

Transferts thermiques

I Phénoménologie des transferts thermiques

1. Température locale
2. Différents types de transferts thermiques
3. Flux thermique et vecteur \vec{j}
4. Loi de Fourier
5. Loi de Newton (fournie)

II Étude de régimes stationnaires

1. Régime stationnaire et conservation du flux
2. Diffusion unidimensionnelle
3. Exemple à symétrie cylindrique
4. Formulation locale
5. Exemple de situation avec source volumique d'énergie

III Résistance thermique

1. Analogie avec l'électricité
2. Exemples et applications

IV Régimes non stationnaires

1. Bilan thermique et équation de la chaleur à une dimension
2. Généralisation à trois dimensions
3. Exemple : choc thermique
4. Longueur de diffusion

V Rayonnement thermique

1. Loi de Stefan
2. Loi de Wien
3. Effet de serre
4. Température de la Terre : modèle de la serre
5. Bilan thermique terrestre détaillé

Diffusion thermique : Transfert thermique au travers de la matière sans déplacement macroscopique de matière.

Convection thermique : Transfert thermique au travers de la matière avec déplacement macroscopique de matière.

Rayonnement thermique : Transfert thermique par émission et absorption de rayonnement de rayonnement électromagnétique.

| matériau | cuivre | acier | béton | verre | eau | laine | air |
|---|--------|--------------|--------------|-------|------------|-------|--------------|
| λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) | 400 | 50 | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,04 | 0,025 |

TABLE 1 – Conductivité thermique de matériaux usuels. Les valeurs en gras sont à retenir en ordre de grandeur : 100, 1 et 0,01

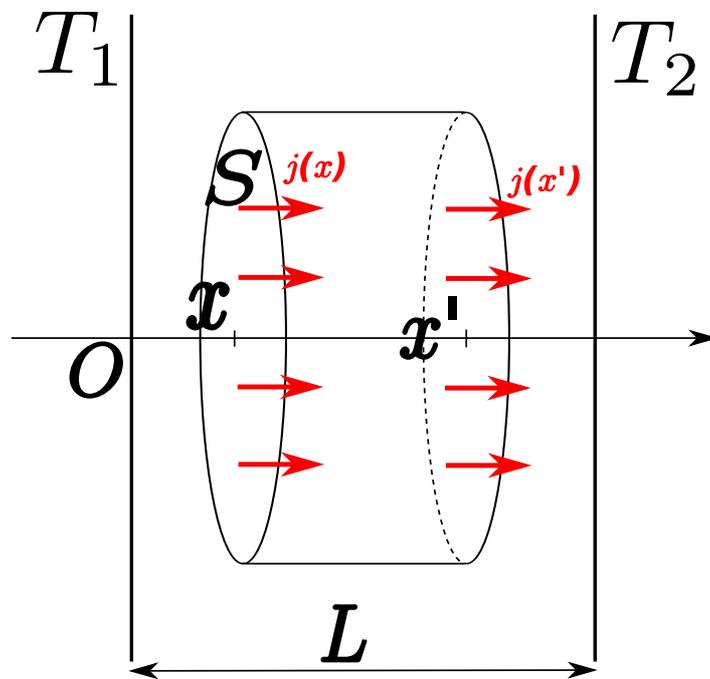
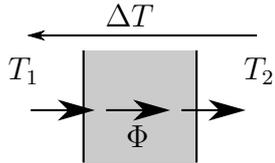
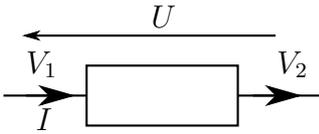


