

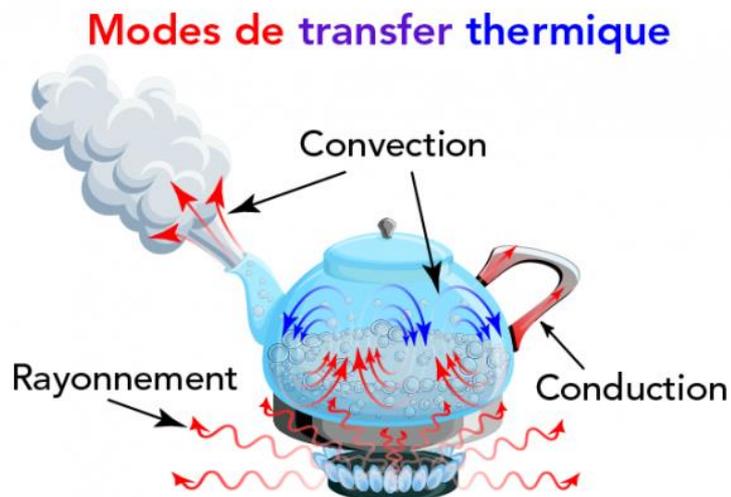
Cours de transfert de chaleur

Chapitre 1: Généralités sur les phénomènes du transfert thermique

On définit le transfert de chaleur comme de l'énergie thermique en transit à cause d'une différence de température. On peut observer les phénomènes de transfert de chaleur aussi bien dans des situations industrielles (fours, réacteurs, échangeurs de chaleur, colonnes à distiller, chambres froides, presses à injection, coulée des métaux...) que dans notre vie quotidienne (le chauffage et l'isolation de la maison, la cuisson des aliments, les vêtements d'hiver et le facteur de refroidissement éolien, le coup de soleil sur la plage !...).

Les trois modes de transfert de chaleur sont:

- la conduction
- la convection
- le rayonnement



La conduction

Ce transfert d'énergie thermique, qui ne nécessite pas de mouvement macroscopique de la matière, est créé par:

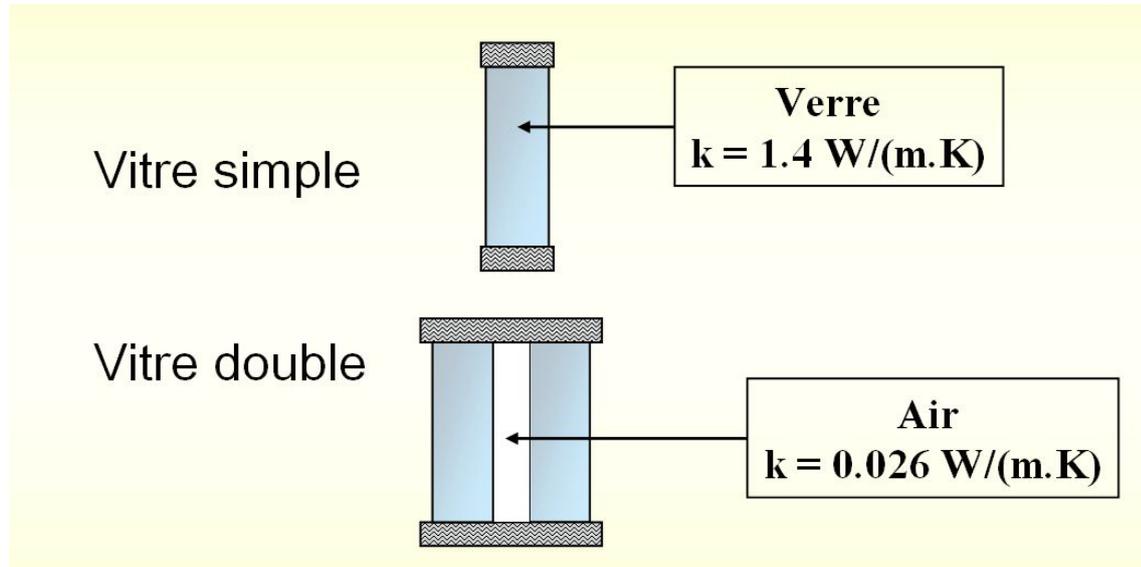
- l'agitation moléculaire (dans les gaz et les liquides)
- les vibrations des réseaux cristallins (dans les solides non-conducteurs)
- le déplacement d'électrons libres (dans les métaux conducteurs)

Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) propose en 1822 la loi de la conduction connue maintenant sous le nom de **loi de Fourier**. Cette relation indique que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de la température et se fait dans la direction des températures décroissantes.

