
Chapitre 01

*Généralités sur les modes
de transfert thermique*

1.1 INTRODUCTION

La transmission de la chaleur ou la théorie d'échange de chaleur est une science qui traite de la propagation de la chaleur dans différents milieux. On distingue trois modes de transmission de la chaleur : Conduction, Convection et Rayonnement. Les deux notions fondamentales en transferts thermiques sont la température et la chaleur. **La température** est une variable d'état qui caractérise le degré d'agitation de ses particules ; **la chaleur** est une forme dégradée d'énergie. Dans ce chapitre on s'intéresse principalement au théorie d'échange de chaleur et en particulier les modes de transfert de chaleur

1.2 DEFINITIONS

1.2.1 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température [1].

1.2.2 Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme (**Figure 1.1**). La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

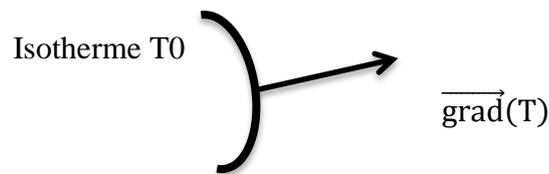


Fig. 1.1 : Surface isotherme et gradient thermique [1].

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.1)$$

1.2.3 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [1]

$$\varphi = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} \quad (1.2)$$

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface A par unité de temps

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \tag{1.3}$$

1.2.4 Equation de la chaleur

Considérons un système (**figure 1.2**) d'épaisseur dx dans la direction x et de section d'aire (A) normale à la direction Ox . Le bilan énergétique de ce système s'écrit :

$$\varphi_x + \varphi_g = \varphi_{x+dx} + \varphi_{st} \tag{1.4}$$

- φ_x flux de chaleur entrant.
- φ_{x+dx} flux de chaleur entrant
- φ_g flux de chaleur généré
- φ_{st} flux de chaleur stocké

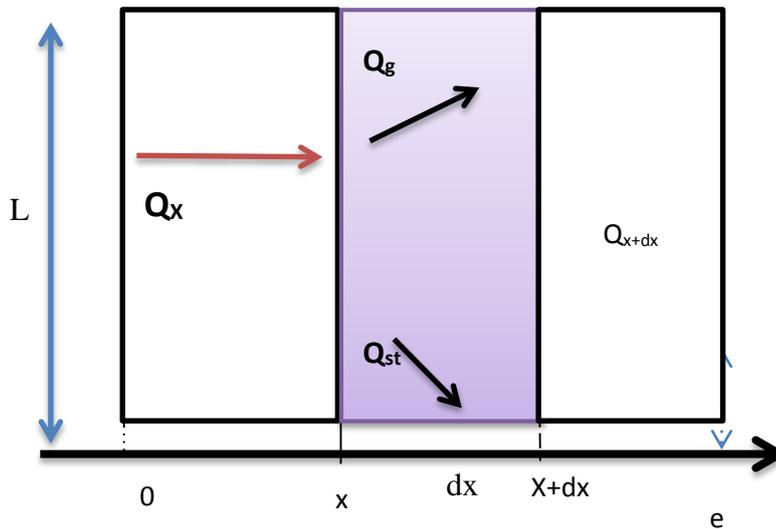


Fig. 1.2 : Bilan thermique sur un système élémentaire.

flux de chaleur entrant.

$$\varphi_x = - \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x \tag{1.5}$$

flux de chaleur entrant

$$\varphi_{x+dx} = - \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} \tag{1.6}$$

flux de chaleur généré

$$\varphi_g = \dot{q} A dx \tag{1.7}$$

flux de chaleur stocké

$$\varphi_{st} = \rho C A dx \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1.8}$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par dx , nous obtenons :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} A = \rho C A \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.9)$$

Et dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.10)$$

Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas ou le milieu est isotrope

($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$), il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système ($\dot{q} = 0$) et le milieu est homogène et λ est constant nous obtenons l'équation de Poisson :

$$\frac{\lambda}{\rho C} \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.11)$$

Le rapport $\frac{\lambda}{\rho C} = a$ est appelé la diffusivité thermique (m^2/s)

En régime permanent, nous obtenons l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 T = 0 \quad (1.12)$$

1.3 MODES DE TRANSFERT THERMIQUE

On distingue trois modes de transmission de la chaleur :

1.3.1 Conduction

1.3.1.1. définition

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule à molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission (**Figure 1.3**). Les atomes se transmettent la chaleur de proche en proche [2].

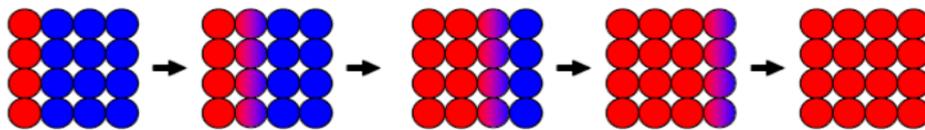


Fig 1.3 : La conduction [2].