FIGURE 1 – Conduction thermique unidimensionnelle

TABLE 2 – Tableau des analogies entre les transferts thermiques et l'électricité

| Thermique | Électricité |
|--|---|
| transport de chaleur Q (J) | transport de charge Q_{elec} (C) |
| $dQ = \Phi dt$ avec Φ en $W = J.s^{-1}$ | $dQ = I dt$ avec I en $A = C.s^{-1}$ |
| $\vec{j} = \Phi/S$ en $W.m^{-2}$ | $\vec{j}_{\text{elec}} = I/S$ en $A.m^{-2}$ |
| Conservation du flux de \vec{j} | Loi des nœuds |
| Loi de Fourier $\vec{j} = -\lambda \text{grad}T$ conductivité thermique λ λ en $W.m^{-1}.K^{-1}$ | Loi d'Ohm locale $\vec{j}_{\text{elec}} = \gamma \vec{E} = -\gamma \text{grad}V$ conductivité électrique γ γ en $\Omega^{-1}.m^{-1}$ |
| Température T Écart de température $\Delta T = T_1 - T_2$ | Potentiel V Tension ou ddp $U = V_1 - V_2$ |
| $\Delta T = T_1 - T_2 = R_{\text{th}} \Phi$  | $U = V_1 - V_2 = RU$  |
| R_{th} en $K.W^{-1}$ dépend de λ et de la géométrie de l'objet traversé par le flux thermique. | R en $\Omega = V.A^{-1}$ dépend de γ et de la géométrie de l'objet parcouru par le courant. |
| $\Phi = G_{\text{th}} \Delta T = G_{\text{th}}(T_1 - T_2)$ $G_{\text{th}} = 1/R_{\text{th}}$ en $W.K^{-1}$ | $I = GU = G(V_1 - V_2)$ $G = 1/R$ en $S = A.V^{-1}$ |
| méthodes identiques : lois d'associations, ponts diviseurs, etc | |

