4.1 Mécanismes des transferts de chaleur par convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides (liquides ou gaz) en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement.

On peut distingue trois types de convection en fonction des causes qui produisent le mouvement du fluide : convection naturelle, convection forcée et convection mixte.

- Convection naturelle : Le mouvement du fluide est causé par les effets de flottabilité due à la variation de la densité de fluide (qui nécessite une différence de température).

Exemples : air d'une pièce chauffée par un radiateur, courants océanique ou atmosphérique…

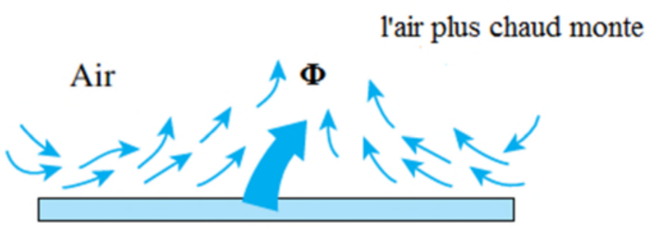

Figure 4.1. Convection naturelle

- Convection forcée : elle se manifeste lorsque le mouvement du fluide est une conséquence des actions extérieures imposées. Exemples (pompe, ventilateur…).

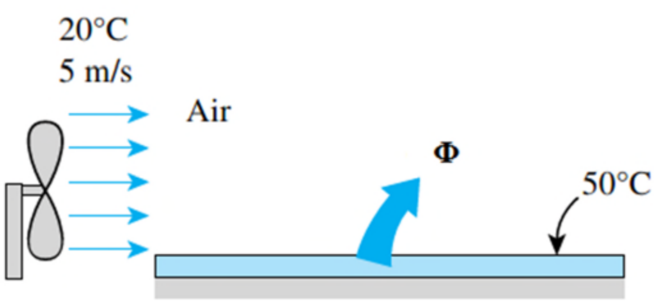

Figure 4.2. Convection forcée

- Convection mixte : Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une ne soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite la convection mixte

4.2. Types de configurations

Dans le chapitre précédent, nous avons considéré les échanges par convection seulement comme une condition aux limites pour traiter des problèmes de conduction dans les solides (le système étudié était le solide qui échangeait de la chaleur par convection à sa frontière avec le milieu extérieur). Dans ce chapitre, le système étudié sera le fluide en mouvement, l'état thermique du solide étant alors pris comme condition aux limites.

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre une paroi et le fluide en écoulement.

On distingue alors classiquement deux grands types de configurations caractérisant la géométrie du système :

- Écoulements externes : Typiquement les écoulements autour d'obstacles (aéronautique, échangeurs…).

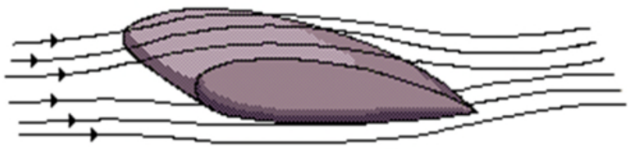

Figure 4.3. Ecoulement externe

- Écoulements internes : concernent les écoulements dans les tuyaux (échangeurs) ou dans les locaux (thermique du bâtiment).

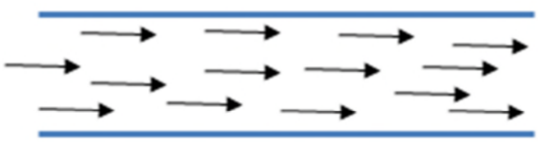

Figure 4.4. Ecoulement interne

4.3. Régimes d'écoulements

L'importance du flux de chaleur échangé par convection va dépendre du régime d'écoulement sous lequel se produisent les échanges.
Trois régimes d'écoulement ont été définis par Reynolds (1883).

- **Régime laminaire :** L'écoulement laminaire est un écoulement caractérisé par des lignes de courant bien identifiables parallèles aux parois sans mélange.

Figure 4.5. Régime laminaire

- **Régime transitoire :** C'est un écoulement intermédiaire il est plus au moins rectiligne, avec un peu de mélange (petits tourbillons).

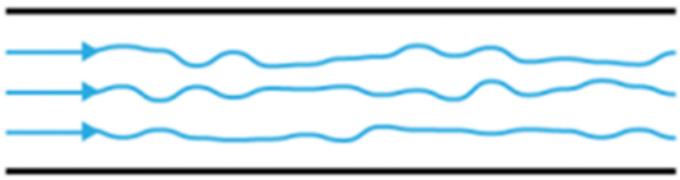

Figure 4.6. Régime transitoire

- **Régime turbulent :** Un écoulement turbulent est caractérisé par des structures tourbillonnaires qui favorisent le brassage du fluide et donc les échanges de chaleur.

