Transfert d'énergie par conduction thermique

Extrait du programme

La partie **7** aborde l'étude de la conduction thermique dans les solides. On se limite à l'étude de problèmes unidimensionnels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
7. Transfert d'énergie par conduction thermique	
Densité de flux thermique.	Définir et algébriser la puissance thermique échangée à travers une interface.
Loi de Fourier.	Lier la non-uniformité de la température à l'existence d'un flux thermique et interpréter son sens. Citer des ordres de grandeur de conductivité thermique dans le domaine de l'habitat.
Bilan enthalpique.	Établir une relation différentielle entre la température et le vecteur densité de flux thermique.
Équation de la chaleur sans terme source.	Établir l'équation de la diffusion thermique. Interpréter qualitativement l'irréversibilité du phénomène. Lier le temps et la longueur caractéristiques d'un phénomène de diffusion au coefficient de diffusion par une analyse dimensionnelle.
Analogie électrique dans le cas du régime stationnaire.	Définir la résistance thermique. Exploiter l'analogie lors d'un bilan thermique.
Loi de Newton.	Exploiter la loi de Newton fournie pour prendre en compte les échanges conducto-convectifs en régime stationnaire.

Formation expérimentale

Nature et méthodes	Capacités exigibles
4. Thermodynamique	
Conduction thermique.	Mettre en oeuvre un dispositif de mesure de conductivité thermique le protocole étant donné.

Sommaire

Liens utiles pour revoir le cours

Les transferts thermiques (Partie 1) : https://www.youtube.com/watch?v=cHljISVSR_E
Les transferts thermiques (Partie 2) : https://www.youtube.com/watch?v=10YeVC5uqBQ
Les transferts thermiques (Partie 3) : https://www.youtube.com/watch?v=LCwHaAjseIA
Loi de Fourier et résistance thermique : https://www.youtube.com/watch?v=_dzP67v0B_0
Equation de la chaleur : https://www.youtube.com/watch?v=EzAlblWb0jg

6 Questions de cours

1) Décrire les trois modes de transfert thermique.

2) Définir les notions de flux thermique, vecteur densité de flux thermique.

3) Donner la loi de Fourier (en 3D) et sa simplification pour une propagation unidimensionnelle. Définir les termes rentrant dans son expression.

4) Démontrer l'équation de la chaleur en faisant un bilan enthalpique sur une épaisseur dx de matériau de conductivité λ .

5) Comment appelle-t-on le coefficient entrant en compte dans l'équation de la chaleur ? Donner son expression. Quelle est sa signification physique ?

6) Résoudre l'équation de la chaleur dans le cas du régime stationnaire.

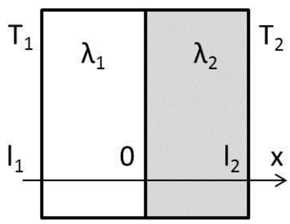
On prendra le cas d'une tige pour rester avec un problème unidimensionnel. On suppose donc de plus qu'il n'y a aucun échange thermique entre la tige et le milieu extérieur par la surface latérale du cylindre (isolation thermique). Cette tige est cylindrique de section S, de longueur L et ses extrémités sont aux températures $T_1 \; et \; T_2 \; (T_1 > T_2)$. Donner l'expression de la température, densité de flux thermique et flux thermique. Commenter.

7) Définir la notion de résistance thermique. Donner l'analogie avec l'électricité.

8) On donne la loi de Newton : $j_N = h(T_S - T_0)$. Expliquer les différents termes entrant dans son expression. Définir une résistance thermique pour ce type de transfert thermique.

7 Exercices

7.1 Contacts thermiques



Lorsqu'on touche deux objets à la même température, l'un en bois et l'autre en métal, celui en métal semble plus froid que celui en bois, malgré leurs températures identiques. L'objet de ce problème est d'étudier ce phénomène.

On étudie la conduction thermique suivant $\overrightarrow{u_x}$ entre deux solides 1 et 2, de même section S, portés aux températures extrémales T_1 et T_2 :

1) Etablir l'expression de la température $T(x), x \in [l_1, l_2]$.

2) Etablir la valeur de la température T_0 de la jonction en fonction de T_1 et T_2.