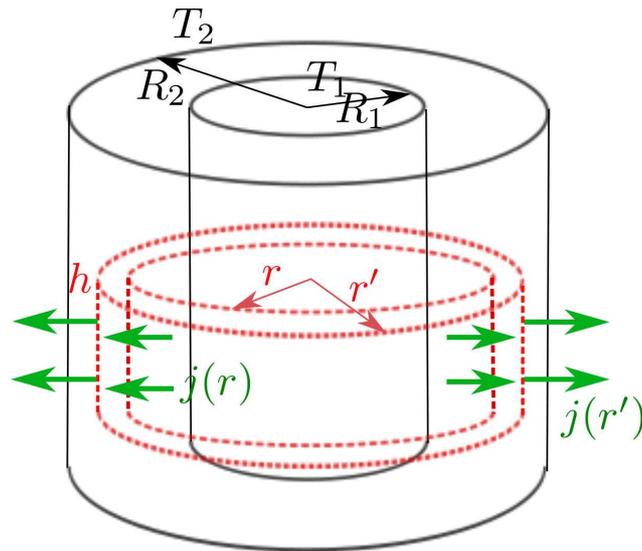


FIGURE 2 – Conduction thermique radiale dans une gaine cylindrique

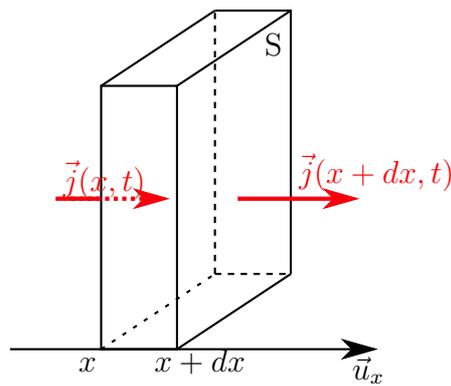


FIGURE 3 – Bilan thermique unidimensionnel sur un élément infinitésimal

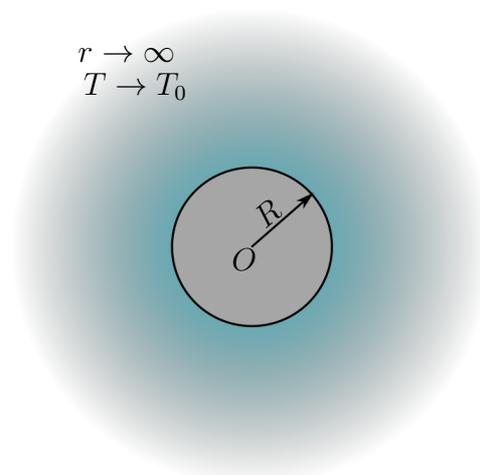


FIGURE 4 – Conduction thermique radiale autour d'un boule radioactive

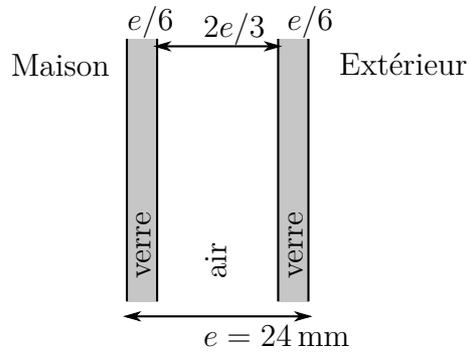


FIGURE 5 – Double vitrage

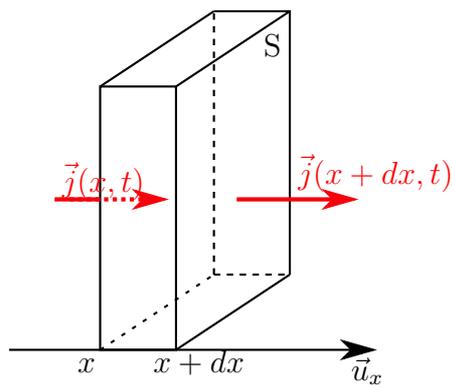


FIGURE 6 – Bilan thermique sur un élément infinitésimal en régime variable

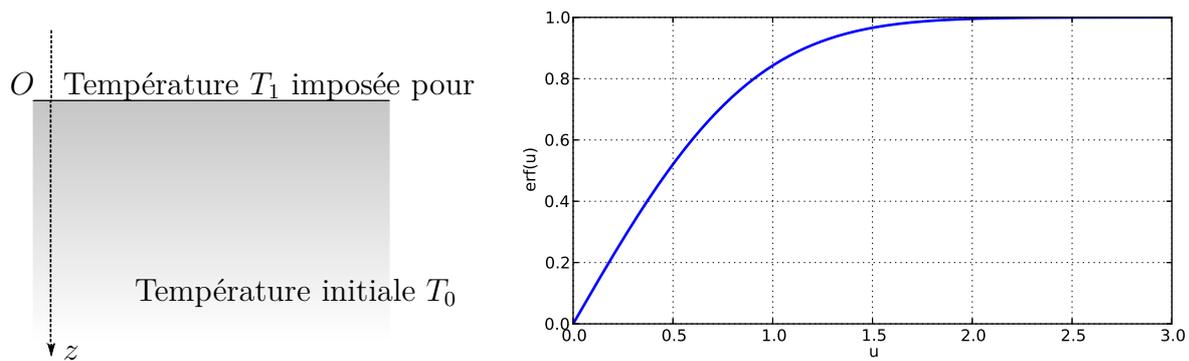


FIGURE 7 – À gauche : configuration géométrique pour l'étude d'un choc thermique. À droite : graphe de la fonction d'erreur.

