Transfert d'énergie par conduction thermique

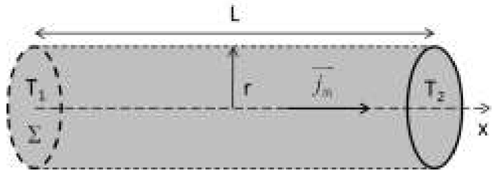
Les différents modes de transferts thermiques

Conduction thermique (ou diffusion thermique) : mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu se réalisant **sans déplacement global de la matière** (due à l'**agitation thermique** des atomes et molécules du milieu).

Convection thermique : attribuée à un déplacement global de matière et concerne les liquides ou les gaz (naturelle ou forcée).

Rayonnement thermique : ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel (ex : entre le Soleil et la Terre sous forme d'ondes électromagnétiques).

Vecteur densité de flux thermique



Hypothèses : conduction thermique dans un solide (de longueur L et de surface transversale $\Sigma = \pi r^2$) dans le cas d'un problème unidimensionnel selon (Ox).

Définition :

Flux thermique $\Phi(x,t)$ ou puissance thermique (en W) : quantité d'énergie élémentaire $\delta Q(x,t)$, aussi appelée transfert thermique, qui traverse la surface Σ par unité de temps.

$$\boxed{\Phi(x,t) = \frac{\delta Q(x,t)}{dt}}$$

Vecteur densité de flux thermique (en W.m^{-2}) : sa direction est celle du déplacement de proche en proche de l'énergie thermique et sa norme est d'autant plus grande que la quantité d'énergie déplacée est grande.

$$\boxed{j_{th}(x,t) = \frac{\Phi(x,t)}{\Sigma}}$$

Remarque : En 3D : $\Phi = \iint_\Sigma \overrightarrow{J_{th}} \cdot \overrightarrow{dS}$

Loi de Fourier (loi phénoménologique, 1822) :

Elle lie la température à l'intérieur du solide $T(x,t)$ et la densité de flux thermique à l'aide d'un coefficient de proportionnalité λ appelé **conductivité thermique** (W.m^{-1}.K^{-1}).

$$\boxed{j_{th}(x,t) = -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)}$$

En 3D :

$$\boxed{\overrightarrow{J_{th}} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T)}$$

Remarques :

$\lambda > 0$

Le signe moins traduit l'orientation du vecteur densité de flux thermique vers les basses températures.

On définit le gradient en coordonnées cartésiennes par : $\overrightarrow{grad}(T) = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\overrightarrow{u_x} + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)\overrightarrow{u_y} + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)\overrightarrow{u_z}$

Équation de la chaleur

Solide homogène de masse volumique μ, de conductivité thermique λ et de capacité thermique massique c

Bilan enthalpique : $\frac{\partial j_{th}}{\partial x} + c\mu\frac{\partial T}{\partial t} = 0$

Equation de la diffusion thermique :

$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{c\mu}{\lambda}\frac{\partial T}{\partial t} = 0}$$

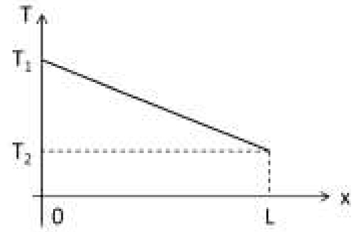
Remarques :

Coefficient de diffusion : $D = \frac{\lambda}{\mu c}$ de dimension : $\frac{[longueur]^2}{[temps]}$. Donc $\tau \sim \frac{L^2}{D}$

Propriété :

Un phénomène de diffusion thermique est **irréversible**. Il s'accompagne de production d'entropie.

Cas du régime stationnaire



Régime stationnaire : la température ne dépend plus du temps

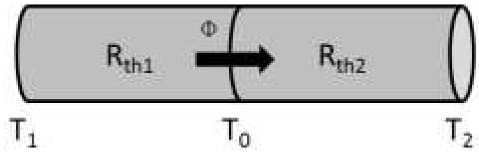
$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad T(x) = \frac{T_2 - T_1}{L} x + T_1 \quad \Rightarrow \quad \Phi = j_{th}\Sigma = \lambda\Sigma \frac{T_1 - T_2}{L}$$

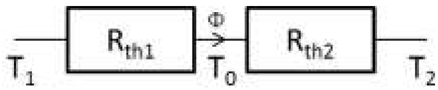
On remarque que le flux thermique est constant.

Définition : résistance thermique R_{th} (en K.W^{-1})

$$\boxed{R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} = \frac{L}{\lambda S}}$$

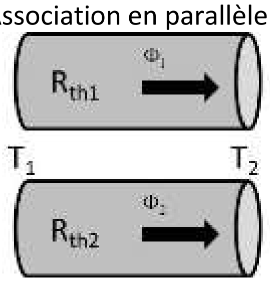
Association en série

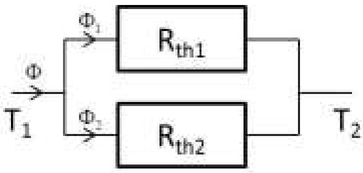




$$R_{th1+2} = R_{th1} + R_{th2}$$

Association en parallèle





$$R_{th1\|2} = \frac{R_{th1}R_{th2}}{R_{th1} + R_{th2}}$$

Analogie :

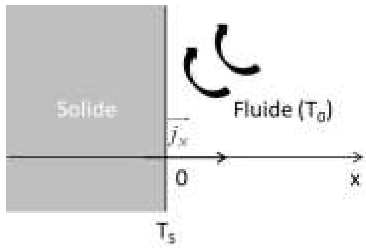
Electrique	**Thermique**
Potentiel V	Température T
Courant I	Flux thermique Φ
Conductivité électrique σ	Conductivité thermique λ
Loi d'Ohm locale $\vec{j} = -\sigma\overrightarrow{grad}V \quad ou \quad \vec{j} = \sigma\vec{E}$	Loi de Fourier $\overrightarrow{j_{th}} = -\lambda\overrightarrow{grad}T$

Transfert conducto-convectif

Matériau étudié en contact avec un milieu extérieur fluide de température T_0, animé de mouvements de convection

Loi de Newton :

La densité de flux thermique sortant à travers la surface du solide en contact avec le fluide est proportionnelle à l'écart entre la température T_S de la surface du solide et la température T_0 du fluide :



$$\boxed{j_N = h(T_S - T_0)}$$

h : **coefficient de transfert thermique de surface** (W.m^{-2}.K^{-1})

Résistance thermique : $R_N = \frac{T_S - T_0}{\Phi_N} = \frac{1}{hS}$