

Chapitre III. Convection thermique

III.1. Introduction générale

La convection est un mode de transfert de chaleur par l'action combiné de conduction, de l'accumulation d'énergie et des mouvements de fluide (liquide ou gaz).

Le transfert de chaleur par convection entre une surface dans la température est supérieure à celle du fluide ($T_s > T_f$) passe pas des étapes :

- La chaleur s'écoule par la conduction de la surface solide vers les molécules de fluide adjacent.
- Les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules dans une région froide (basse température) et transfert une partie de leur énergie.

III.2. Types de convection

Il y'a deux types de convection : naturelle (libre) et forcée.

- a. **Naturelle** : lorsque le mouvement de la matière est engendré par les variations de la densité du fluide. La moindre différence de température entre deux points d'un fluide immobile, va provoquer une différence de masse volumique entre ces deux points, ce qui conduit à l'apparition de la poussée d'Archimède qui mettra le fluide en mouvement dans lequel les particules les plus chaudes du fluide ont tendance à se remonter et les particules froides ont tendance à se descendre.
- b. **forcée** : on peut réaliser une convection forcée si on applique une force extérieure (agitateur, ventilateur, pompe) c'est à dire le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température.

Expression du flux thermique : La quantité de chaleur transférée par convection est donnée par la loi de newton :

$$Q = h \cdot s \cdot \Delta T = h \cdot S \cdot (T_p - T_f)$$

Avec : $T_p > T_f$

T_p : Température de la paroi chauffante ($^{\circ}C$)

T_f : Température du fluide au loin de la paroi ($^{\circ}C$)

S : Surface d'échange de convection (m^2).

h : coefficient thermique de convection ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Q : flux de chaleur échangé par convection (W).

Remarque

Le coefficient thermique de convection est en fonction de l'écoulement du fluide, les propriétés thermiques du fluide et la géométrie du système (cylindrique, sphérique) (caractéristique géométrique de parois).

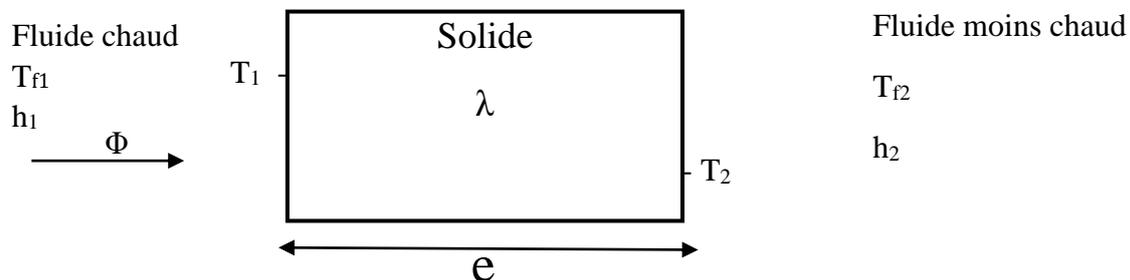
Comme le transfert de chaleur par convection est très lié au mouvement du fluide, il est nécessaire de connaître le régime d'écoulement du fluide si ce mouvement est laminaire ou turbulent.

- Laminaire : régime d'écoulement d'un fluide dont les différentes couches glissent les unes sur les autres sans se mélanger, est un écoulement ordonné → Transfert de chaleur par conduction.
- Turbulent : à partir d'une vitesse critique qui dépend de la nature du fluide, les écoulements changent totalement (mouvements de caractères aléatoires). Le mécanisme de la conduction est modifié et est favorisé par la convection.

III.3. Application de la loi de Newton

A. Echange thermique entre deux milieux fluides séparés par une surface plane

Le transfert de chaleur d'un fluide à un autre fluide au travers d'une paroi solide est le phénomène le plus fréquemment rencontré dans l'industrie. La transmission de chaleur se fait à la fois par convection à l'intérieur des fluides et par conduction au travers de la paroi solide séparant les deux fluides.



$$T_{f_1} > T_1 > T_2 > T_{f_2}$$

Q : Constant

$$Q = h_1 \cdot S \cdot (T_{f_1} - T_1) \dots \dots \dots \text{Convection (1)}$$