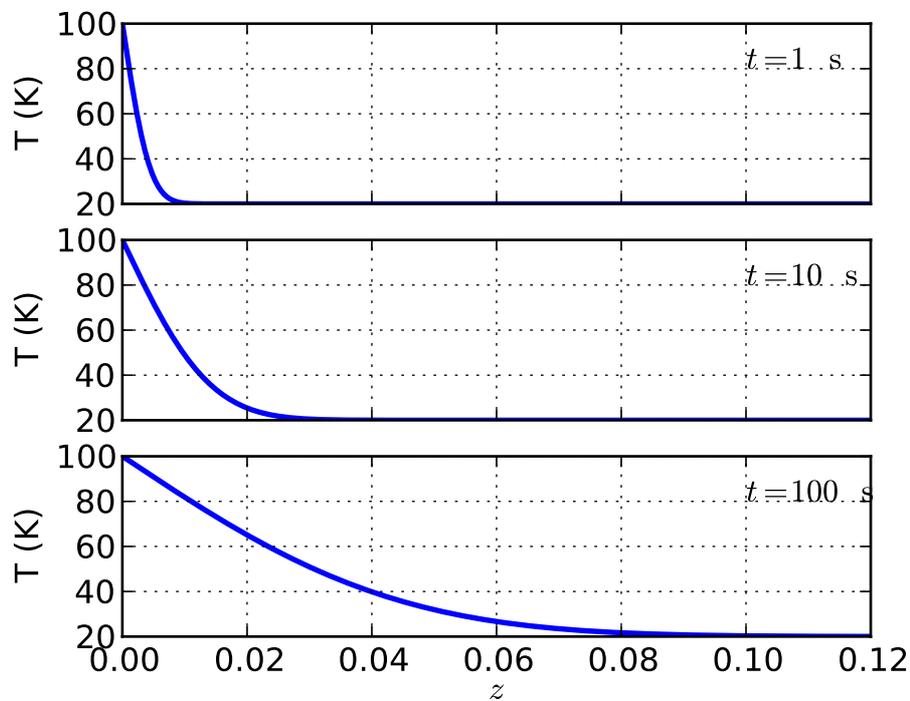


FIGURE 8 – Trois profils de températures dans un choc thermique avec $T_1 = 100^\circ\text{C}$ et $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Au fil de temps, l'élévation de température se fait ressentir à des profondeurs de plus en plus grandes.

