

Chapitre I :

Généralités Sur Les Transferts De Chaleur

I.1. Introduction

La thermodynamique nous apprend que l'énergie peut être transférée à partir d'interactions entre le système et son environnement, sous forme de chaleur et de travail. Cependant, la thermodynamique ne se préoccupe que de l'état initial et de l'état final du système à l'équilibre, et ne fournit aucune information sur la nature des interactions mises en jeu et sur l'évolution temporelle du système entre les deux états d'équilibre.

Un 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.2. Les trois modes de transfert de chaleur :

I.2.1. Transfert de chaleur par conduction dans les solides (ou les fluides au repos).

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps 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.

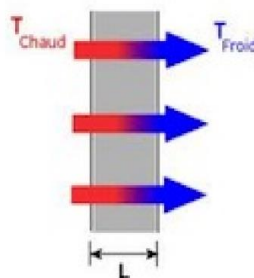


Figure I.1. Phénomène de la conduction dans un solide [1]

I.2.2. Transfert de chaleur par convection

La convection thermique est le transfert d'énergie entre deux milieux, dont l'un au moins est un fluide, par un déplacement moléculaire. Il implique les effets combinés de la conduction et du mouvement du fluide. En l'absence de mouvement du fluide, le transfert de chaleur est assuré exclusivement par la conduction pure.

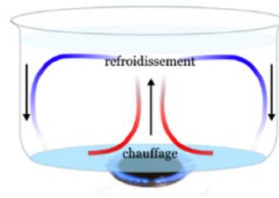


Figure I.2. Phénomène de la convection dans un liquide [1]

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.2.3. 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. Le phénomène d'absorption est la conversion inverse.

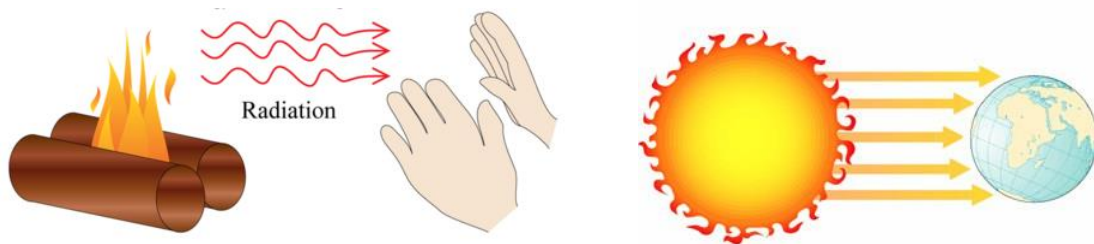


Figure I.3. Exemples du rayonnement thermique. [1]

I.3. Quelques Définitions

I.3.1. 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. On distingue 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 instationnaire**.

I.3.2. 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 :

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \cdot \frac{\partial T}{\partial n}, \quad \vec{\nabla} T = \overrightarrow{\text{grad}} T = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (\text{I.1})$$

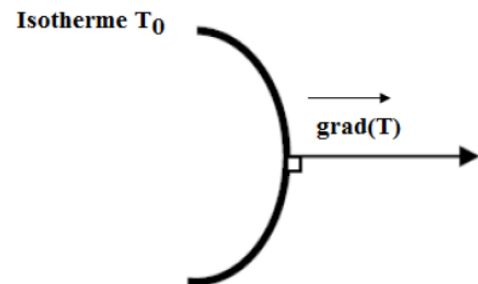


Figure I.4. Surface isotherme et gradient thermique

I.3.3. Flux de chaleur

Un flux de chaleur est une quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur par unité de temps. C'est donc une puissance, qui s'exprime en Watt (J/s) :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \text{ en [W]} \quad (\text{I.2})$$

I.3.4. 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 ϕ , qui correspond à un flux de chaleur par unité de surface.

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \text{ en } \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{I.3})$$

I.4. Formulation d'un problème de transfert de chaleur

1.4.1. 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 :

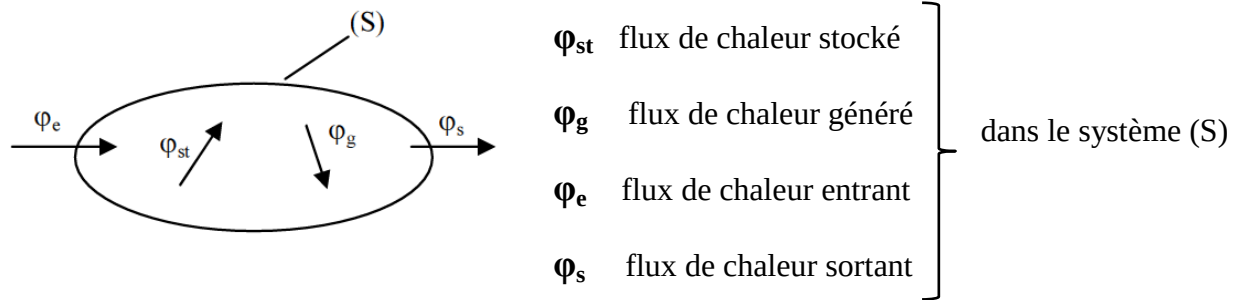


Figure I.5. Système et bilan énergétique

On applique alors le premier principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\text{Accumulation} = \text{Entrée} - \text{Sortie} + \text{Production}$$

Si on suppose que le volume est incompressible (le travail des forces de pression est nul) et au repos, le premier principe s'écrit, pour une évolution entre les instants t et $t + dt$:

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st} \quad (\text{I. 4})$$

1.4.2. 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.