Exemple: conduction dans une vitre.

Si les faces intérieure et extérieure d'une vitre d'une maison sont à des températures différentes il y a conduction thermique dans l'épaisseur de la vitre. En hiver par exemple, si la

température de la face extérieure est de - 10 OC et celle de la face intérieure est de 20OC, le transfert de chaleur se fait de l'intérieur vers l'extérieur (il y a donc des pertes thermiques)



Quiz: Expliquez pourquoi il est préférable d'utiliser une vitre à double vitrage (deux vitres espacées par un mince film d'air) plutôt qu'une seule vitre de même épaisseur totale.

La convection

Le transfert de chaleur par convection nécessite un déplacement macroscopique de matière. Considérons une plaque chauffante sur laquelle s'écoule un fluide plus froid. La mécanique des fluides nous a appris que, près de la surface, se développe une couche limite hydrodynamique dans laquelle les variations de la vitesse s'observent. Le transfert de chaleur de la plaque vers le fluide s'opère par convection et résulte de deux mécanismes:

- juste à la surface là où la vitesse du fluide est nulle, il y a transfert par conduction vers le fluide
- alors que loin de la surface le transfert résulte aussi du déplacement du fluide.

Sur une surface, le phénomène global de transfert de chaleur s'exprime d'une façon pratique par **la loi de refroidissement de Newton:**

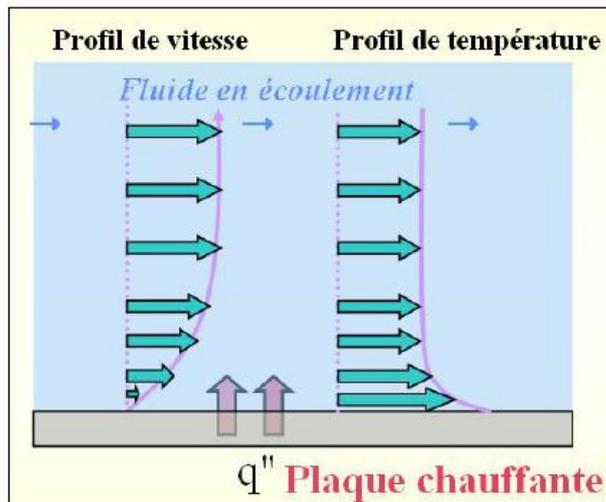
$$q'' = h(T_s - T_0)$$

h coefficient de transfert de chaleur $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ou $W/(m^2 \cdot K)$

T_s température sur la surface (K) ou ($^\circ C$)

T_0 température du fluide loin de la surface (K) ou ($^\circ C$).

Voici des exemples de situations avec transfert de chaleur par convection: échangeur de chaleur, sèche-cheveux, ventilateur, quand on souffle sur son café pour le refroidir !



On distingue :

- la convection forcée pour laquelle le mouvement du fluide est induit par une source externe (pompe, ventilateur...);
- la convection naturelle pour laquelle le mouvement du fluide résulte directement de l'existence des gradients de température et de densité dans le fluide;
- les échanges avec changement de phase (condensation ou ébullition) sont aussi des modes de transfert par convection.