3) Calculer numériquement T_0 pour un contact 1/2 métal/peau puis bois/peau (on prendra $l_1 = l_2$) où $T_1 = 20°C$, $T_2 = 37°C$. Conclure quant à la sensation de froid.

<u>Données</u> :

	métal	corps humain	bois
$\lambda(W.m^{-1}.K^{-1})$	350	$6{,}0.10^{-1}$	$7{,}5.10^{-1}$

7.2 Contacts thermiques (suite)

On reprend l'exercice précédent. On pose R_{th1} et R_{th2} les résistances thermiques relatives aux solides 1 et 2.

1) Comment exprimer ces résistances en fonction de l_1, l_2, λ_1, λ_2 et S, la surface en contact des deux solides ?

2) Etablir la valeur de la température T_0 de la jonction en fonction de T_1, T_2, R_{th1} et R_{th2}.

3) Envisager et commenter les cas $R_{th1} \gg R_{th2}$ et $R_{th1} = R_{th2}$.
4) Comparer avec les résultats de l'exercice précédent.

7.3 Bilan entropique macroscopique

Les extrémités d'un cylindre C de section S, de longueur l, de conductivité thermique λ, sont portées aux températures $T(0) = T_1$ et $T(l) = T_2$. Les parois du cylindre sont parfaitement calorifugées. L'étude a lieu en régime permanent indépendant du temps. Toutes les réponses sont attendues en fonction de T_1, T_2, λ, S et l.

1) $\overrightarrow{j_{th}} = j_{th}\overrightarrow{u_x} \quad avec \quad j_{th} > 0$: quelle est l'inégalité entre T_1 et T_2 ?
2) Quel est le flux thermique Φ traversant une section droite de C ?
3) Quelle est la variation d'entropie dS de C pendant la durée dt ?
4) Quelle est l'entropie δS_{ech} échangée par C avec les sources extérieures à T_1 et T_2 pendant dt ?
5) Quelle est l'entropie $\delta S_{créé}$ dans C pendant dt ? Conclure.

7.4 Simple et double vitrage

On considère une pièce à la température $T_i = 20°C$. La température extérieure est $T_e = 5°C$. On étudie les transferts thermiques avec l'extérieur à travers une vitre en verre de conductivité thermique $\lambda = 1{,}15 W.m^{-1}.K^{-1}$, de largeur 60 cm, de hauteur 60 cm et d'épaisseur 3mm. On suppose qu'il n'y a pas de flux sortant à travers les autres parois de la pièce. On se place en régime stationnaire.

1) Définir et calculer la résistance thermique de la vitre. En déduire le flux thermique sortant à travers le simple vitrage.
2) On remplace le simple vitrage par un double vitrage constitué d'une vitre de 3 mm d'épaisseur, d'une couche d'air de conductivité thermique $\lambda_{air} = 0{,}025 W.m^{-1}.K^{-1}$, d'épaisseur 10 mm et d'une autre vitre identique à la première. Donner le schéma thermique équivalent. Calculer le flux thermique sortant à travers le double vitrage et les différentes températures dans le double vitrage. Interpréter.

7.5 Chauffage d'une pièce

On souhaite maintenir constante la température d'une pièce à $T_i = 20°C$. La résistance thermique des 4 murs et du sol est $R_{th1} = 10{,}0.10^{-3} K.W^{-1}$. La résistance thermique du plafond et des tuiles est $R_{th2} = 2{,}0.10^{-3} K.W^{-1}$. La température de l'extérieur est $T_e = 10°C$. On se place en régime stationnaire.

1) Calculer la puissance thermique P à apporter à la pièce pour maintenir constante la température.
2) On améliore l'isolation thermique en rajoutant une plaque de matériau isolant entre le plafond et les tuiles. Calculer la résistance thermique de ce matériau afin de réaliser une économie de 50% sur la puissance thermique.

7.6 Isolant

Une couche d'isolant d'épaisseur $d = 10 cm$ et de conductivité thermique $\lambda = 0{,}04 W.m^{-1}.K^{-1}$ a une face maintenue à la température $T_1 = 100°C$. L'autre face est refroidie par convection par un courant d'air à $T_0 = 25°C$ qui doit maintenir sa température à la valeur de $T_S = 30°C$ (en régime permanent).