1.3.1.2. Loi de Fourier

La loi de Fourier traduit la relation existant, en chaque point d'un corps, entre le flux thermique et le gradient de température. Cette expression, dans la mesure où la position d'un point peut être caractérisée par une seule dimension, s'écrit :

$$\frac{d\Phi}{dA} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.13)$$

Cette loi traduit le fait que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température. La direction de l'écoulement de chaleur coïncide avec celle du gradient de température. Le signe (-) caractérise le fait que l'écoulement de chaleur s'effectue dans le sens des températures décroissantes, du chaud vers le froid.

1.3.1.3. Conductivité thermique

Le coefficient de conductivité thermique est en général déterminé par voie expérimentale. La valeur de λ dépend de la nature de la substance du corps, de sa structure, et varie en fonction de la température. D'une façon générale, les métaux sont beaucoup plus conducteurs de chaleur que les substances non métalliques, les gaz sont plutôt mauvais conducteurs.

1° Conduction en régime permanent

On dit que le régime est permanent si, en tout point, la température est indépendante du temps.

a. Paroi homogène plane

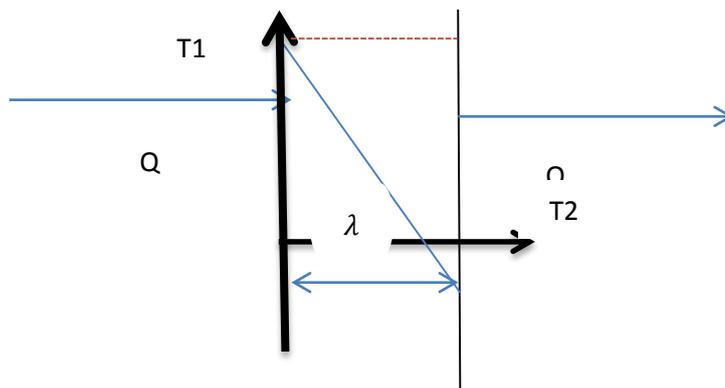


Fig. 1.4 : Paroi à une seule couche.

La loi de Fourier s'applique directement et l'on a :

$$\Phi = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{e} A \quad (1.14)$$

b. Paroi composite plane

Une paroi peut être composée de plusieurs matériaux différents en contact physique les uns avec les autres sur une surface A . L'épaisseur de la paroi est e et chacun des matériaux a une épaisseur e_1, e_2, \dots, e_n telle que :

$$e = \sum_{i=1}^n e_i \quad (1.15)$$

Les matériaux constituant la paroi ont des conductivités thermiques qui sont, respectivement, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$:

$$\frac{e}{\lambda} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} \quad (1.16)$$

Chaque élément de paroi est traversé par le même flux thermique dont l'expression est :

$$\Phi = \frac{(T_1 - T_{n+1}) A}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}} \quad (1.17)$$

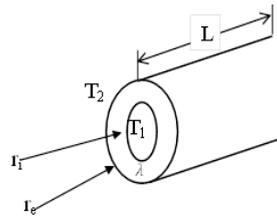
c. Paroi cylindrique

Fig. 1.5 : Paroi cylindrique [1]

En régime permanent, le flux thermique s'exprime par :

$$\Phi = \frac{2 \pi L \lambda (T_1 - T_2)}{\ln(r_e/r_i)} \quad (1.18)$$

L'expression de la température, en un point situé à une distance r du centre telle que $r_e > r > r_i$, est :

$$T_r = T_1 - \frac{\Phi}{2 \pi L \lambda} \ln(r/r_e) \quad (1.19)$$

d. Paroi sphérique

En régime permanent, la formule donnant le flux de chaleur est :

$$\Phi = \frac{2 \pi \lambda (T_1 - T_2)}{1/r_1 - 1/r_2} \quad (1.20)$$

La distribution des températures à l'intérieur de la paroi sphérique a une allure hyperbolique. La température, à une distance r du centre, est donnée par :

$$T_r = T_1 - \frac{\Phi}{4 \pi \lambda} (1/r_i - 1/r) \quad (1.21)$$

1.3.2. Convection

La convection se réfère aux transferts thermiques qui ont lieu dans les fluides en mouvement macroscopique. Le mécanisme élémentaire de transfert de chaleur est la conduction thermique mais le phénomène global est la convection thermique. Les molécules chaudes se mélangent avec les molécules froides et leurs transmettent de la chaleur .

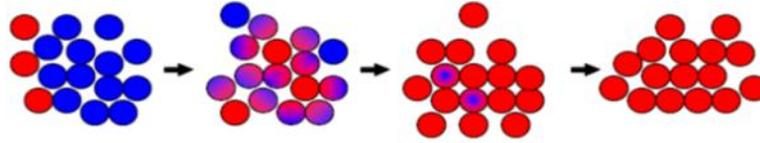


Fig. 1.6 : La Convection [2].

1.3.2.1. Convection naturelle

La convection naturelle ou libre fait référence aux écoulements engendrés par les forces flottabilité. En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densités dues au fait que la température ne soit pas uniforme. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions à température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courants descendants se produit pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud. Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre [4] → [3].. Ce mode de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = h A (T_p - T_f) \quad (1.22)$$

1.3.2.2 Convection forcée

Dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques. Où le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...)

