Chapitre V : Transfert de chaleur par Convection

1. Définitions

Le transfert de chaleur par convection existe au sein des milieux fluides (mouvement de matière) dans lesquels il est généralement prépondérant. Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

1.1 La convection libre ou naturelle :

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique, résultant des différences de températures, sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

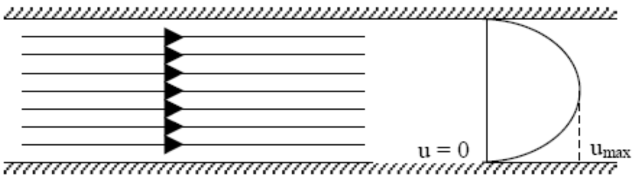
1.2 La convection forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).
L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

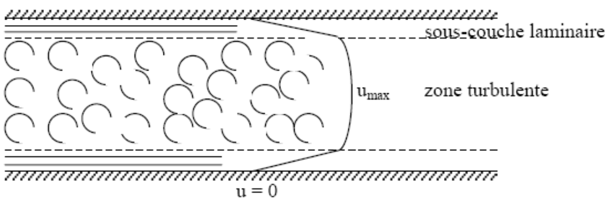
1.3 Régime d'écoulement

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement. Considérons à titre d'exemple l'écoulement d'un fluide dans une conduite :

- **En régime laminaire,** l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes.
Les échanges de chaleur s'effectuent donc :
- Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.
- Par convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.



En régime turbulent, l'écoulement n'est pas unidirectionnel :
L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction est généralement négligeable par rapport à la convection, la turbulence augmente le flux de chaleur échangé entre le fluide et la paroi.



Le changement de régime est généralement dû à l'augmentation d'un certain paramètre (vitesse, température) au dessus d'une valeur critique on quantifie cette valeur critique par des nombre adimensionnels par exemple, le nombre de Reynolds (en convection forcée)

$$\mathbf{Re=VD/\nu}$$

V: vitesse de l'écoulement; D: diamètre de la conduite; ν: viscosité dynamique.
Par exemple pour le cas de l'écoulement dans les conduites; Re_c=2300.
Re<2300 l'écoulement est laminaire.
Re>2300 l'écoulement est turbulent.

2. Expression du flux de chaleur

2.1 Couche limite dynamique et thermique

La couche limite est une région du fluide qui est proche des parois solides dont l'influence de la viscosité est très importante, la vitesse et la température dans cette région sont différentes de celle du fluide loin des parois. L'épaisseur de cette couche varie en fonction de plusieurs paramètres: viscosité, distance,...

Le gradient thermique est particulièrement important au voisinage de la paroi, c'est à dire dans la sous-couche laminaire. Quelque soit le régime d'écoulement du fluide, on considère que la résistance thermique est entièrement située dans le film laminaire qui joue le rôle d'isolant thermique (couche limite thermique).

2.2 Loi de Newton

C'est une loi simple mais présente une énorme difficulté dans son application. Elle amène à définir un cœfficient de transfert de chaleur par convection h (W/m².K).

Quelque soit le type de convection et le régime d'écoulement le flux de chaleur entre le fluide et la paroi s'écrit comme suit:

$$\dot{Q} = hS\,(T_s - T_f)$$

Pour déterminer h il faut résoudre les équations de l'écoulement de Navier – Stokes en plus de l'équation de la chaleur:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2})$$

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2})$$

$$\rho(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2})$$

$$\rho(\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}) = \mu(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + \Phi$$

h dépend d'un nombre important de paramètres: propriétés physiques du fluides, caractéristiques de l'écoulement, la température, la géométrie,....

$$h = f\,(T_f, T_s, v, \lambda, \rho, C_P, \dot{Q}, l, D)$$

Il s'avère très utile d'utiliser la technique de l'analyse adimensionnelle (similitude) pour laquelle on groupe les grandeurs physiques sous forme de nombres adimensionnels, et on déterminer expérimentalement et théoriquement la relation entre ces nombres qu'on représente par des corrélations.

2.3 Quelques nombres adimensionnels utilisé en convection forcée

- Le nombre de Reynolds: $Re=\rho VD/\nu$
- Le nombre de Prandtl : $Pr=C_P\mu/\lambda=\nu/a$
- Le nombre de Nusselt : $Nu=hL/\lambda$

3. Calcul du flux de chaleur en convection forcée

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

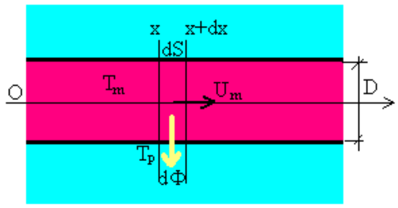
$$Nu = f\,(Re, Pr)$$

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection forcée s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl.
2. Suivant la valeur de Re et la configuration → choix de la corrélation.
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation.
4. Calcul de h =λNu/L et de $\dot{Q} = hS\,(T_s - T_f)$