Le rayonnement

C'est un mode de transfert de chaleur qui nous est familier: l'hiver devant un bon feu ou l'été sur la plage au soleil. La chaleur passe d'un corps à haute température vers un corps à basse température sous forme d'un rayonnement électromagnétique (photon); les deux corps devant être dans un milieu transparent (comme l'air ou le vide). La densité de flux maximale émise par une surface est donnée par la **loi de Stephan-Boltzman**:

$$q''_{maxi} = \sigma T_s^4$$

où la constante de Stephan-Boltzman (σ) vaut $5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Le flux maximum est obtenu pour une surface idéale (corps noir). Cependant, les surfaces réelles (corps gris) ont une certaine émissivité (ϵ) qui vient réduire le flux émis par la surface:

$$q''_{réel} = \epsilon \sigma T_s^4$$

Dans le cas où cette surface est environnée d'une autre surface à une température T_{ENVIR} , l'échange net de chaleur est alors:

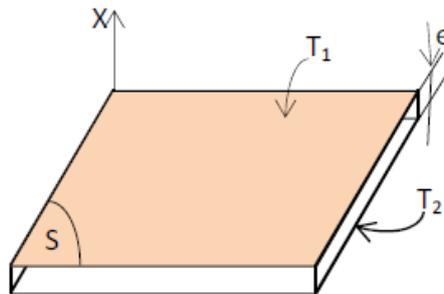
$$q''_{net} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{ENVIR}^4)$$

Lois fondamentales du transfert de la chaleur

Loi fondamentale de la conduction (loi de J.Fourier)

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction, a été proposée par le mathématicien et physicien Français, Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822.

Considérons une plaque plane (D), de surface (S) et d'épaisseur (e)



- Soit dQ, la quantité de chaleur échangée entre la plaque et l'air ambiant pendant le temps dt;
- On définit le flux de chaleur (flux thermique, ϕ) comme la puissance échangée entre la surface S de la plaque et le milieu extérieur.

$$\phi = \frac{dQ[J]}{dt(s)}; [W] \quad 1$$

- On définit la densité de flux thermique comme la puissance échangée par unité de surface de la plaque:

$$\phi = \frac{dQ[J]}{sdt(m^2.s)}; \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad 2$$

- Les principes fondamentaux de la thermodynamique nous font savoir que :
 - L'énergie est conservée en l'absence d'une source de chaleur ;
 - La chaleur transmise passe toujours du corps chaud vers le corps froid (dans notre cas : $T_1 > T_2$).
- On peut vérifier expérimentalement que :

$$Q = k \cdot \frac{S}{e} \cdot (T_1 - T_2) \quad 3$$

Tels que ;

Q : la quantité de chaleur échangée à travers la surface (S);

K : le facteur de proportionnalité appelé conductivité thermique qui est une caractéristique du matériau, son unité de mesure est [W/m.K] ou [kcal/h.m.C];

Pour un élément infinitésimal, ds, cette relation s'écrit:

$$dQ = d\phi = -k \cdot ds \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad 4$$

Le signe (-) : pour tenir compte du sens de flux thermique, le gradient qui va de la plus grande grandeur à la plus petite est négative (**voir interprétation mathématique ci-après**).

L'équation (4) est attribuée au mathématicien et physicien Français J. B. Fourier qui en 1822 énonça sa loi et qui peut se traduire comme suit : «*En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantané, est proportionnelle à la conductivité thermique du milieu et au gradient de température*»

La forme vectorielle de cette loi qui exprime la densité de flux thermique est définie comme étant la quantité de chaleur transmise par unité de surface, soit :

$$\vec{\varphi} = -k \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad 5$$

Remarque

Par convention, $\vec{\varphi}$ est compté positivement dans le sens d'écoulement de la chaleur, c'est-à-dire vers les températures décroissantes. $\overrightarrow{\text{grad}T}$ est un vecteur porté par le même axe mais de sens contraire à $\vec{\varphi}$ (de petites valeurs vers les grandes valeurs) d'où le signe négatif de la loi de Fourier.

Interprétation mathématique

La densité de flux thermique est donnée par :

$$\varphi = \frac{\phi}{s} = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \quad 6$$

Pour un élément infinitésimal (ds), cette dernière relation s'écrit :

$$\varphi = k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad 7$$

Pour écrire l'équation de la conduction de la chaleur sous une forme mathématique nous devons adopter un signe conventionnel selon le sens du flux thermique (par exemple : $T_1 > T_2$, $T_1 \rightarrow T_2$).

