

Chapitre. I : Généralités sur les transferts de chaleur

I.1 Introduction :

L'énergie correspond à un transfert ou échange par interaction d'un système avec son environnement. Ce système subit alors une transformation. On distingue habituellement deux types d'énergie :

✚ Le **travail noté W** qui peut prendre diverses formes selon l'origine physique du transfert en jeu (électrique, magnétique, mécanique.....).

✚ La **chaleur notée Q**.

Dans le cadre de ce cours, nous nous limiterons de façon modeste, parmi les transferts énergétiques, à l'étude des transferts de chaleur ou transferts thermiques, selon un point de vue macroscopique. Nous serons ainsi amenés à répondre à 3 questions:

1. Qu'est ce qu'un transfert de chaleur ?
2. Comment la chaleur est elle transférée ?
3. Pourquoi est-ce important de l'étudier ?

Les réponses apportées à ces 3 questions nous permettront de comprendre les mécanismes physiques en jeu dans les transferts de chaleur et d'apprécier l'importance de ces transferts chaleur dans les problèmes industriels, environnementaux et économiques.

Définition: Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre 2 corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les 2 corps.

On distingue habituellement 3 modes de transfert de chaleur :

1. **La conduction thermique**
2. **Le rayonnement thermique**
3. **La convection thermique**

I.2. Généralités sur les transferts de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

I.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 : $T = f(x, y, z)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

I.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. 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 :

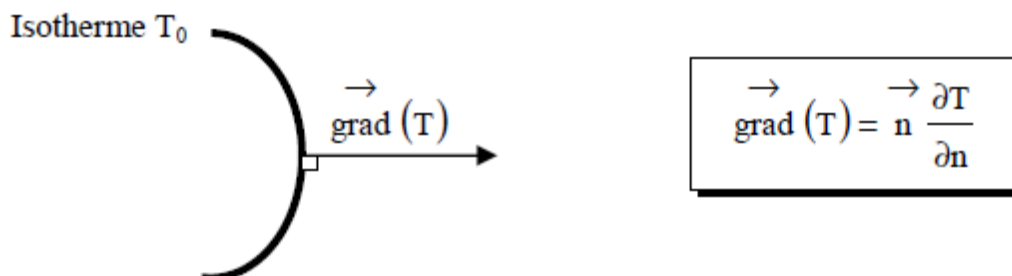


Figure.1. Isotherme et gradient thermique

Avec : \vec{n} : vecteur unitaire de la normale.

$\frac{\partial T}{\partial n}$: dérivée de la température le long de la normale.

I.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 :

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt}, \text{ Où } S \text{ est l'aire de la surface (m}^2\text{)}.$$

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

$$\phi = \frac{dQ}{dt}$$

I.3. Formulation d'un problème de transfert de chaleur

I.3.1. Bilan d'énergie :

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :

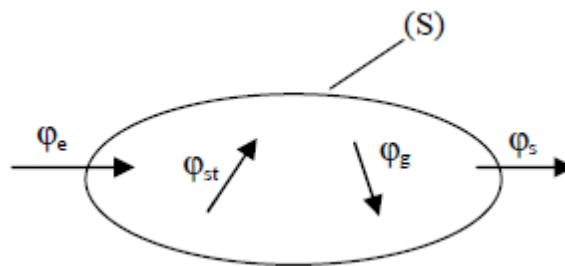


Figure.2. Système et bilan énergétique

ϕ_{st} : flux de chaleur stocké dans le système (S)

ϕ_g : flux de chaleur généré dans le système (S)

ϕ_e : flux de chaleur entrant dans le système (S)

ϕ_s : flux de chaleur sortant dans le système (S)

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) : $\phi_e + \phi_g = \phi_{st} + \phi_s$

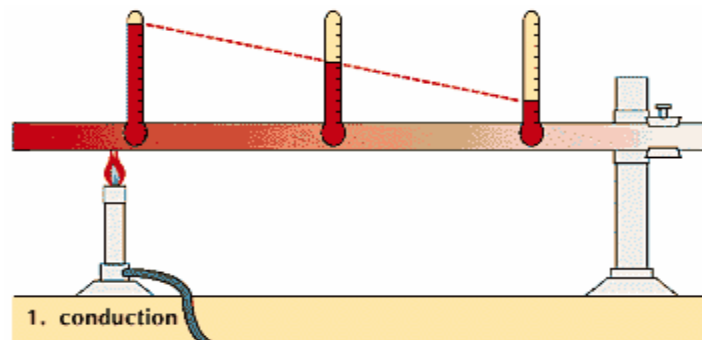
I.4. Expression des flux d'énergie

Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

I.4.1. La conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur (ou l'échange d'énergie interne) provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux ou encore entre deux milieux en contact physique. (gradient de température dans un milieu).

