

LP22 : Transferts thermiques

Niveau : BCPST2

3. Conduction thermique	
Conduction thermique. Résistance thermique.	Réaliser une analogie entre la conduction électrique et la conduction thermique. Interpréter une association de résistances thermiques.
Loi de Fourier.	Établir, dans le cas d'un transport unidirectionnel, un bilan local d'énergie, avec source volumique ou avec échange à travers la paroi.
Diffusivité thermique.	Exprimer le temps caractéristique d'un régime transitoire par analyse dimensionnelle. Établir un bilan global d'énergie dans le cas d'un transport radial cylindrique ou sphérique en régime permanent. Exprimer le champ de température en régime permanent, après avoir proposé des critères plausibles de continuité ou de non divergence.

Figure 1: Programme BCPST2

Prérequis :

- Première approche des transferts thermiques (2aire)
- Thermodynamique (Premier principe, définition d'un système, enthalpie de chaleur latente) (BCPST1)
- Outils mathématiques : développement de Taylor, gradient (BCPST 2)
- Conduction électrique (Intensité, vecteur densité de courant, flux, résistance)

Difficultés :

- Beaucoup d'unités différentes dans cette leçon et dans les autres phénomènes de diffusion
- Beaucoup d'hypothèses à prendre en compte dans les bilans
- Visualisation d'une résistance thermique ou d'une diffusion d'énergie thermique

séquence pédagogique Dans le cadre des phénomènes diffusifs après diffusion de particules et conduction électrique. TD : Double vitrage : calculer la perte énergétique sur une maison.

Dans le cadre du programme, on se concentrera sur la *Conduction thermique selon des modèles unidimensionnels à symétrie axiale ou radiale*.

Bibliographie

- Tec et doc

Introduction

L'énergie thermique peut être transférée entre des systèmes de plusieurs manières. Ainsi, on reçoit de l'énergie thermique du soleil, les radiateurs nous transmettent leur énergie et nous pouvons réchauffer de l'eau en chauffant son récipient. Ces différents transferts exploitent différents modes de transfert thermique

1 Différents modes de transfert thermique

1.1 Transferts conductifs

Transfert thermique au sein d'un support matériel **sans mouvement macroscopique de matière**.

La grandeur caractéristique sera la **conductivité thermique** du matériau.

L'origine du phénomène se situe dans l'agitation thermique des atome augmentée localement et se transférant par des mécanismes complexes.

1.2 Transferts convectifs

Transfert thermique grâce à un mouvement macroscopique de matière.
Elle peut être :

- **Naturelle** : Gradient de température qui provoque un déplacement de matière. (ex : air chaud plus léger que l'air froid qui s'éloigne de la source de chaleur.
- **Forcée** : Deux fluides en mouvement forcé sont mis en contact au cours de leur mouvement par une paroi commune dans un échangeur thermique. On parle de transfert **conducto-convectif**. La grandeur caractéristique est alors le coefficient surfacique de transfert h .

1.3 Transferts par rayonnement

Transfert thermique véhiculé par des ondes électromagnétiques même en l'absence de support matériel.

Les corps chauffés émettent un rayonnement continu dont la longueur d'onde du maximum d'émission varie en sens inverse de T .

Dans le cadre du modèle du corps noir, la puissance émise par unité de surface obéit à la **Loi de Stephan** :

$$P = \sigma T^4$$

avec σ la constante de Stephan ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

Le système est supposé hors équilibre global mais à l'équilibre local.

2 Description du phénomène de conductivité thermique

Dans la vie de tous les jours, on connaît les enjeux de l'isolation.

2.1 Origine expérimentale

L'énergie thermique se déplace des zones de grande température vers les zones de basse température, à la manière de la diffusion de particule.

Diapo manip historique

Dans son expérience historique de **1789**, le physicien hollandais **Ingen Housz** montre que ce transfert d'énergie n'est pas aussi rapide dans tous les matériaux.

Manip cristaux liquides dans eau chaude

Ainsi, on a déjà tous fait l'expérience de marcher sur du carrelage froid et préféré un tapis ou un parquet.

