

Transferts thermiques 1

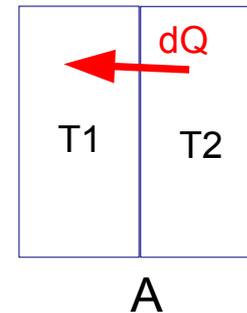
- Introduction.
- Modes de transmission de la chaleur
- Conduction thermique. Loi de Fourier.
- Conductivité thermique
- Resistance thermique. Coefficient de transfert thermique
- La convection. Loi de Newton

Transferts thermiques

Lorsque deux points dans l'espace sont à des températures différentes , il y a systématiquement **transfert de chaleur toujours vers le corps froid**.
C'est une conséquence directe du deuxième principe de la thermodynamique

$$dS = dS_1 + dS_2$$
$$dS = \frac{dQ}{T_1} + \frac{-dQ}{T_2} = dQ \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$
$$dS = dQ \frac{(T_2 - T_1)}{T_1 T_2}$$

$$dS > 0 \Rightarrow T_2 > T_1$$



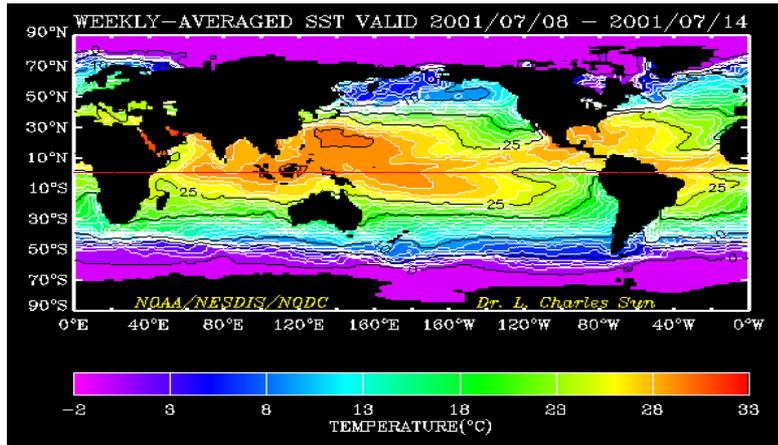
Corolaire : la connaissance de la distribution de températures dans les corps (appelée aussi *champ de températures*) doit permettre l'obtention des flux de chaleur.

Flux de chaleur : est un débit de chaleur $\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ Unités : J/s ou W

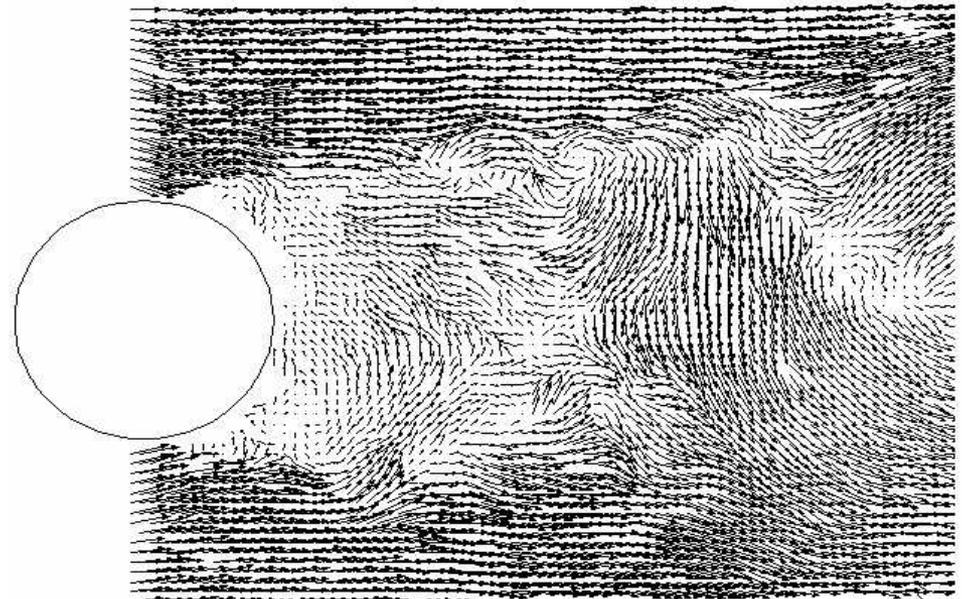
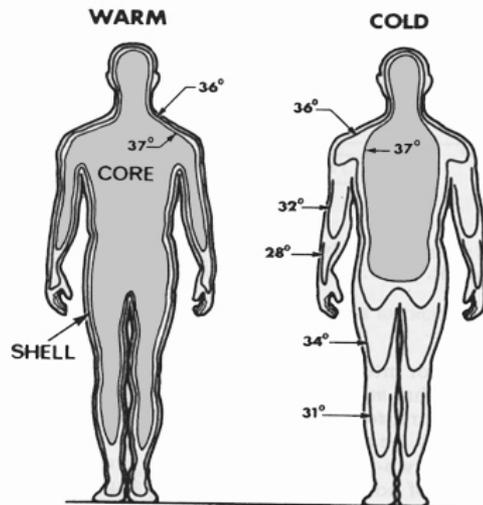
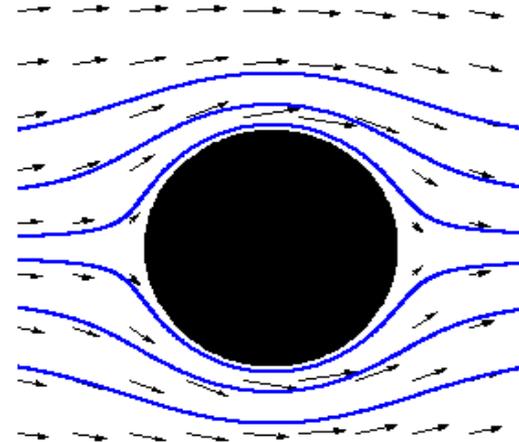
Densité de flux thermique : $q = \frac{\dot{Q}}{A}$ Unités : W m⁻²

