

Chapitre I. Rappels des lois de transfert de chaleur

I.1. Définition

On appelle transferts de chaleur (transferts thermiques), les processus par lesquels de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à des températures différentes. La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement. Dans le cas où un de ces trois modes est déterminant, les effets des autres sont peu importants, aussi ils peuvent être négligés, simplifiant considérablement l'analyse du cas concerné.

I.2. Conduction

La conduction thermique résulte de « chocs » à l'échelle moléculaire et atomique. Elle va donc être liée à la structure et à l'organisation du matériau. Elle peut avoir lieu dans les solides et dans une moindre mesure dans les fluides, plus dans les liquides que dans les gaz. C'est un phénomène ; de transport de la chaleur ; très analogue à la conduction de l'électricité. Il s'agit d'un transfert d'énergie à petite échelle, dans un corps localement au repos. Nous parlons de conducteur et d'isolant de la chaleur. Elle est décrite par la loi de Fourier. Elle peut aussi être définie, par une simple explication, comme un phénomène par lequel l'énergie est transférée des zones à haute température vers des zones à basse température. Dans n'importe quel milieu, ce mode de transfert thermique tend à uniformiser la répartition d'énergie cinétique des particules constituantes dans la masse du corps. Des exemples typiques pour la conduction sont : le transfert de chaleur par des parois de bâtiments, des conduites qui transportent des différents agents chauds ou froids.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier (1822) : le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température (figure I.1).

$$\Phi = - \lambda S \frac{dT}{dX} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transféré (W)

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

X : Variable d'espace dans la direction du flux

λ : Conductivité thermique du matériau, elle caractérise la propension d'un matériau à conduire la chaleur, elle s'exprime en W/m K.

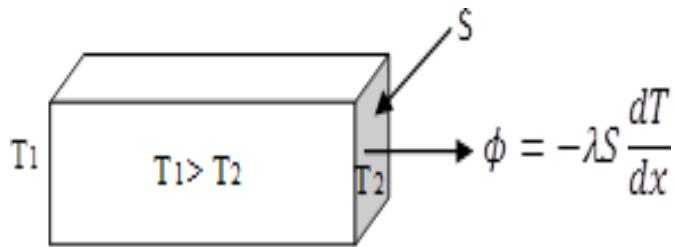


Figure I.1. Schéma du transfert de chaleur conducteur.

I.3. Convection

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides liquides ou gaz en mouvement. La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide liquide ou gaz entre des zones ayant des températures différentes ; ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides, qui change de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement (impulse) entre elles. Ayant toujours lieu dans un milieu fluide, elle a comme caractéristique de base le fait que le transfert de chaleur est intimement lié par le mouvement de ce milieu (d'ailleurs son nom vient du verbe latin convierai qui signifie porté avec soi).

Il convient de distinguer la convection forcée (mouvement créé par une différence de pressions) dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieure (pompe, une soufflerie, ventilateur, etc.) de la convection naturelle (libre) dans laquelle le fluide prend, en son sein, l'énergie nécessaire au mouvement (variation de masse volumique associée à une variation de température par exemple ; si le fluide est isotherme, il n'y a pas de mouvement). De façon macroscopique, elle est décrite par la loi de refroidissement de Newton (1701).

$$\Phi = h S (T_p - T_f) \quad (I.2)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transféré (W)

S : Surface traversée (m^2)

T_p : Température de la paroi (K)

T_f : Température moyenne du fluide (K)

h : Coefficient moyen de transfert convectif ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

En considérant l'écoulement présenté dans (figure I.2), cette loi peut être expliquée comme suit : un fluide possédant une vitesse et une température T_f , passe sur la surface d'un milieu solide de forme arbitraire et de surface S . la surface du milieu est à une température T_p et les deux températures T_p et T_f sont différentes. Cette différence provoque le transfert de chaleur entre le solide et le fluide. Où les paramètres de cette expression représentent respectivement : Φ : le flux de chaleur échangé, exprimé en Watt (W) ; S : la surface d'échange thermique (m^2) ; T_p sa température, T_f celle du fluide exprimé en (K), et h : le coefficient d'échange convectif ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

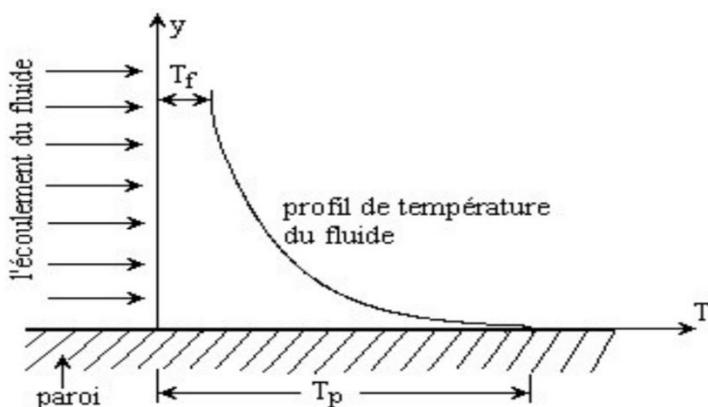


Figure I.2. Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid.

