

CHAP. I : GENERALITES SUR LES TRANSFERTS DE CHALEUR

Le transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties du système, ce qui implique que celui-ci n'est alors pas à l'équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système). Au cours de la transformation du système vers un état d'équilibre final, la température va évoluer à la fois en temps et en espace. Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps.

I.1. Les trois modes de transfert de chaleur :

I.1.1 Transfert de chaleur par conduction dans les solides (ou dans les fluides au repos).

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (agitation des atomes ou des molécules, flux d'électrons libres...). Il peut être vu comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques (les particules chaudes qui ont une énergie de vibration élevée) vers les particules les moins énergétiques (les particules froides d'énergie de vibration moins élevée), dû aux collisions entre particules. Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres dans le réseau cristallin (par exemple pour les métaux). Ainsi les bons conducteurs d'électricité sont en général également de bons conducteurs de la chaleur.

I.1.2 Transfert 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 en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement. On distingue deux types de convection:

- **Convection naturelle**: les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition.
- **Convection forcée**: le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).
- On parlera de **convection mixte** lorsque les deux types de convection coexistent dans un système

I.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Tout corps matériel émet et absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique.

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Le phénomène d'émission d'un corps correspond à la conversion d'énergie matérielle (agitation des électrons constituant la matière dont l'intensité dépend de la température) en énergie radiative.

I.2 DEFINITIONS :

I.2.1 Champs de température

Pendant l'échauffement ou le refroidissement d'un corps, la température va varier d'un point à un autre et à chaque instant. Pour cela, la température (fonction scalaire) dans un point M peut être écrite sous la forme : $T=T(M, t)$ tel que, M est un point quelconque dans le corps défini par les coordonnées (x,y,z).

L'ensemble des températures (*distribution des températures*) dans tous les points du corps s'appelle champ de température.

Lorsque la température varie avec la position et avec le temps t, on dit que le régime de transfert est **instationnaire (régime variable)** et si le champ de température est **uniforme** par rapport au temps on dit que la conduction est **stationnaire (régime permanent)**.

Dans les deux cas, (instationnaire et stationnaire), la température peut dépendre de :

- des **trois** coordonnées $T=T(x,y,z,t)$: tridimensionnelle
 - des **deux** coordonnées par exemple $T=T(x,y,t)$: bidimensionnelle
 - une **seule** coordonnée par exemple $T=T(x,t)$: unidirectionnelle
- dans le cas stationnaire (T ne dépend pas du temps), la température peut être $T(x,y,z)$, $T(x,y)$ ou $T(x)$

I.2.2 Surfaces isothermes

Les points ayant à chaque instant la même température sont appelés **surface isothermes** ($T(M)=\text{constante}$). En régime variable, les surfaces isothermes sont **mobiles et déformables** et en régime permanent, elles sont **invariantes**.

I.2.3 Gradient de température

Dans les coordonnées cartésiennes, le gradient de température est défini par :

$$\vec{\text{grad}} T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (1)$$

Tel que : $(\partial T/\partial x)$, $(\partial T/\partial y)$ et $(\partial T/\partial z)$ sont appelés les dérivées partielles de T par rapport à x, y et z

La dérivée totale de T est donnée par ; $dT = \frac{\partial T}{\partial x} dx + \frac{\partial T}{\partial y} dy + \frac{\partial T}{\partial z} dz$ (2)

Si on prend un élément de déplacement \vec{dl} sur le corps, on a ;

$$\vec{dl} = dx \vec{i} + dy \vec{j} + dz \vec{k} \quad (3)$$

De les équations (1), (2) et (3), on peut écrire dT sous la forme:

$$dT = \overrightarrow{\text{grad}} T \cdot \overrightarrow{dl} \quad (4)$$

- Si \overrightarrow{dl} est située sur la surface isotherme alors :

$T(M) = \text{const} \rightarrow dT = 0$ et $\overrightarrow{\text{grad}} T \cdot \overrightarrow{dl} = 0$ ce qui implique que $\overrightarrow{\text{grad}} T$ est perpendiculaire à \overrightarrow{dl} et à la surface isotherme et donc parallèle à la normale \overrightarrow{n} .

I.2.4 Flux thermique (Flux de chaleur)

Le flux thermique noté (Φ) est la quantité de chaleur (Q) qui traverse (ou échangée) la surface du corps dans l'unité de temps et s'écrit sous la forme :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{Joule/s}) = [\text{watt}] \quad (5)$$

On peut dire que le flux thermique représente la **puissance** échangée par la surface de ce corps ;

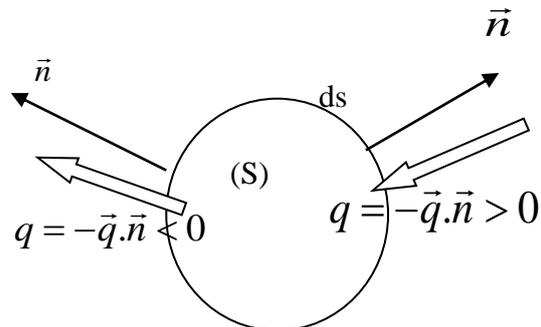
I.2.5 Densité de flux de chaleur

En général, le flux échangé à travers une surface n'est pas uniforme sur toute la surface. On définit alors une densité de flux de chaleur, \mathbf{q} , qui correspond à un flux de chaleur par unité de surface (en W/m^2).

