Notions des phénomènes de transfert
Licence -L2-GP

Chapitre III : Transfert de chaleur

III.1 : Transfert de chaleur par conduction en régime stationnaire

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de la chaleur à travers un matériau ou au sein d'un liquide au repos, sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents : un transfert par vibration des molécules ou atomes et un transfert par les électrons libres. Dans ce cas, le transfert de chaleur par conduction résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente.

Le principe fondamental gouvernant le transfert de chaleur par conduction a été formulé par *J.B.Fourier en 1822.* Cette loi précise que le flux conductif de chaleur est proportionnel au gradient de température. Pour un matériau *isotrope*, le flux de chaleur dans la direction horizontale q_{cond} s'écrit :

$$q_{cond} = -\lambda \frac{dT}{dx} \qquad \text{III.1}$$

Où *k* est la conductivité thermique du matériau. Les matériaux ayant des conductivités thermiques élevées sont les métaux, l'or, le cuivre, l'argent et l'aluminium : ce sont des conducteurs de la chaleur. Les matériaux isolants utilisés dans la construction d'un bâtiment sont le bois, l'amiante, et le verre.

La loi de Fourier est analogue à la loi de Newton que nous avons utilisé (voir chapitre II) pour relier la contrainte tangentielle d'un fluide isotrope au gradient de vitesse. Pour un écoulement unidirectionnel entre deux plans parallèles horizontaux dont un est animé d'une vitesse constante *v* et l'autre est fixe (écoulement de Couette), la loi de Newton permet de définir la viscosité, elle s'écrit :

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \text{III.2}$$

En tenant compte des trois directions dans l'espace, la loi de Fourier pour un matériau *isotrope* s'écrit aisément sous forme vectorielle :

$$q_{cond} = -\mathrm{k}\, \nabla T \qquad \text{III.3}$$

Certains matériaux comme les milieux poreux sont anisotropes et la conductivité thermique dépend de la direction. Dans se cas, la loi de Fourier s'écrit :

$$q_{cond} = -\mathrm{k} \cdot \nabla T \qquad \text{III.4}$$

Où *k* est le *tenseur* des conductivités thermiques. En coordonnées cartésiennes, le flux de chaleur dans les trois directions pour un matériau *anisotrope* s'écrit :

$$q_{cond,x} = -\left(\mathrm{k}_{11}\frac{\partial T}{\partial x} + \mathrm{k}_{12}\frac{\partial T}{\partial y} + \mathrm{k}_{13}\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$q_{cond,y} = -\left(\mathrm{k}_{21}\frac{\partial T}{\partial x} + \mathrm{k}_{22}\frac{\partial T}{\partial y} + \mathrm{k}_{23}\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$q_{cond,z} = -\left(\mathrm{k}_{31}\frac{\partial T}{\partial x} + \mathrm{k}_{32}\frac{\partial T}{\partial y} + \mathrm{k}_{33}\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

Prenons le cas d'un mur homogène et isotrope dont les faces intérieure et extérieure sont aux températures T_{p1} et T_{p2} respectivement, le mur ayant une épaisseur e (figure III.1). En régime stationnaire, q_{cond} est constant donc, en intégrant la loi de Fourier on obtient :

$$q_{cond}\int_0^e dx = -\int_{T_{p1}}^{T_{p2}} k\, dT \qquad \text{III.5}$$

Si *k* ne dépend pas de la température dans la limite des températures considérées, il en résulte :

$$q_{cond} = -\frac{\mathrm{k}}{e}\left(T_{p2} - T_{p1}\right) \qquad \text{III.6}$$

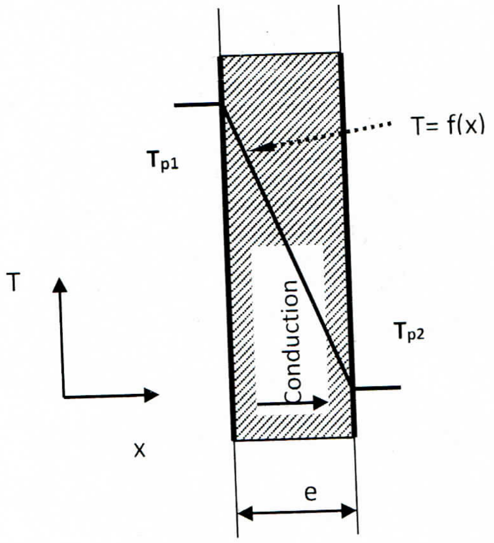

Figure III.1 : Température le long d'un mur homogène et isotrope
(Transfert conductif)