Calculer quelle doit être la valeur du coefficient h défini dans la loi de Newton : $j_N = h\left(T_S - T_0\right)$. On résoudra d'abord le problème sans faire appel à la notion de résistances thermiques, puis en les utilisant. Quel paramètre peut-on adapter simplement pour obtenir cette valeur ?

7.7 Ailette de refroidissement

On considère une barre de cuivre cylindrique de rayon $a = 5mm$, de longueur L. En $x = 0$, la barre de cuivre est en contact avec un milieu à la température $T_0 = 330K$. Tout le reste de la tige est en contact avec l'air ambiant de température uniforme $T_e = 300K$. On appelle $\lambda = 400W.m^{-1}.K^{-1}$ la conductivité thermique du cuivre et $h = 12W.m^{-2}.K^{-1}$ le coefficient de transfert conducto-convectif entre la barre de cuivre et l'air. On se place en régime stationnaire. On pose $\delta = \sqrt{\frac{\lambda a}{2h}}$. On considère que la longueur de la tige est quasi-infinie.

On rappelle la loi de Newton :

La densité de flux thermique sortant à travers la surface d'un solide en contact avec un fluide est proportionnelle à l'écart entre la température T_S de la surface du solide et le température T_0 du fluide : $j_N = h\left(T_S - T_0\right)$

1) Faire un schéma en explicitant le bilan de puissance en régime stationnaire.
2) Déterminer le profil de température T(x) en tout point de la barre de cuivre.

7.8 Centrale TSI 2016

On étudie maintenant le phénomène de diffusion thermique dans l'eau des seaux. On modélise le serpentin par un conducteur de cuivre compris entre les cylindres de hauteur H et de rayons R' et $R > R'$ (figure 7). L'intérieur ($r < R'$) est rempli d'eau de conductivité thermique λ_e, de capacité thermique massique c_e et masse volumique ρ_e grandeurs supposées constantes. On suppose que la température dans le conducteur de cuivre est constante égale à T_c. L'eau est initialement à la température T_0. On suppose que le champ de température dans l'eau est fonction de la distance r à l'axe Oz et du temps t. La conductivité thermique de la glace est $\lambda_g = 2{,}2\ \mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$ et celle de l'eau liquide $\lambda_e = 0{,}60\ \mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$.

On donne $R' = 4\ \mathrm{cm}$, $R = 4{,}2\ \mathrm{cm}$, $H = 15\ \mathrm{cm}$, $c_e = 4{,}2 \times 10^3\ \mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot kg^{-1}}$ et $\rho_e = 1000\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$.

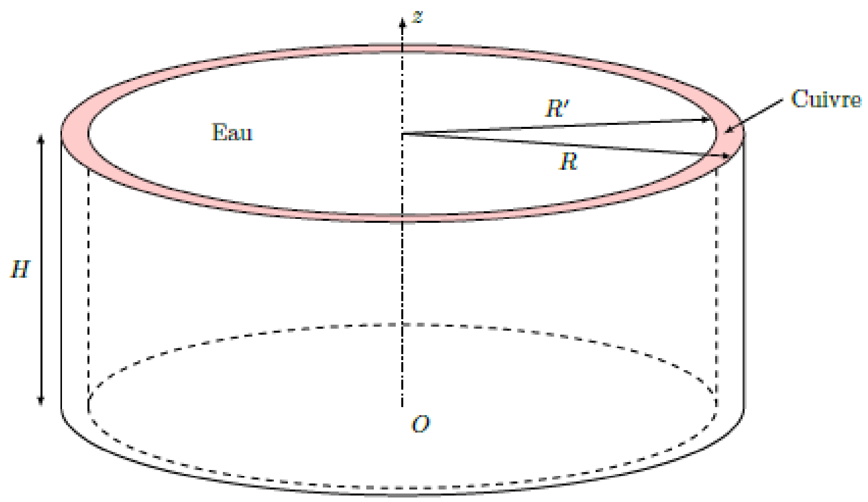


Figure 7 Diffusion thermique

I.B.5) Établir l'équation de diffusion thermique vérifiée par la température $T(r,t)$ dans l'eau à partir d'un bilan enthalpique sur un système élémentaire que l'on précisera et de la loi de Fourier que l'on commentera. On ne prendra en compte ici que le phénomène de diffusion thermique.

I.B.6) En évaluant une durée caractéristique, justifier la nécessité de remuer l'eau.