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e}{\lambda \cdot S}} \dots \dots \dots \text{Conduction (2)}$$

$$Q = h_2 \cdot S \cdot (T_2 - T_{f_2}) \dots \dots \dots \text{Convection (3)}$$

$$(1) \Leftrightarrow (T_{f_1} - T_1) = \frac{Q}{h_1 \cdot S}$$

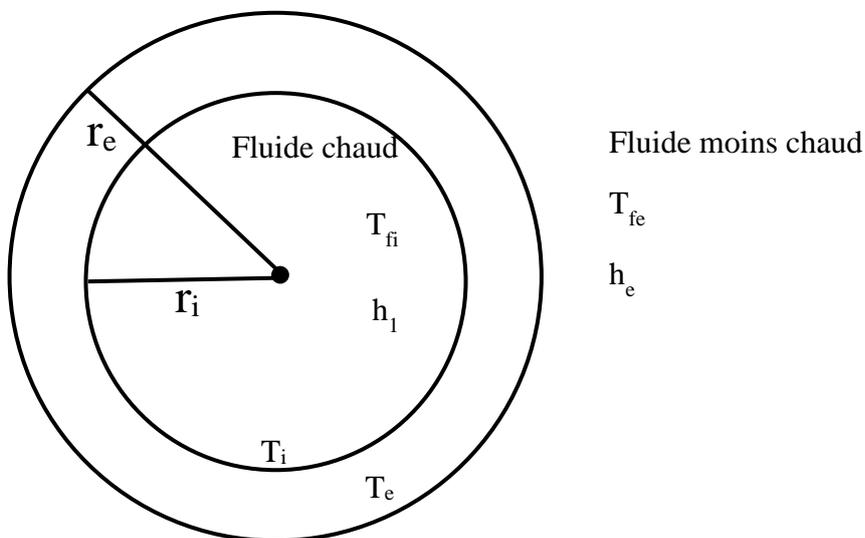
$$(2) \Leftrightarrow T_1 - T_2 = Q \cdot \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

$$(3) \Leftrightarrow T_2 - T_{f_2} = \frac{Q}{h_2 \cdot S}$$

On fait la somme des températures

$$T_{f_1} - T_{f_2} = Q \left[\frac{1}{h_1 \cdot S} + \frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_2 \cdot S} \right] \Rightarrow Q = \frac{T_{f_1} - T_{f_2}}{\frac{1}{h_1 \cdot S} + \frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_2 \cdot S}} = \frac{Q}{R_{thg}}$$

B. Echanger thermique entre deux milieux fluides séparés par une surface cylindrique



$Q = \text{constant}$

$$Q = h_i \cdot S_i (T_{f_i} - T_i) = h_i \cdot 4\pi \cdot r_i^2 (T_{f_i} - T_i) \dots \dots \dots \text{Convection (1)}$$

$$Q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e}} \dots \dots \dots \text{Conduction (2)}$$

$$\frac{1}{4\pi \cdot \lambda}$$

$$Q = h_e \cdot S_e (T_e - T_{f_e}) = h_e \cdot 4\pi \cdot r_e^2 \cdot (T_i - T_{f_e}) \dots \dots \dots \text{Convection (3)}$$

$$(1) \Leftrightarrow (T_{f_i} - T_i) = \frac{Q}{h_i \cdot 4\pi \cdot r_i^2}$$

$$(2) \Leftrightarrow T_i - T_e = Q \cdot \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e}}{4\pi \cdot \lambda}$$

$$(3) \Leftrightarrow T_e - T_{f_e} = \frac{Q}{h_e \cdot 4\pi \cdot r_e^2}$$

On fait la somme des températures

$$T_{f_i} - T_{f_e} = Q \left[\frac{1}{h_i \cdot 4\pi \cdot r_i^2} + \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} + \frac{1}{h_e \cdot 4\pi \cdot r_e^2} \right]$$

$$\text{Donc : } Q = \frac{T_{f_i} - T_{f_e}}{\frac{1}{h_i \cdot 4\pi \cdot r_i^2} + \frac{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e}}{4\pi \cdot \lambda} + \frac{1}{h_e \cdot 4\pi \cdot r_e^2}}$$

III.4. Détermination du coefficient thermique de convection (h_c)

Le problème de la convection est en fait de déterminer ce coefficient en fonction des conditions d'écoulement du fluide, des caractéristiques géométriques des parois et des changements d'état du fluide, ce qui implique la résolution des équations différentielles qui sont généralement difficile à résoudre théoriquement, ce qui conduit à la nécessité de définir des corrélations en utilisant des paramètres adimensionnelles (nombres sans dimensions).