Figure 4.7. Régime turbulent

Exemple dans le cas d'un écoulement dans une conduite

Re < 2000, l'ecoulement est laminaire

2000<Re<10000, l'ecoulement est transitoire

Re >10000, l'écoulement est turbulent

NB : Les valeurs limites du nombre de Reynolds de 2000 et 3000 définissant les différents régimes d'écoulement sont celles que l'on adopte généralement, mais ces valeurs ne sont pas strictes. On peut trouver dans la littérature des valeurs différentes suivant les sources et auteurs.

4.4. L'expression du flux

L'expression du flux quelque soit le type de convection (libre où forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent) le flux de chaleur Φ est donné par la relation de Newton :

$$\Phi = h.S.\Delta T$$

h : Coefficient de transfert de chaleur convectif [W/m^{2}K].

S : Surface d'échange [m^2].

ΔT : Écart de température entre fluide et paroi [°C, K].

4.5. Détermination du coefficient de transfert de chaleur convectif h

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer le coefficient de transfert de chaleur par convection h qui dépend d'un nombre important de paramètres :

- Caractéristiques du fluide (λ, Cp, ρ, μ).
- Caractéristique de l'écoulement (V).
- La géométrie de la surface d'échange (D, L).

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination du coefficient de transfert de chaleur convectif h tel-que :

- Méthode de l’analyse dimensionnelle
- méthode de la couche limite (CL)…etc.)
- Méthodes intégrales par l’analyse des équations de la couche limites.

Dans se cours on s’intéresse à la méthode d’analyse dimensionnelle.

Tableau 5.1. Ordre de grandeur du coefficient d’échange convectif

Fluide	h Convection naturelle [W.m-^{2} .K-^{1}]	h Convection forcée [W.m-^{2} .K-^{1}]
Gaz	5-30	30-500
Eau	30-300	300-2 × 10^4
Huile	5-100	30-3 × 10^3
Métal liquide	50-500	500-2 × 10^4
Eau bouillante	2 × 10^3 -2 × 10^4	3 × 10^3 -10^5
Condensation de vapeur d’eau	3 × 10^3 -3 × 10^4	3 × 10^3 -2 × × 10^5

4.5.1. Analyse dimensionnelle

L’analyse dimensionnelle est différente des autres méthodes par le fait qu’elle n’introduit pas des équations mathématiques à résoudre.

Elle permet la combinaison d’un certain nombre de variables(ou groupes adimensionnels) qui débouchera sur les relations empiriques décrivent les résultats expérimentaux d’une manière acceptable et largement utilisable.

Le théorème de Vashy-Buckingam où théorème des groupements π , soit l’équation physique

$$F\left(G_1,G_2,\ldots\ldots G_{N\text{-}K}\right)=0 \tag{4.1}$$

Cette fonction peut s’écrire :

$$F\left(\pi_1,\pi_2,\ldots\ldots\pi_{N-K}\right)=0 \tag{4.2}$$

Avec :

- $\left(\pi_1,\pi_2,\ldots\ldots\pi_{N-K}\right)$ désigne des nombres sans dimensions est indépendant.
- Le nombre de π (nombre adimensionnel) égal $N - K$.

- N nombre des grandeurs physiques.
- K nombre des unités fondamentales intervenant dans l'étude du problème.

4.5.2. Convection forcée

Application de l'analyse dimensionnelle pour déterminer le coefficient convectif h :

Le coefficient h dépend de 6 paramètres $h = f(\lambda, Cp, \rho, V, \mu, L^*)$ (4.3)

Avec

λ : Conductivité thermique [W/mK].

ρ : Masse volumique [kg/m^3].

Cp : Capacité thermique massique [J/kgK].

μ : Viscosité dynamique [kg/ms].

V : vitesse [m/s].