Un des exemples les plus connus de la convection forcée est le sèche-cheveux dans lequel l'air ambiant est soufflé par un ventilateur au travers d'une résistance chauffante électrique. Exemple de convection naturelle : le chauffage d'une pièce par un radiateur correspond à une élévation d'air chaud le long des murs, l'air plus frais étant aspiré vers le radiateur. L'air chaud ayant tendance à s'élever et l'air frais à descendre, on doit installer les radiateurs près du sol et les appareils de climatisation près du plafond pour garantir une efficacité maximale du dispositif de chauffage.

I.4. Rayonnement

Tous les corps, quelles soit leur état, émettent et absorbent de la chaleur en permanence. L'absorption de chaleur par le milieu élève sa température et accroît son agitation moléculaire et donc l'émission de chaleur. Le transfert de chaleur par rayonnement suppose l'existence d'un émetteur de rayonnement, d'un espace dans le quelle rayonnements propage et d'un récepteur

sur ou dans le quelle rayonnement est transformé. Ce transfert dépend du niveau de température des corps présents. Tout milieu matériel ayant une température supérieure au zéro absolu (0 K ou - 273,15°C), émet un spectre d'ondes électromagnétiques. La figure I.3 présente les différents types d'onde électromagnétiques et leurs longueurs d'onde correspondants.

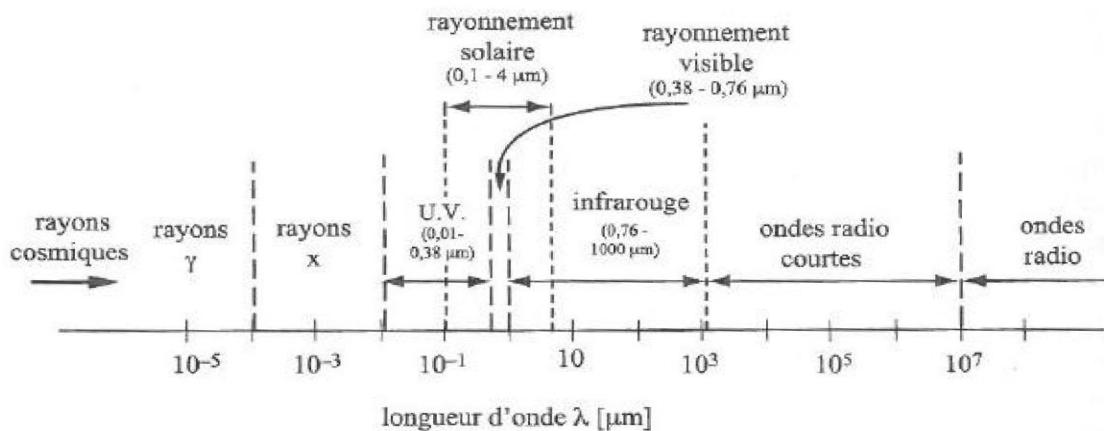


Figure I.3. Présentation sous forme de diagramme de classement du spectre des ondes électromagnétiques.

La lumière visible perçue par l'œil humain est située entre $0,38$ et $0,76\mu\text{m}$, tandis que les infrarouges (IR) se situent entre $0,76$ et $1000 \mu\text{m}$. Les grandeurs radiatives dépendent d'un grand nombre de facteurs. Elles sont en particulier dépendantes de la nature du milieu matériel, de la longueur d'onde du rayon incident, et de la direction d'incidence.

Le flux de chaleur échangé entre la surface S et l'environnement est donné par loi de Stefan-Boltzmann.

$$\phi = \sigma \varepsilon S (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (\text{I. 3})$$

Avec :

ϕ : Flux de chaleur (W)

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

S : Surface traversée (m^2)

T_s : Température de la surface (K)

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

E : Émissivité de la surface

La figure I.4 représente la combinaison entre les trois modes de transfert de chaleur.

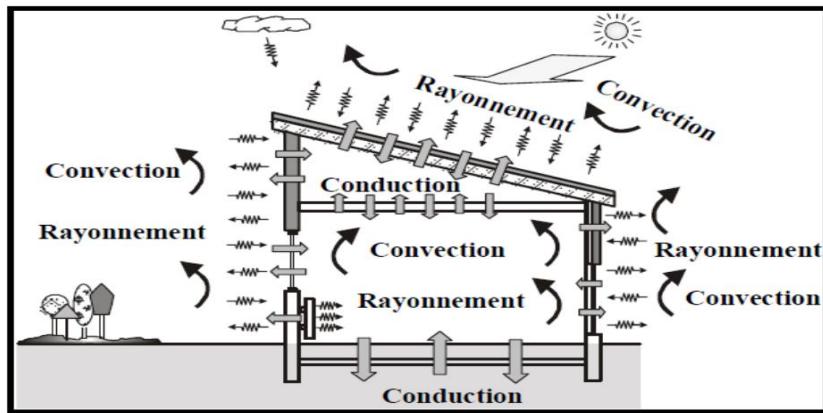


Figure I.4. Combinaison entre les trois modes de transfert thermique.