a. Nombre de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho : \text{masse Volumique du fluide } \left(\frac{kg}{m^3}\right) \\ v : \text{vitesse d'écoulement du fluide (m/s)} \\ D : \text{Dimension caractéristique (m)} \\ \mu : \text{viscosité dynamique du fluide (pa. S : poiseuille)} \end{array} \right.$$

Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement (si l'écoulement est laminaire ou turbulent)

b. Nombre de Prandtl (Pr)

$$p_r = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad \text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu : \text{viscosité dynamique du fluide (Kg/m. s)} \\ c_p : \text{Chaleur massique du fluide (} \frac{J}{Kg.^\circ C} \text{)} \\ \lambda : \text{Conductivité thermique du fluide (} \frac{W}{m.^\circ C} \text{)} \end{array} \right.$$

Le nombre de Prandtl détermine l'état du fluide (caractérise les propriétés thermiques du fluide).

Exp :

$$p_r = 6,99 : \text{eau}$$

$$p_r = 0,72 : \text{air (gaz)}$$

$$\text{Huiles } p_r \gg 1$$

c. Nombre de Nusselt (Nu)

$$N_u = \frac{h_c \cdot D}{\lambda} \quad \text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} h_c : \text{coefficient thermique de convection (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \text{)} \\ D : \text{Dimension caractéristique (m)} \\ \lambda : \text{Conductivité thermique du fluide (w/m. }^\circ\text{C} \text{)} \end{array} \right.$$

Le nombre de Nusselt caractérise l'importance de la convection par rapport à la conduction.

Remarque

Nu est fonction directe de h_c , sa connaissance permet de déterminer la valeur de h_c

d. Nombre de pecket (Pe) et nombre de Rayleigh (Ra)

Le nombre de pecket (Pe) est utilisé pour la convection forcée alors que pour la convection naturelle, le nombre de Rayleigh est utilisé (Ra).

$$p_e = R_e \cdot p_r$$

$$R_a = G_r \cdot p_r$$

Avec G_r : nombre de Grashof.

$$G_r = \rho^2 \cdot g \cdot B (T_p - T_f) \frac{D^3}{\mu^2}$$

Avec

- ρ : masse volumique du fluide
- g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)
- B : coefficient de dilatation thermique
- T_p : Température de la paroi
- T_f : Température de fluide
- D : Dimension caractéristique de la géométrie.
- μ : viscosité dynamique

Avant de procéder au calcul de h, il faut bien savoir :

- Si le fluide est liquide ou gaz.
- L'intervalle de température du fluide.
- S'il s'agit d'une convection naturelle ou forcée.
- Si le régime d'écoulement est laminaire ou turbulent (calculer le R_e et le comparer à R_{ec} : si $R_e < R_{ec}$ le régime est laminaire et si $R_e > R_{ec}$ le régime est turbulent), c : critique
- Si le fluide est en contact avec une surface plane, circule entre deux surfaces planes, circule dans un tube, etc.

Dans ce qui suit, nous limiterons au transfert de chaleur par convection forcée qui est le mode de transfert de chaleur essentiel pour de nombreux appareils industriels de transfert de l'énergie thermique.

Principales corrélation en convection forcée

1. Ecoulement sur plan (écoulement le long d'une plaque plane)

- **Régime laminaire** : $R_e < 3 \cdot 10^5$

$$N_u = 0,664 \cdot R_e^{1/2} \cdot P_r^{1/3}$$

- **Régime turbulent** : $R_e > 3 \cdot 10^5$

$$N_u = 0,036 \cdot R_e^{4/5} \cdot P_r^{1/3}$$

2. Écoulement à l'intérieur des conduites (écoulement à l'intérieure d'un tube cylindrique) :

➤ **Régime laminaire :** $Re < 2200$

$Nu = 3,66$ Pour une conduite cylindrique et une température constance à la paroi.

➤ **Régime turbulent :** $Re > 2200$

Pour les gaz

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} n = 0,3 \text{ lorsque le fluide se refroidit } T_p > T_f \\ n = 0,4 \text{ lorsque le fluide s'échauffe } T_p < T_f \end{array} \right.$

Pour les liquides

$$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$$

Les mêmes formules sont utilisées pour un écoulement à l'extérieur des tubes (écoulement parallèle aux tubes)