Et en considérant toute la surface du mur S on a :

$$Q_{cond} = q_{cond}\ S = \frac{k\,S}{e}\ \Delta T \qquad \text{III.7}$$

Où Q_{cond} est la quantité de chaleur échangée par conduction entre les deux surfaces. Le profil de température à l'intérieur du mur est linéaire en régime stationnaire puisque la conductivité thermique k est, ici, supposée constante.

III.2 : Transfert de chaleur par convection en régime stationnaire

La convection est un mode de transfert de chaleur lié au mouvement du fluide. C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. La convection thermique est le transfert d'énergie entre deux milieux, dont l'un au moins est un fluide, par un déplacement moléculaire. Il implique les effets combinés de la conduction et du mouvement du fluide. En l'absence de mouvement du fluide, le transfert de chaleur est assuré exclusivement par la conduction pure. On distingue deux types de convection : la **convection naturelle** (ou **convection libre**) où le mouvement libre des particules de fluide est dû à une différence de températures qui implique une différence de masses volumiques, exemple : le chauffage de l'air dans une salle, le chauffage de l'eau dans un récipient. La **convection forcée** où le mouvement des particules est provoqué par une pompe dans le cas des liquides ou par un ventilateur dans le cas de l'air. Dans le processus de convection, la chaleur se déplace comme toujours des zones chaudes vers les zones froides.

Convection forcée :

En convection forcée, le flux de chaleur convectif entre une surface solide est exprimé par la loi dite de Newton de refroidissement (*Newton's law of cooling*), il s'écrit :

$$q_{conv} = h\left(T_p - T_\infty\right) \qquad \text{III.8}$$

Où h est un coefficient de transfert convectif [W/m^2 K], T_∞ la température du milieu fluide loin de la paroi et T_p la température de la surface de la paroi. Cette équation n'est pas en réalité une loi, elle sert à définir le coefficient d'échange h qui dépend de la vitesse de l'écoulement, des propriétés thermo-physiques du fluide et de la géométrie du milieu considéré.

La quantité de chaleur Q_{conv} qui traverse la surface S est donnée par la relation suivante :

$$Q_{conv} = h.S.\left(T_p - T_\infty\right)$$

La figure III.2 présente deux fluides qui circulent sur les surfaces externes de la paroi d'épaisseur e, entre T_1 et T_{p1} le transfert de chaleur se fait par convection, entre T_{p1} et T_{p2} le transfert de chaleur se fait par conduction et entre T_{p2} et T_2 le transfert de chaleur se fait par convection.

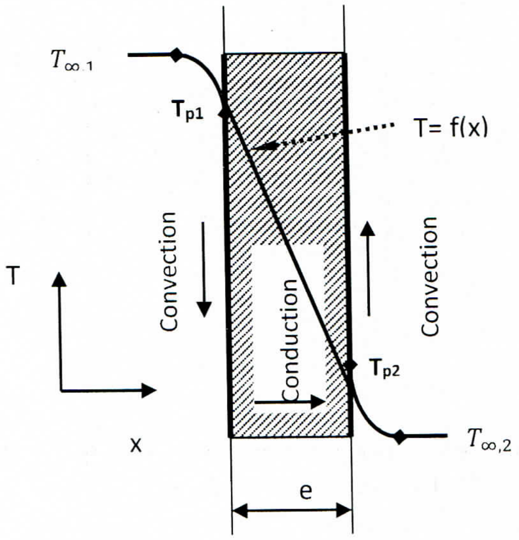

Figure III.2 : Température le long d'un mur homogène et isotrope
(Transfert convectif-conductif-convectif)