2.2 Les grandeurs de transfert

On définit les grandeurs de transfert de la même manière que dans la conduction électrique : Système : barre métallique dont les extrémités sont maintenues à température constante $T_1 > T_2$

// Barre mtallique soumise à la ddp $V_1 - V_2$

Flux thermique à travers une surface Pour une surface S donnée, on définit le comme l'énergie thermique Q traversant dS par unité de temps. Cela correspond à la puissance thermique :

$$\Phi_{th} = \frac{\partial Q}{\partial t} = P_{th}$$

en J s^{-1}

// intensité en électrique : $I = \frac{\partial Q_e}{\partial t}$

Vecteur densité de courant thermique Il s'agit du flux thermique par unité de surface orienté dans le sens de la diffusion (de T_1 vers T_2) :

$$\Phi_{th} = \iint_S \vec{j}_{th} d\vec{S}$$

en $\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$

// vecteur densité de courant j en $\text{C s}^{-1} \text{ m}^{-2}$

2.3 Loi de Fourier

On introduit alors la loi phénoménologique de Fourier :

$$\vec{j}_{th} = -\lambda \text{grad}T$$

Avec λ la conductivité thermique en $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$

// loi d'ohm locale.

λ dépend du matériau et on peut alors conclure de la première expérience que $\lambda_{Cu}(386) > \lambda_{Al}(237) > \lambda_{Laiton}(125) > \lambda_{Cu63\%} > \lambda_{Acier}(50, 2)$

On retiens que des bons conducteur on un λ d'ordre de grandeur d'ordre 100 et les isolants sont de 10-1 à 10-2 (bois 0,2, laine de verre 0,04, gaz 0,026)

Comment caractériser la variation de température dans notre milieu ? On prend ici notre barre de cuivre comme exemple :

3 Bilans thermiques, résistance thermique

3.1 Bilan en régime variable

On prend une tranche d'épaisseur dx . On suppose qu'on est en absence de travail.

La variation d'énergie interne entre t et $t + dt$ est :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \Phi_e - \Phi_s + \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_{sources} - \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_{puits}$$

Les termes de sources correspondent à des gains thermiques internes au système pouvant être des réactions exothermiques, l'effet Joule. Les termes de puits sont des perte thermiques comme des réactions endothermiques.

On suppose qu'il n'y a ni sources ni puits dans notre système.

On a alors :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \Phi_e - \Phi_s = \Phi(x) - \Phi(x + dx) = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} dx$$

Or, d'après la loi de fourier ,

$$\Phi_{th} = \iint_S \vec{j}_{th} d\vec{S} = j_{th} S = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} S$$

Donc

$$\frac{\partial U}{\partial t} = +\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} S dx$$

Or, à volume constante,

$$\frac{\partial U}{\partial t} = mc \frac{\partial T}{\partial t} = \mu c V \frac{\partial T}{\partial t}$$

avec c la capacité thermique massique à volume constant.

On a alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\mu c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Vérifions l'homogénéité : λ est en $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$, μ en kg m^{-3} et c en $\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ on a donc bien un coefficient en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

On retrouve alors une équation de diffusion.

On appelle ce terme **diffusivité thermique** D_{th} par analogie avec la diffusivité de particule D .

3.2 Bilan en régime stationnaire - Résistance thermique

On revient alors sur notre expérience, on suppose ici qu'on est en régime stationnaire donc $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ donc T est de la forme $T(x) = Ax + B$. On a $T(x=0) = T_1$ et $T(x=L) = T_2$ donc $T(x) = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{L} x$

Vérifions si on a bien une relation linéaire : OK.

Maintenant on cherche à mesurer λ . On introduit la résistance thermique R_{th} par analogie avec la résistance électrique.

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi_{th}}$$

Or,

$$\Phi_{th} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} S = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L} S$$

Donc

$$R_{th} = \frac{L}{\lambda S}$$

On voit alors que pour connaître λ_{Cu} , il suffit de mesurer le flux thermique transmis au bac froid. Pour cela, on a pesé $m = 91$ g de glace sèche et on a mesuré son temps de fonte Δt .

On a alors $\Phi_{th} = \frac{ml_{fus}}{\Delta t}$ avec l_{fus} l'enthalpie latente de fusion de la glace.

On a alors

$$\lambda = \frac{L}{SR_{th}} = \frac{L\Phi_{th}}{S(T_1 - T_2)} = \frac{Lml_{fus}}{S(T_1 - T_2)\Delta t}$$

$$\lambda_{Cu,tho} = 386 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$S = \pi r^2 = \pi(18e - 3)^2 = 1,02 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$L = 0,35 \text{ m}$$

$$T_1 - T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$l_{fus} = 333,55 \text{ J g}^{-1}$$

En préparation, pour $m = 86,1$ g, on a $\Delta t = 22 \text{ min}$ donc $\lambda_{Cu} = 74,6 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Conclusion

On a donc vu que l'énergie thermique se transmet par trois moyens. On peut rapprocher la conduction thermique de la conduction électrique afin de modéliser plus aisément les transferts conductifs. Dans un prochain cours, nous exploiterons l'analogie électrique pour étudier des résistances en série et en dérivation.

Question

-

Retours

-