I.5. Formulation d'un problème de transfert de chaleur

I.5.1. 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 : On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système(S) :

$$\emptyset_e + \emptyset_g = \emptyset_s + \emptyset_{st} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

\emptyset_e : Flux de chaleur entrant

\emptyset_g : Flux de chaleur généré

\emptyset_s : Flux de chaleur sortant

\emptyset_{st} : Flux de chaleur stocké

I.5.2. 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.

I.5.2.1. Stockage d'énergie

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

cours du temps d'où :

$$\dot{\phi}_{st} = m C_p \frac{dT}{dt} \quad (I.5)$$

Avec :

$\dot{\phi}_{st}$: Flux de chaleur stockée (W)

m : Masse (kg)

C_p : Chaleur spécifique (J/kg °C)

T : Température (°C)

t : Temps (s).

I.5.2.2. Génération d'énergie

C'est l'énergie produite lorsqu'une forme d'énergie (chimique, électrique, nucléaire, etc.) est convertie en énergie thermique.

$$\dot{\phi}_g = q v \quad (I.6)$$

Avec :

q : Densité volumique de l'énergie générée (w/m³)

v : Volume (m³).

I.6. Domaines d'applications

Citons quelques domaines :

I.6.1. Transports terrestres et aéronautiques

- ✓ **Véhicule thermique** : refroidissement des principaux organes du moteur, contrôle thermique de la catalyse (un pot catalytique n'est efficace qu'à partir de 350°C environ), refroidissement des freins, contrôle de température du carburant.
- ✓ **Freinage** : le problème consiste à s'assurer que les organes de freinage conservent des températures modérées, faute de quoi les surfaces frottantes perdraient leurs qualités, et les pièces magnétiques, dépassant le "point de Curie", perdraient leurs propriétés d'aimantation.
- ✓ **Véhicule électrique** : contrôle thermique du moteur, de l'électronique, de la batterie, intégration des boucles fluides (le chauffage de l'habitacle d'une voiture électrique pose un

problème particulier).

- ✓ **Thermique de l'habitacle automobile** : vitrages performants (limitant les surchauffes d'été), propriétés radiatives des revêtements de siège, climatisation et confort thermique.
- ✓ **Turbo – réacteur** : Les moteurs d'avion ont un rendement d'autant plus élevé que les gaz de combustion entrent chauds dans le corps de la turbine. On pourrait donc imaginer augmenter encore leur température. La limitation provient des contraintes acceptables par les matériaux constituant les aubages. Ceci impose un refroidissement local des aubages réalisé en soufflant un film d'air froid sur leur surface. Le collage de matériaux composites impose des vitesses de montée en température bien contrôlée.

I.6.2. Industries électroniques

La miniaturisation des composants se traduit par un accroissement de la densité de puissance dissipée dans les puces électroniques. Il faut donc reconsidérer les technologies de refroidissement à utiliser. Le recours à des matériaux et dispositifs propres à évacuer la chaleur (ailettes en particulier) génèrent d'autres problèmes thermiques : conduction thermique lors du brasage des composants sur les supports, la température ne devant pas dépasser 320°C.

I.6.3. Chimie et agroalimentaire - maintien en température des réacteurs

Réaction chimique : Si la réaction est endothermique (fours à chaux, fours à ciment), il faut fournir de la chaleur aux minéraux entrant en réaction. Si N est le nombre de moles transformées par unité de temps, et L la chaleur molaire de réaction, le flux thermique minimal pour maintenir la température constante vaut $N \cdot L$. Si la réaction est exothermique (synthèse de l'ammoniac) ou si la température doit être contrôlée (gazéification du charbon), il s'agit au contraire d'évacuer la chaleur produite, de telle sorte que la température ne s'élève pas à l'intérieur du réacteur.

I.6.4. Energie

Production d'énergie thermique (brûleurs, foyers, chaudières, etc.). La thermique influence non seulement le rendement de ces appareils mais aussi les émissions de polluants (exemple température de flamme et production de NOx). Dans une chaudière, on veut vaporiser un certain débit massique m d'eau à une température donnée T. La puissance à fournir au liquide est par conséquent $F = m \cdot L$. L désignant la chaleur latente (J/kg) de vaporisation à la température T.

La conception du générateur de vapeur consiste à produire le débit de vapeur imposé avec l'installation la plus économique possible, en prenant garde toutefois de limiter en tout point la température à un niveau admissible par le métal. La production décentralisée d'énergie électrique par des petites unités conduit à rechercher des échangeurs de chaleur compacts. D'autre part, le rendement des turbines à combustion s'améliorant en aspirant de l'air le plus froid possible, on a recours dans les pays chauds à des stockages de "froid". Les quelques exemples précédents illustrent que l'ingénieur doit concevoir des surfaces d'échange, arbitrer entre consommations d'énergie et coûts d'investissement, prendre en compte les contraintes thermiques, contrôler des températures et des puissances échangées.