3.1 Etude d'un exemple de convection forcée : Écoulement dans un tube

Un fluide s'écoule en régime permanent dans une conduite cylindrique circulaire de diamètre intérieur D. Dans une section droite, à l'abscisse x par rapport à l'entrée de la conduite, la vitesse moyenne du fluide est U_m, sa température moyenne T_m, et la température de la paroi T_p.
La corrélation expérimentale indiquée permet de calculer le flux de chaleur $d\dot{Q}_C$ échangé à travers l'aire latérale de paroi dS comprise entre les abscisses x et x + dx:



$$d\dot{Q}_C = h\,(T_s - T_m)\,P\cdot dx$$

La conservation d'énergie permet d'écrire

$$d\dot{Q}_C = \dot{m}c_p dT_m$$

Cette relation est valide ***peu importe*** la condition à la frontière; Donc partir de la conservation d'énergie on peut dériver une expression pour la variation de T_m avec x

$$\frac{dT_m}{dx} = -\frac{hP}{\dot{m}c_P}(T_m - T_s)$$

En régime laminaire ($R_e < 2000$), établit et loin de la zone d'entrée on peut appliquer les corrélations expérimentales de Lévêque, exprimées en fonction du paramètre:

$$A = \frac{1}{R_e P_r}\frac{x}{D}$$

Ces corrélations ont pour expressions:

$$N_u = 3{,}66 \qquad \text{pour } A > 0{,}05$$

On traite deux cas spécifiques:

3.2 Cas d'un flux de chaleur constant

Le flux convectif total $d\dot{Q}_C$ devient simplement *q.P.dx*

Et la température moyenne

$$T_m = T_{mi} + \frac{qP}{\dot{m}c_P}x$$

La température moyenne varie linéairement avec la distance.

3.3 Cas d'une paroi à température constante

Pour T_s constante comment T_m varie avec *x (h=constant)* ?

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{d(\Delta T_m)}{dx} = -\frac{hP}{\dot{m}c_P}(\Delta T_m)$$

En séparant les variables et intégrant de l'entrée à la sortie du tube:

$$\frac{dT_m}{dx} = \int_{\Delta T_e}^{\Delta T_s} \frac{d(\Delta T_m)}{\Delta T_m} = -\frac{hP}{\dot{m}c_P}\int_0^L dx$$; Où encore

$$\ln\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} = -\frac{hP}{\dot{m}c_P}L$$ On obtient

$$\frac{T_{ms} - T_s}{T_{me} - T_s} = \exp(-\frac{hP}{\dot{m}c_P}L)$$ Pour une distance quelconque x on a:

$$\frac{T_m(x) - T_s}{T_{me} - T_s} = \exp(-\frac{hP}{\dot{m}c_P}x)$$

Exemple d'application:

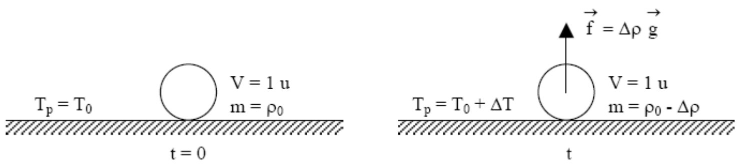
Un tuyau de diamètre D = 20 mm transporte un débit Q = 0,5 l/s d'eau à 50°C.
Déterminer le flux thermique transmis par convection du fluide vers la paroi, par mètre linéaire de conduite, dans le cadre des hypothèses suivantes:

- L'alimentation en eau chaude est telle que la température de celle-ci demeure constante;
- La paroi du tube est suffisamment mince pour qu'on puisse y négliger la conduction;
- la température extérieure du milieu environnant le tube est de 15°C;
- l'écoulement est parfaitement établi (cas du régime permanent dans un tube très long).

4. La Convection naturelle

4.1 Mécanisme de la convection naturelle

Considérons un fluide au repos en contact avec une paroi plane à température T_o. Si l'on porte la paroi à une température $T = T_o + \Delta T$, le fluide au contact de la paroi va s'échauffer par conduction et la masse du volume unité va passer de ρ_o à $\rho_o - \Delta\rho$:



Donc le fluide près de la paroi sera soumis à une force ascensionnelle , et cédera sa place à une autre couche de fluide plus froid et donc il apparaît un mouvement de circulation dans le fluide, appelé convection naturelle.

4.2 Calcul du flux de chaleur lors de la convection naturelle

Dans le cas d'un transfert de chaleur par convection naturelle, le coefficient de convection dépend des caractéristiques du fluide : λ, ρ, μ, c_p, β, g, de la paroi caractérisée par la longueur L, et de l'écart de température ΔT aux bornes ce qu'on peut traduire par une relation du type :

$$h = f(\lambda, \rho, \mu, c_p, \beta, g, L, \Delta T)$$

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$\mathbf{Nu = f(Gr, Pr)}$$

$\mathbf{Gr = \rho^2 g.\beta.\Delta T.D^3/\mu^2}$: le nombre de Grashof.

Le calcul du flux de chaleur par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl.
2. Suivant la valeur de Gr et configuration $\rightarrow$ choix de la corrélation.
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation.
4. Calcul de h =λNu/L et de $\dot{Q} = hS(T_s - T_f)$