L^* : La longueur caractéristique [m]

Tableau4.2. Grandeurs physiques leurs (symboles, unités et dimensions)

Grandeurs	Symboles	Unités S.I	Dimensions
Longueur caractéristique L : pour une plaque D : pour (cylindre et sphère)	L^*	M	L
Température	T	°C ou K	T
Vitesse	V	m/s	Lt^{-1}
Accélération de la pesanteur	G	m/s^2	Lt^{-2}
Masse volumique	P	kg/m^3	ML^{-3}
Viscosité dynamique	M	Kg/ms	$ML^{-1}t^{-1}$
Capacité calorifique	Cp	J/kgK	$L^2T^{-1}t^{-2}$
Conductivité thermique du fluide	λ	W/mK	$MLT^{-1}t^{-3}$
Coefficient convectif	h	W/m^{2}K	$MT^{-1}t^{-3}$

Le théorème de Vashy-Buckingam :

$$h = f(\lambda,\ Cp,\ \rho, V, \mu, L^*) \quad \Rightarrow \quad f = (\lambda,\ Cp,\ \rho, V, \mu, L^*, h) \qquad (4.4)$$

La relation (4.4) sera réduite à une relation entre (N-K) = (7- 4)=3 nombres adimensionnels

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_2) = 0 \qquad (4.5)$$

Chaque nombre adimensionnel à la forme suivante :

$$\pi = \lambda^a Cp^b \rho^c V^d \mu^e L^{*f} h^g \qquad (4.6)$$

$$\pi = \left[\frac{ML}{t^3T}\right]^a \left[\frac{L^2}{t^2T}\right]^b \left[\frac{M}{L^3}\right]^c \left[\frac{L}{t}\right]^d \left[\frac{M}{Lt}\right]^e [L]^f \left[\frac{M}{t^3T}\right]^g$$

π : est un nombre adimensionnel et a, b, c…, g sont des inconnues.

Pour que le produit π soit sans dimension, il est nécessaire que la somme des exposons des différentes dimensions soit nulle.

$$L : a + 2b - 3c + d - e + f = 0$$

$$M : a + c + e + g = 0$$

$$t : -3a - 2b - d - e - 3g = 0$$

$$T : -a - b - g = 0$$

Pour déterminer π_1, π_2, π_2 on prend μ, ρ, λ et L^* comme variables répétées, cherchons π_1 :

Le coefficient h : $g = 1,\ b = 0,\ d = 0$

$$\pi_1 = \lambda^a Cp^0 \rho^c V^0 \mu^e L^{*f} h^1$$

Remplaçant les exposants g, b et d par leurs valeurs dans les équations précédentes on trouve :

$$a - 3c - e + f = 0$$

$$a + c + e + 1 = 0$$

$$-3a - e - 3 = 0$$

$$-a - 1 = 0$$

La résolution de ce système d'équations donne :

$$a = -1,\ b = 0,\ c = 0,\ d = 0,\ e = 0,\ f = 1,\ g = 1$$

D'où $\pi_1 = hL^*\lambda^{-1}$ $\qquad \pi_1 = \dfrac{hL^*}{\lambda}$ **Le nombre de Nusselt (Nu)** (4.7)

La chaleur spécifique Cp : $b=1,\ d=0,\ \ g=0$

$$\pi_2=\lambda^a Cp^1\rho^c V^0\mu^e L^{*f}h^0$$

$a+2-3c-e+f=0$

$a+c+e=0$

$-3a-2-e=0$

$-a-1=0$

La résolution du système d'équations donne :

$a=-1,\ b=1,\ c=0,\ d=0,\ e=1,\ f=0,\ g=0$

$\pi_2=\lambda^{-1}Cp\mu$ $\qquad\qquad$ $\pi_2=\dfrac{\mu Cp}{\lambda}$ $\qquad$ **Le nombre de Prandtl (Pr)** $\qquad$ (4.8)

La vitesse V $\Rightarrow d=1,\ b=0,\ g=0$

$$\pi_3=\lambda^a Cp^0\rho^c V^1\mu^e L^{*f}h^0$$

$a-3c+1-e+f=0$

$a+c+e=0$

$-3a-1-e=0$

$-a=0$

La solution finale est :

$a=0,\ b=0,\ c=1,\ d=1,\ e=-1,\ f=1,\ g=0$

$\pi_3=\rho VL^*\mu^{-1}$ $\qquad\qquad$ $\pi_3=\dfrac{\rho VL^*}{\mu}$ $\qquad$ **Le nombre de Reynolds (Re)** $\qquad$ (4.9)

4.5.3. La convection libre (naturelle)

Application de l'analyse dimensionnelle dans le cas de la convection libre. Le coefficient d'échange de chaleur convectif dépend de 6 paramètres :

$$h=f(L^*,\lambda,\rho,\mu,Cp,(g\beta\Delta T)) \qquad (4.10)$$

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2]