1.4.2.1. Flux de chaleur échangé par conduction – loi de Fourier

Ce mécanisme de transfert est régi par une loi phénoménologique établie par Joseph Fourier en 1822, stipulant que la densité de flux échangée par conduction est proportionnelle au gradient de température. Cette loi, appelée loi de Fourier, s'écrit :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{I. 5})$$

En général

$$\varphi = -\lambda \cdot S \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (\text{I. 6})$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

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

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

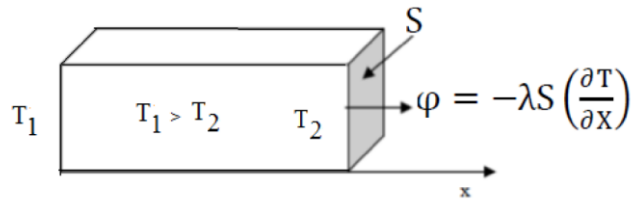


Figure I.6. Schéma du transfert de chaleur conductif.

La conductivité thermique λ dépend de la nature du corps considéré et dépend généralement de la température. Elle traduit la capacité d'un matériau à transporter la chaleur par conduction. Ainsi, pour un gradient de température donné, le flux de chaleur sera d'autant plus important que la conductivité sera grande. Pour les matériaux conducteurs de la chaleur λ sera élevée, et inversement sera faible pour les isolants.

On trouvera dans le tableau I.1 les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants.

Tableau I.1. Conductivité thermique de certains matériaux[2]

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	Polystyrène extrudé	0,028
Verre	1,0	Air	0,026
Eau	0,60	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045

1.4.2. 2. Flux de chaleur échangé par convection – loi de Newton

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton qui stipule que le flux de chaleur échangé entre une paroi solide et un fluide en écoulement est proportionnelle à l'écart de température qui lui a donné naissance.

Le flux de chaleur entrant dans le fluide ou sortant du solide si $T_p > T_\infty$ est exprimé par la loi de Newton :

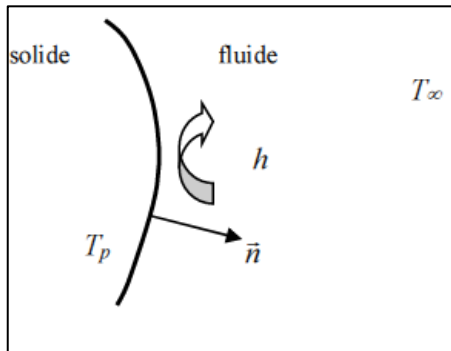


Figure I.7. Schéma du transfert de chaleur convectif

$$\vec{\phi} = h \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \cdot \vec{n} \quad (I.7)$$

$$\phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad (I.8)$$

Avec :

ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

T_p : Température de surface du solide ($^\circ C$)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ C$)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

h est une grandeur positive appelée coefficient d'échange convectif, en ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Ce coefficient dépend de nombreux paramètres (fluide, type d'écoulement, état de surface...) et est donc extrêmement difficile à quantifier précisément.

I.4.2. 3. 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 :

$$\phi = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (I.9)$$

Avec:

ϕ : flux de chaleur transmise par rayonnement (W);

σ : constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$) ;

ε : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface (K)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

S : Aire de la surface (m^2)

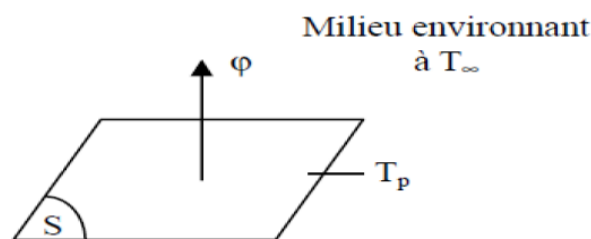


Figure I.8. Schéma du transfert de chaleur radiatif

I.4.2.4. 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 :

$$\varphi_e = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{I. 10})$$

Avec :

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

$\dot{m}$: Débit massique ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

c_p : Chaleur spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

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

I.4.2.5. Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps (à pression constante et en l'absence de changement d'état) :

$$\varphi_{st} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I. 11})$$

Avec :

φ_{st} : Flux de chaleur stocké (W)

ρ : Masse volumique (kg m^{-3})

V : Volume (m^3)

c_p : Chaleur spécifique ($\text{J kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

T : Température ($^\circ\text{C}$)

t : Temps (s)

I.4.2.6. 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 :

$$\varphi_g = \dot{q} \cdot V \quad (\text{I. 12})$$

Avec :

φ_g : Flux d'énergie thermique générée (W)

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

V : Volume (m^3)