Exemple : flux de chaleur échangé par un système avec l'extérieur à travers une surface S :

$$\Phi = \iint_S -\vec{q} \cdot \vec{n} \cdot ds$$

$$\rightarrow q = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{W/m}^2) \quad (6)$$



I.2.6. Loi de Fourier (1822)

Énoncé

Il existe une relation linéaire entre la **densité de flux thermique (\mathbf{q})** et le **gradient de température** en tout point d'un milieu **isotrope** (c.à.d, il possède les mêmes caractéristiques physiques).

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (7)$$

\mathbf{q} s'exprime en W/m^2

$$\text{le flux est : } \Phi = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (8)$$

S est la surface d'échange (m^2)

Le signe '-' intervenant dans cette loi traduit le fait que le flux de chaleur circule des zones

chaudes vers les zones froides (dans le sens opposé au gradient de température).

-Dans les coordonnées cartésiennes :
$$\vec{q} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right) \quad (9)$$

Où λ est la **conductivité thermique** en $(W.m^{-1}.K^{-1})$; est une grandeur scalaire positive, caractéristique du milieu, elle dépend de la nature, la forme et la température de la matière et pour un milieu **isotrope** ($\lambda=constante$)

Remarque 1 : Dans les **matériaux solides** (notamment les métaux), la conductivité thermique varie avec la température selon la relation suivante :

$$\lambda = \lambda_0 [(1+\alpha(T-T_0))] \quad (10)$$

tel que :

λ_0 : conductivité thermique à la température T_0

α : est une constante dépend d'une matière à une autre

T_0 : température référentielle

- $\alpha > 0$ pour de nombreux matériaux isolants.
- $\alpha < 0$ pour la plupart des métaux et alliages (à l'exception de l'aluminium et du laiton).

- Selon la loi de Fourier, on remarque de l'équation (7), lorsque la conductivité thermique est élevée, la densité de flux de chaleur est grande, (cas des métaux).

Remarque 2 : La conductivité thermique d'un mélange (alliage) ne varie pas linéairement avec la composition du mélange. Il est donc impossible de prévoir la conductivité thermique d'un alliage en connaissant sa composition et la conductivité des différents éléments constituant cet alliage. Il faut donc mesurer expérimentalement cette conductivité.

Quelque grandeurs de la conductivité thermiques de quelque matériaux à la température $T=20^\circ C$

Tableau 1 ; Conductivité thermique des différents matériaux

matériaux	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
Gaz (sous la pression normale)	0.006 – 0.18 (exp, air : 0.024)
Matériaux Isolants thermiques	0.025 – 0.25 (exp, polystyrène : 0.209)
Liquides non métaux	0.1 – 1 (exp, eau : 0.59)
Liquides métaux	8.5 – 85 (exp, sodium à $200^\circ C$: 81.2)
Solides non métalliques	0.025 – 3 (exp, Biton : 1.7)
Alliages	10 – 150
Métaux pures	20 – 400 (exp, Cuivre : 386, Aluminium : 200)

I.2.7. Loi de Newton

Dans le cas de la convection où le fluide est en contact avec un corps solide, l'expression de flux thermique échangé entre le fluide et le corps solide est donnée par la loi de Newton suivante:

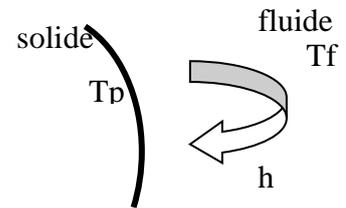
$$\Phi = -h.S.\Delta T \quad (11)$$

tel que :

h : coefficient de transfert thermique par convection ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)

S : surface d'échange entre le fluide et le corps solide

$\Delta T = (T_p - T_f)$: différence de température entre le solide et le fluide



I.2.8 Flux de chaleur échangé par rayonnement – loi de Stefan

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps à des températures différentes séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Ce mécanisme de transfert est régi par la **loi de Stefan**.

Exemple : corps de petite dimension de température T_c placé dans une enceinte fermée de température T_p .

$$q = \varepsilon.\sigma(T_p^4 - T_c^4) \quad (12)$$

ε : émissivité du corps $0 < \varepsilon \leq 1$

σ : constante de Stefan = $5.67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4$)