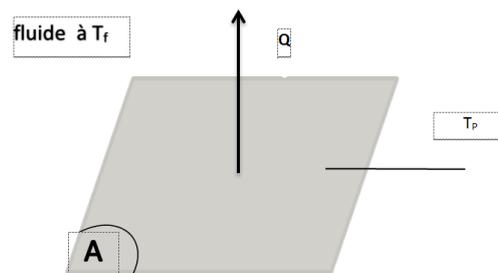


Fig. 1.7: Schéma du transfert de chaleur convectif

La valeur du coefficient h de transfert de chaleur par convection est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

1.3.2.3. Convection mixte

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents quand les vitesses d'écoulement dues aux deux types de convection sont considérées séparément du même ordre de grandeur. L'étude des écoulements convectifs dans des cavités fermées possède de nombreuses applications dans le domaine industriel considérant les diverses combinaisons des différences de la température imposée et des configurations géométriques de la cavité.

L'interaction de l'écoulement cisailé du au mouvement des parois et de l'écoulement de la convection naturelle du à l'effet de flottabilité constitue jusqu'à présent un domaine de recherche fondamental et nécessite une analyse approfondie de la physique de l'écoulement résultant et du transfert de chaleur [4].

1.3.2.4. Nombres adimensionnels en convection

L'étude des problèmes de transfert de chaleur par convection implique la résolution d'équations différentielles qui décrivent la mécanique des fluides, les échanges d'énergie, les transferts de masse. Ces équations sont généralement liées et difficiles à résoudre théoriquement, ce qui conduit à associer à la théorie de l'expérimentation permettant de trouver les valeurs des grandeurs recherchées.

L'expérimentation est souvent menée à une échelle différente de la réalité industrielle. La nécessité de définir des corrélations qui soient applicables à des appareils de tailles différentes opérant dans des situations différentes conduit à l'utilisation de paramètres adimensionnels qui permettent de définir des similitudes.

1°. Nombre de Reynolds

Ce nombre exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité (caractérise le type d'écoulement du fluide).

$$Re = \frac{G \cdot D_h}{\mu} = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (1.23)$$

Avec:

$$D_h = 4A/P \quad (1.24)$$

2°. Nombre de Prandtl

Ce nombre exprime le rapport entre la viscosité cinématique et la diffusivité thermique du fluide. Il s'agit donc d'un nombre caractérisant le fluide. Le nombre de Prandtl est donc indépendant de l'écoulement.

$$Pr = \mu \frac{C_p}{\lambda} \quad (1.25)$$

3°. Nombre de Nusselt

Ce nombre caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

$$Nu = \frac{h D}{\lambda} \quad (1.26)$$

4° Nombre de Grashof

Il caractérise le déplacement du fluide dans un phénomène de convection naturelle.

$$Gr = \rho^2 g \beta (T_p - T_{sat}) \frac{D^3}{\mu^2} \quad (1.27)$$

Avec:

$$\beta = \frac{1}{T_p - T_{sat}} \left(\frac{\rho_0 - \rho_{sat}}{\rho_0} \right) \quad (1.28)$$

5° Nombre de Rayleigh

Il caractérise la convection naturelle.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (1.29)$$

1.3.3 Rayonnement thermique

Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière. Le rayonnement thermique concerne les ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde couvre le spectre ultraviolet et le spectre infrarouge.

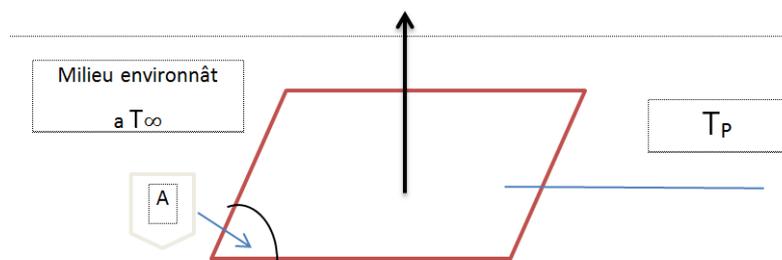


Fig. I.8 : Schéma du transfert de chaleur par rayonnement.

Le flux thermique échangé entre le milieu environnant et la paroi est donné par la relation suivante :

$$\Phi = \sigma \varepsilon_p A (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (1.30)$$

1.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre ont été abordés les différents modes de transfert de chaleur. Ces modes sont issus de la théorie des échanges thermiques entre les milieux physiques. Leurs rôles et leurs applications apparaissent lors du dimensionnement thermohydraulique des systèmes techniques à dominante énergétique utilisés dans les procédés où le besoin de refroidir ou d'échauffer est requis. C'est le cas des échangeurs de chaleur.

Dans les chapitres qui suivent, un calcul thermofluidique d'un échangeur de chaleur qui est le radiateur utilisé dans le processus de refroidissement du liquide de refroidissement d'un moteur à combustion interne pour un véhicule automobile.