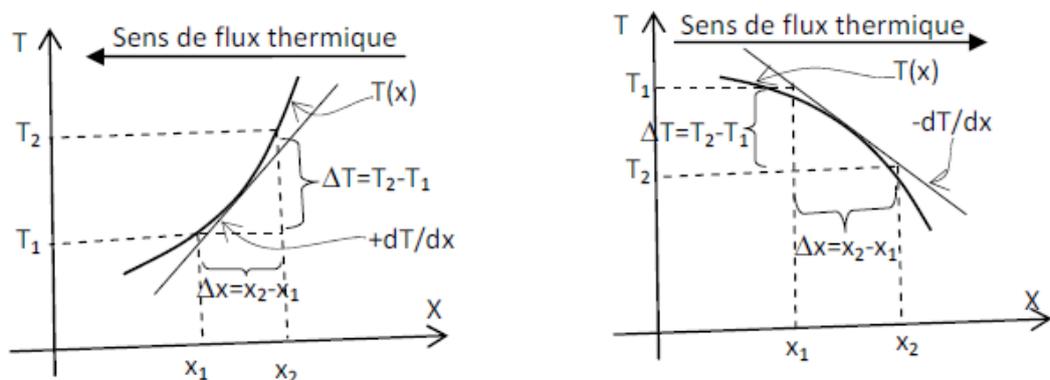


Figure 1 : Interprétation mathématique de la densité de flux thermique

– Comme le deuxième principe de la thermodynamique n'implique nécessairement, que la chaleur s'écoule des points les plus chauds vers les points les plus froids, le flux thermique serait donc, positif lorsque le gradient de température ($\frac{\partial T}{\partial x}$) est négatif.

– On remarque de la figure (Fig.1) que: $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = -\frac{dT}{dx}$; $T_1 > T_2$ pour que le flux soit positif, l'équation (4) s'écrit avec un signe négatif : $q = -k \cdot s \cdot \frac{dT}{dx}$

$\frac{\partial T}{\partial x}$: Le gradient de la température dans la section, c'est-à-dire, le rapport de la variation de température à la distance parcouru par le flux thermique.

– De l'équation (5):

$$\varphi = -k \cdot \frac{dT}{dx} \Leftrightarrow - \int_{T_1}^{T_2} k \cdot dT = \int_{x_1}^{x_2} \varphi dx \Leftrightarrow \varphi \cdot (x_2 - x_1) = -k \cdot (T_2 - T_1) = k \cdot (T_1 - T_2)$$

Loi fondamentale de la convection (loi de I. Newton)

La loi fondamentale de la convection est la loi d'**Isaac Newton (1643-1727)**, traduite par la relation expérimentale de flux de chaleur échangé par convection entre un fluide et une paroi solide.

$$\Phi = h \cdot s \cdot (T_{chaud} - T_{froid}) \quad 8$$

$$h = k_{fluide} / \delta$$

Tels que ;

δ : représente l'épaisseur d'un film mince du fluide adhérent à la paroi solide;

K_{fluide} : la conductivité thermique du fluide

h : représente le coefficient du transfert de chaleur par convection ; [W/m².K] ou [kcal/h.m².C].

Loi fondamentale du rayonnement (loi de Stefan-Boltzmann)

Le flux de chaleur rayonné par un milieu de surface (S) et de température (T) s'exprime grâce à la loi de **Joseph Stefan (1835-1893) et Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)**.

$$\Phi_{emis} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad 9$$

Tels que ;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 4.92 \cdot 10^{-8}$ kcal/h.m².K

ε : L'émissivité de la surface sans unité et T en [K].

Remarques générales

- L'équation (3) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$\Phi = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{k \cdot s}}$$

Tel que ;

$R_{th} = \frac{e}{k.s}$, représente **la résistance thermique** que le matériau oppose à l'écoulement de la chaleur par conduction.

- L'inverse de la résistance thermique représente **la conductance thermique** et désignée par : $k_{th} = \frac{k.s}{e}$
- $\frac{k}{e}$: représente la conductance thermique par unité de surface et est appelé l'unité de conductance thermique pour l'écoulement de la chaleur par conduction.
- En convection, la résistance thermique de transfert de chaleur, et qui représente l'inverse de la conductance thermique par convection est donnée par : $R_{th} = \frac{1}{h.s}$
- h : représente aussi, l'unité de conductance thermique moyenne de convection, le coefficient superficiel de transmission de la chaleur par convection ou le coefficient d'échange de chaleur par convection.