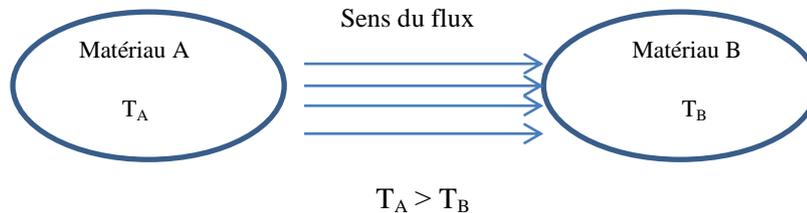


**TRANSFERT DE
CHALEUR**

I Introduction

Les opérations impliquant des transferts thermiques se rencontrent dans presque toutes les usines (alimentaires, pharmaceutique,..) où les multiples procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur. Des connaissances de base en ce domaine sont donc nécessaires à l'ingénieur de production ou de développement.



Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc..., électronique) ou domestique (chauffage de l'habitat).

II. Modes de transmission de la chaleur

On distingue deux modes de transmission de la chaleur : conduction (conduction pur et convection) et rayonnement

La conduction (pur) :

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 s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

Prenons l'exemple d'une barre métallique que l'on chauffe à l'une de ses extrémités : l'agitation thermique des atomes situés à l'extrémité chauffée de la barre augmente et se transmet de proche en proche dans la direction inverse du gradient thermique.

Dans les métaux, la conduction fait intervenir les électrons libres qui les rendent bons conducteurs de la chaleur. En revanche dans les isolants, la conduction se fait mal. En résumé, il y a une forte correspondance entre les propriétés thermiques et électriques des solides.

La convection:

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

La convection concerne exclusivement les fluides (gaz ou liquides) puisqu'elle prend sa source dans un transport macroscopique de matière.

La convection a lieu par exemple lorsque l'on chauffe une casserole d'eau. Le gradient thermique vertical est dirigé vers le bas.

La convection a lieu par exemple lorsque l'on chauffe une casserole d'eau. Le gradient thermique vertical est dirigé vers le bas. La masse volumique du fluide inférieur s'abaisse (car celui-ci est plus chaud) et le fluide s'élève pour être remplacé par du fluide plus lourd situé plus haut.

La convection tente de s'opposer au gradient thermique par un mouvement de fluide. Ce processus est associé à l'action de la gravité. On note que si l'on chauffe la casserole par le haut, le fluide chaud se situe au-dessus du fluide froid et la convection est annihilée (annulé).

Le rayonnement:

Le rayonnement thermique est de l'énergie émise par la matière à une température finie. Le rayonnement peut provenir d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz.

L'énergie du champ radiatif est transportée par les ondes électromagnétiques (ou, ce qui est équivalent, par les photons). Alors que la conduction requiert la présence d'un médium, le rayonnement, lui, est plus efficace dans le vide.

Exemples:

- ♣ La chaleur que reçoit la terre à partir du soleil se fait grâce aux rayonnements.
- ♣ Les plats sont chauffés dans un four à microondes grâce à la chaleur transportée par des rayonnements micro-ondes.

II.1 Champ de températures : un champ scalaire

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. 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.

II.2 Transfert de chaleur par conduction thermique : loi de Fourier

Soit un corps solide, homogène et isotrope (les propriétés physiques de ces matériaux sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace) à travers lequel passe un courant unidirectionnel de chaleur.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : le flux de chaleur transféré dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction.

Le coefficient de proportionnalité k est la conductivité thermique du matériau. Elle dépend du matériau et de sa température.

La loi de Fourier s'écrit donc :

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad \vec{\varphi} = -\lambda S \cdot \overrightarrow{\text{grad } T}$$

q : densité de flux de chaleur ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

φ : flux de chaleur (W.)

λ : conductivité thermique du matériau ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

$\partial T / \partial x_i$: gradient local de température

S : Surface d'échange (m^2)

Le signe (-) dans l'équation est dû au fait que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température.

Plus la conductivité thermique est élevée, plus les matériaux conduisent facilement la chaleur. Au contraire les matériaux de faible conductivité thermique conduisent difficilement la chaleur et sont donc utilisés comme isolants.

Matériaux et Alliages	λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) à 20 °C
Aluminium à 99,9 %	228
Aluminium à 99 %	203
Cuivre à 99,9 %	386
Etain	61
Fer pur	85
Nickel pur	61
Plomb	35
Zinc	111
Acier doux (1 % de C)	46
Acier inox (Cr 18 % - Ni 8 %)	16

Solides non métalliques et gaz	λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) à 20 °C
Amiante (feuilles)	0.162
Béton plein	1.7
Briques de terre cuite pleine	1.16
Liège	0.046
Matières plastiques polyester	0.209
Verre pyrex	1.16
Electrographite	116

Gaz	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹) à 20 °C
Air	0.024
Acétylène	0.019
Anhydride	0.014
Oxygène	0.024

Liquides	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Eau à 20°C	0.59
Eau à 100°C	0.67
Benzène à 30°C	0.14
Mercure à 20°C	0.16

On constate que parmi les solides, les métaux sont beaucoup plus conducteurs que les composés non métalliques à l'exception du graphite (utilisé dans certains échangeurs de chaleur). L'acier inoxydable est moins conducteur que la plupart des autres métaux et alliages.

On constate en général :

$$\lambda \text{ des gaz} < \lambda \text{ des liquides} < \lambda \text{ des solides}$$

II.3 Transfert de chaleur par convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. 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. Indépendamment de la nature de la convection (libre ou forcée), le flux de chaleur est exprimé par la loi de Newton de refroidissement :

$$Q_{conv} = hS(T_p - T_\infty)$$

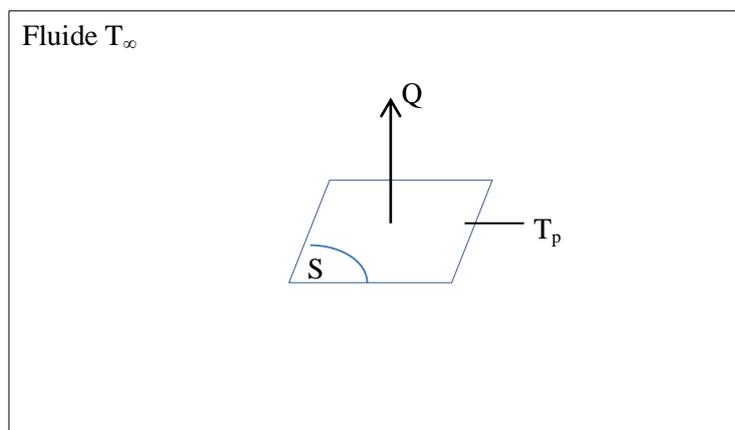


Fig. 5 : Schéma du transfert de chaleur convectif

Avec :

Q : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W m^{-2} °C^{-1}$)

T_p : Température de surface du solide ($°C$)

T_{∞} : Température du fluide loin de la surface du solide ($°C$)

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

II.4 Transfert de chaleur par rayonnement

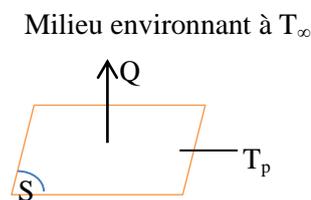


Fig.6 : Schéma du transfert de chaleur radiatif

Le rayonnement 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 suivante :

$$Q = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_{\infty}^4)$$

Avec:

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

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

ε_p : 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)