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$: $\tau = \frac{mc}{hS} = \frac{0,200 \times 4,18 \times 10^3}{15 \times 4,0 \times 10^{-2}} = 1,4 \times 10^3 \text{ s}$, soit 23 min. Parti de 75°C dans une pièce à 20°C , le café est à $20 + 55 e^{-600/1393} = 56^{\circ}\text{C}$ au bout de 10 min.

✗ PIÈGES

- Utiliser des $^{\circ}\text{C}$ dans la loi de Stefan-Boltzmann : T^4 exige des kelvins. En revanche ΔT est identique en K et en $^{\circ}\text{C}$.
- Confondre λ (propriété du matériau) et R_{th} (propriété de la paroi, qui dépend de e et de S) : c'est R_{th} qui s'ajoute, jamais λ .
- Croire que la convection ou la conduction peuvent se produire dans le vide : seul le rayonnement le peut.
- Oublier le facteur 4 du bilan radiatif : la Terre *reçoit* sur un disque et *rayonne* par une sphère.
- Confondre τ et la durée totale du refroidissement : l'équilibre n'est atteint qu'au bout d'environ 5τ .