Etant donné que le régime est stationnaire, c'est la même quantité de chaleur qui est transmise par convection-conduction-convection et nous écrivons :

$$Q_x = h_1 S\left(T_{\infty,1} - T_{p1}\right) = -\frac{k}{e} S\left(T_{p2} - T_{p1}\right) = h_2 S\left(T_{p2} - T_{\infty,2}\right) \quad \text{III.9}$$

$$T_{\infty,1} - T_{p1} = \frac{Q_x}{h_1 S}$$

$$T_{p1} - T_{p2} = \frac{Q_x}{\frac{kS}{e}}$$

$$T_{p2} - T_{\infty,2} = \frac{Q_x}{h_2 S}$$

$$T_1 - T_2 = Q_x\left[\frac{1}{h_1 S} + \frac{e}{kS} + \frac{1}{h_2 S}\right] = \frac{Q_x}{S}\left[\frac{1}{h_1} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_2}\right]$$

Soit U, le coefficient global ou résistance globale de transfert, $\frac{1}{U} = \left[\frac{1}{h_1} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_2}\right]$, la quantité de chaleur s'écrit :

$$Q_x = US\left(T_{\infty,1} - T_{\infty,2}\right) \quad \text{III.10}$$

Convection naturelle :
Quand le mouvement d'un fluide est induit par un gradient de masse volumique, les transferts thermiques qui en résultent sont dus à la convection naturelle. Ci-dessous quelques applications de la convection naturelle :

- Les transferts thermiques entre le radiateur dans une pièce et l'air ambiant se font surtout grâce à la convection naturelle.
- Le refroidissement de l'eau dans les tours de centrales nucléaire,
- Le refroidissement du filament dans une ampoule électrique,
- Le refroidissement du corps humain

En convection naturelle, les vitesses du fluide, provoquées par des gradients de masse volumique, sont plus faibles que celles couramment rencontrées en convection forcée. Il est donc clair que les coefficients d'échange en convection naturelle seront plus petits.
Considérons une plaque verticale de longueur l maintenue à la température T_P, elle est entourée par de l'air immobile à une température T_∞ ($T_P>T_\infty$). Si l'écart de température est suffisamment grand, le fluide sera mis en mouvement et le profil de vitesse verticale v_Z, fonction de la distance de la plaque est montré sur la figure III.3.

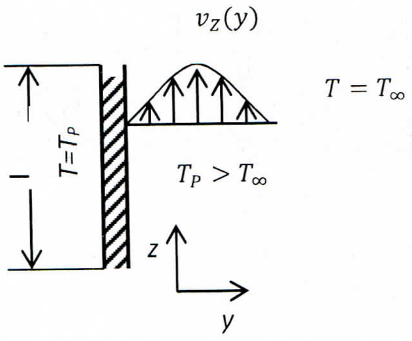

Figure III.3 : Exemple de convection naturelle

Puisque le mouvement est créé par des gradients de masse volumique, qui sont dûs à un gradient thermique, les variations de la masse volumique ρ du fluide sont données par la relation suivante où T_0 représente la température de référence (du fluide non perturbé $T_0 = T_\infty$) :

$$\rho = \rho_0 \left[1 - \beta(T - T_0)\right] \qquad \text{III.11}$$

Où, β est le coefficient de dilatation thermique :

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P$$

Le flux moyen s'exprime à l'aide d'un coefficient d'échange moyen h_m par la relation suivante :

$$\bar{q}_{conv} = h_m \left(T_p - T_\infty\right) \qquad \text{III.12}$$

III.3 : Transfert de chaleur par rayonnement

C'est un mode d'échange de chaleur (d'énergie) sous forme d'ondes électromagnétiques selon la loi de Planck (E=hv, tels que : v est la fréquence d'onde associée et $h=6,62.10^{-34}$J.s est la constante de Planck). Donc, il ne nécessite aucun support matériel, il est analogue à la propagation de la lumière. Il se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière ($C=3.10^8$ m/s). Le domaine du rayonnement thermique usuel couvre une grande partie du domaine infrarouge (λ=0.8 à 70 µm) et le domaine visible (λ=0.4 à 0.8µm). Pratiquement, les trois modes de transfert de chaleur coexistent. Mais, ce mode de transfert devient prépondérant à des températures supérieures aux températures ordinaires. Généralement, tous les corps (solides, liquides et gazeux) émettent un rayonnement de nature électromagnétique. On peut citer que, le vide et les gaz simples comme (O_2, H_2 et N_2) représentent des milieux parfaitement transparents mais, les gaz composés comme (CO_2 et CO) et certains liquides et solides comme (les verres et les polymères) sont partiellement transparents. La majorité des solides et des liquides sont des corps opaques puisqu'ils stoppent la propagation du rayonnement juste au niveau de leur surface.