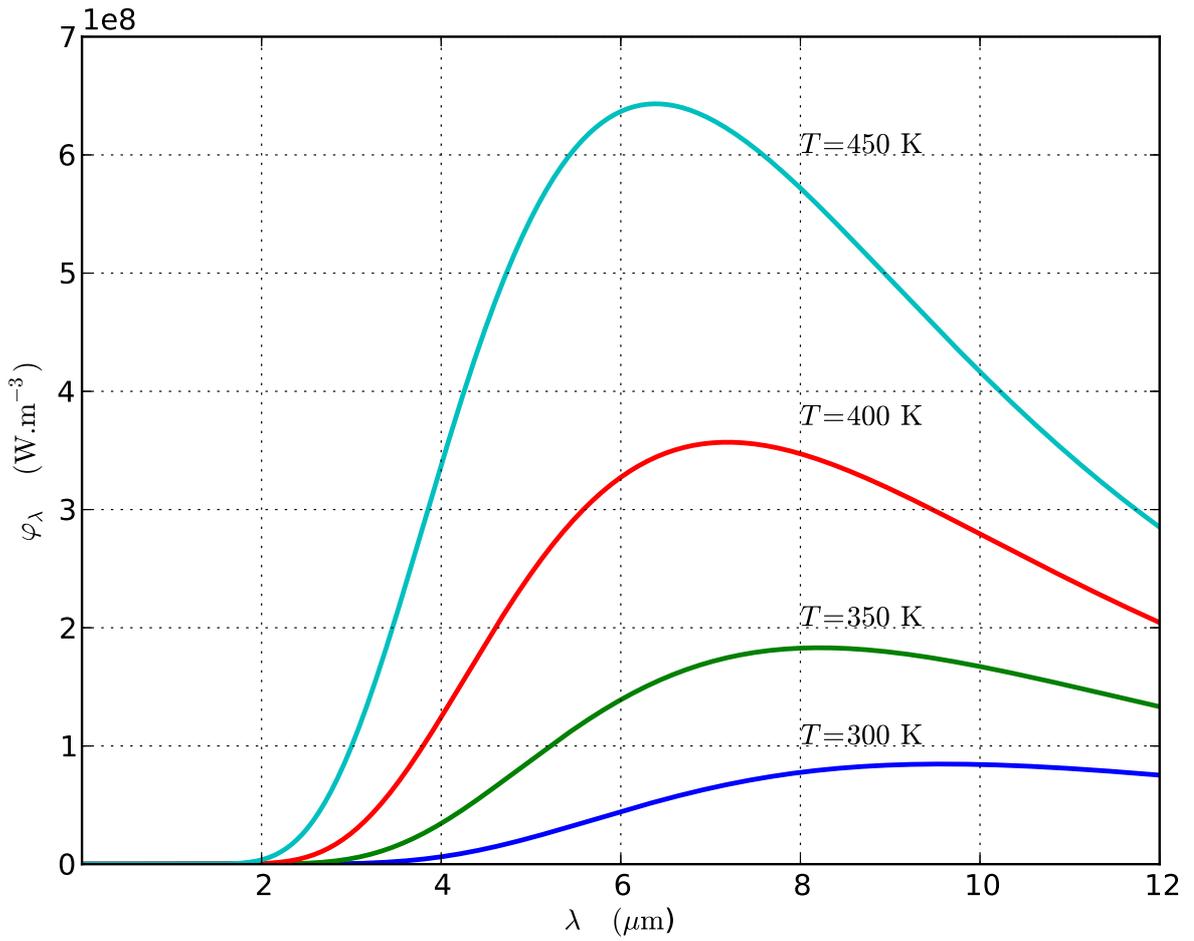


FIGURE 9 – Rayonnement thermique selon la loi de Planck

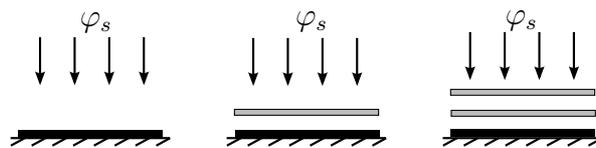


FIGURE 10 – Température d’une plaque noire au soleil, avec éventuellement la présence de vitres

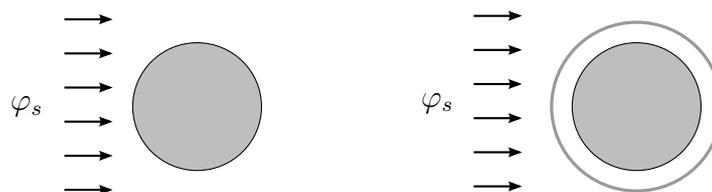


FIGURE 11 – Estimation de la température de la Terre, sans ou avec effet de serre

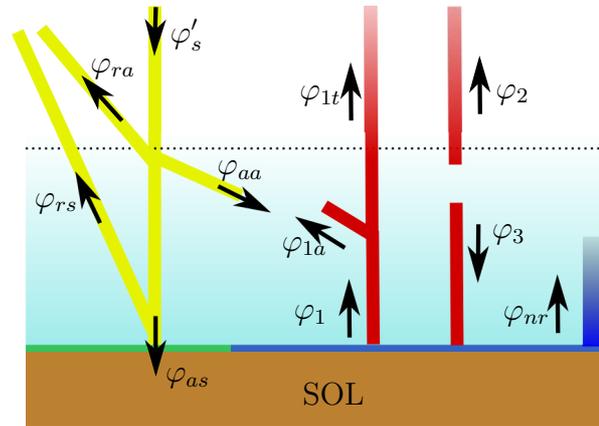


FIGURE 12 – Bilan thermique de la Terre. Données GIEC 2002, cités par M.A. Mélières (site du CNRS). Voir aussi l'article *Earth's global energy budget*, K. Trenberth, J.T. Fasullo, J. Kiehl, American Meteorological Society, mars 2009, p 311 (disponible en ligne). Les échanges sont caractérisés par leur flux par unité de surface.

| Terme | W.m^{-2} | phénomène décrit |
|----------------|-------------------|--|
| φ'_s | 342 | flux solaire moyen au dessus de l'atmosphère (visible et proche infra-rouge) |
| φ_{ra} | 77 | partie du flux solaire réfléchi par l'atmosphère |
| φ_{aa} | 67 | partie du flux solaire absorbée par l'atmosphère |
| φ_{rs} | 30 | partie du flux solaire réfléchi par le sol |
| φ_{as} | 168 | partie du flux solaire absorbée par le sol |
| φ_1 | 390 | rayonnement thermique émis par le sol (infra-rouge) |
| φ_{1a} | 350 | partie du rayonnement thermique émis par le sol absorbée par l'atmosphère |
| φ_{1t} | 40 | partie du rayonnement thermique émis par le sol transmise par l'atmosphère |
| φ_2 | 195 | rayonnement thermique émis par l'atmosphère vers l'espace |
| φ_3 | 324 | rayonnement thermique émis par l'atmosphère vers la Terre |
| φ_{nr} | 102 | échanges non radiatifs de la terre vers l'atmosphère (cycle de l'eau avec évaporation et condensation, chauffage de l'air par le sol et ascension par convection). |

TABLE 3 – Termes du bilan thermique terrestre.