Exemple : Barre de métal chauffée à l'une de ces extrémités.



La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : le flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température : $\vec{\phi} = -\lambda * S * \overrightarrow{grad}(T)$

Ou sous forme algébrique : $\phi = -\lambda * S * (\frac{\partial T}{\partial x})$

Avec : ϕ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu (W/m·K)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

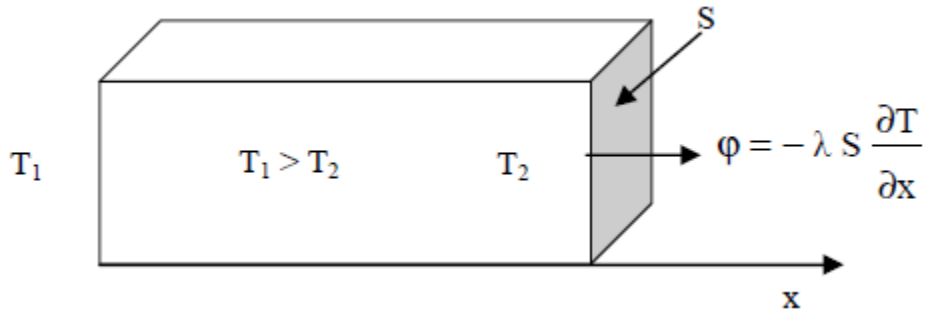


Figure.3. Schéma du transfert de chaleur conductif

On trouvera dans le tableau 1.1 les valeurs de la conductivité thermique l de certains matériaux parmi les plus courants.

Tableau 1.1 : Conductivité thermique de certains matériaux

Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)	Matériau	λ (W.m ⁻¹ . °C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	15	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Brique terre cuite	1,1	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Verre	1,0	Polystyrène extrudé	0,028
Eau	0,60	Air	0,026

I.4.2. La convection :

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\phi = h * S * (T_p - T_\infty)$$

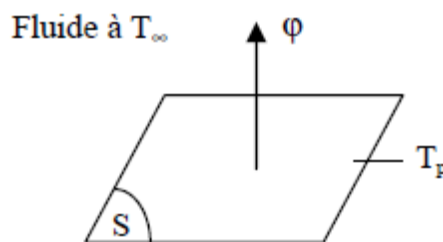


Figure.4. Schéma du transfert de chaleur convectif

Avec : ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m²K)

T_p : Température de surface du solide (K)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (K)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m²)

I.4.3. Le rayonnement

Le rayonnement thermique peut être considéré comme un cas particulier du rayonnement électromagnétique. L'exemple le plus simple est celui du rayonnement solaire.

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid sans nécessité de support matériel. C'est donc le seul mode de transfert de chaleur qui peut se propager dans le vide.

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$\phi = \sigma * \epsilon_p * S * (T_p^4 - T_\infty^4)$$

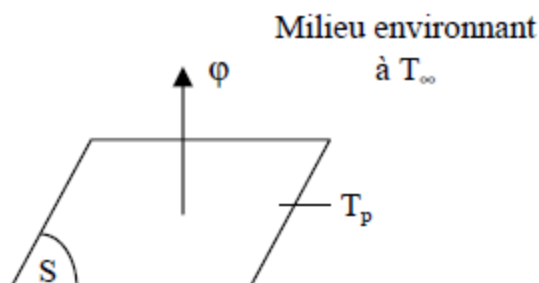


Figure.5. Schéma du transfert de chaleur radiatif

Avec : ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

σ : Constante de Stefan ($5,67.10^{-8} W / m^2 K^4$)

ε_p : Température de surface du solide (K)

T_p : Température de surface du solide (K)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (K)

S : Aire de la surface (m^2)

I.4.4. Flux de chaleur lié à un débit massique :

Lorsqu'un débit massique \dot{m} de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , on doit considérer dans le bilan un flux de chaleur entrant correspondant :

$$\phi_e = \dot{m} * C_p (T_1 - T_2)$$

Avec : ϕ_e : Flux de chaleur entrant dans le système (W)

\dot{m} : Débit massique (Kg/s)

C_p : Chaleur spécifique (J/Kg.K)

T_1, T_2 : Températures d'entrée et de sortie (K)

I.4.5. Stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie

interne au cours du temps: $\phi_{st} = \rho * V * c * \frac{\partial T}{\partial t}$

Avec : ϕ_{st} : Flux de chaleur stocké (W), ρ : Masse volumique (Kg/m³), V : Volume (m³)

c : Chaleur spécifique (J/Kg.K), T : Température (K), t : Temps (s)

I.4.5. Génération d'énergie :

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\phi_g = \dot{q} * V$$

Avec : ϕ_g : Flux d'énergie thermique générée (W).

\dot{q} : Densité volumique d'énergie générée (W/m^3).

V : Volume (m^3)