Rayonnement d'un corps noir

Un **Corps noir**, par définition, absorbe tout rayonnement, quelle que soit sa longueur d'onde et sa direction. Un corps noir ne réfléchit aucun rayonnement, il est caractérisé par un pouvoir absorbant (ε=1). La puissance énergétique émise par un corps noir, par unité de surface et à la longueur d'onde λ sera notée $E_{b\lambda}d\lambda$ [W/m²] où $E_{b\lambda}$ est appelée émittance monochromatique ou spectrale du corps noir [W/m³].
La puissance énergétique totale rayonnée par unité de surface, E_b, est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \qquad \text{III.13}$$

Où σ, la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67\ 10^{-8}$ [W/m²K⁴])

Rayonnement des corps réels
Le flux radiatif émis par une surface réelle est inférieur à celui d'un corps noir de même température. Il est donné par la relation suivante :

$$E_b(T) = \varepsilon \, \sigma \, T^4$$

Où ε, l'émissivité du corps réel, est un nombre compris entre 0 et 1. [ε = 1 pour un corps noir et ε= 0.6 pour un corps gris].

Applications

Exercice N°1 :
Calculer le coefficient global d'échange, le flux de chaleur, les températures T_{p1} et T_{p2}.
On donne $T_{\infty,1}$ = 40°C et h_1 = 65 W. m^{-2} K^{-1} , $T_{\infty,2}$ = 10°C et h_2 = 30 W. m^{-2} K^{-1} , l'épaisseur e= 4 mm et la conductivité thermique k= 1.4 W.m^{-1}.k^{-1}.
Rép : U= 19.38 W. m^{-2} K^{-1}, q_x = 581.4 W. m^{-2} , T_{p1}= 31.05°C et T_{p2}= 29.38°C

Exercice N°2 :
Calculer le flux de chaleur si on donne $T_{\infty,1}$ = -10°C et h_1 = 65 W. m^{-2} K^{-1} , $T_{\infty,2}$ = 40°C et h_2 = 30 W. m^{-2} K^{-1} , l'épaisseur e= 4 mm et la conductivité thermique k= 1.4 W.m^{-1}.k^{-1}.
Rép : q_x = 969 W. m^{-2}

Exercice N°3 : Calculer la quantité de chaleur nécessaire pour refroidir un cylindre de diamètre externe D= 25mm et de longueur 0.5 m. On donne la température de l'air $T_{\infty,1}$ = 40°C, la température de surface T_{p1} = 300°C et h_1= 22 W. m^{-2} K^{-1}
Rép : Q_x = 224.51 W

Exercice N°4 : Pour chauffer un four, on se sert d'une résistance électrique de 2,5cm de diamètre et de 60cm de longueur. On suppose que ce fil électrique rayonne comme un corps noir et émet une puissance de 1,5 kW. Calculer la température du fil.
Rép : T=865.6 °K

Exercice N°5 : Dans un tube en acier, de résistance électrique R= 0.1Ω, de 85cm de longueur, de 1,5cm de diamètre extérieur et de 0,15mm d'épaisseur circule un courant électrique de 150 Ampères. Ce tube est entouré d'un cylindre de verre ayant le même axe, de 5cm de diamètre et de faible épaisseur à l'intérieur duquel on fait le vide. La température de la surface de tube d'acier est de 1389°K. Si toute la puissance dissipée par effet Joule étant rayonnée, quel est l'émissivité de la surface de tube d'acier. On suppose que toute la puissance émise par le tube en acier est absorbée par le verre dont l'émissivité ε_v= 0.85, Calculer la température du verre si le ¼ de cette puissance est dissipée dans l'air ambiant.
Rép : ε_a =0.266 ; T= 543.8°K