Champ de températures : un champ scalaire

Champ scalaire

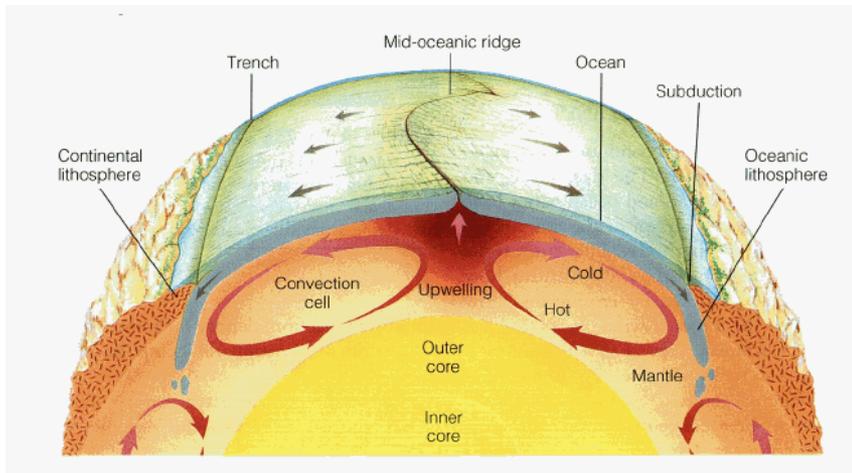


Champ vectoriel

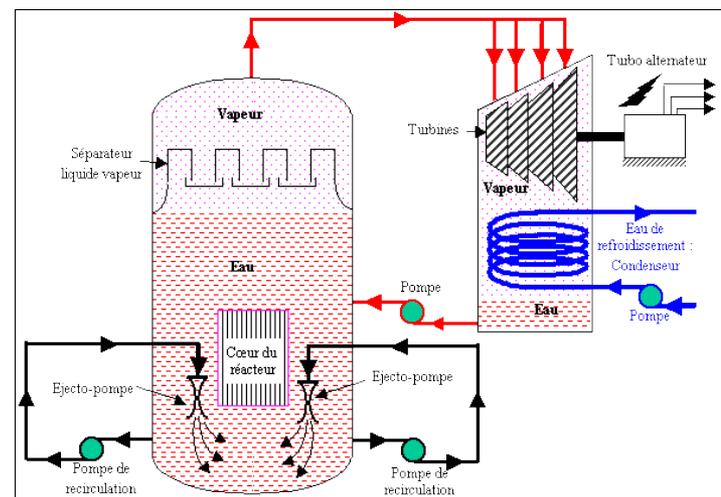
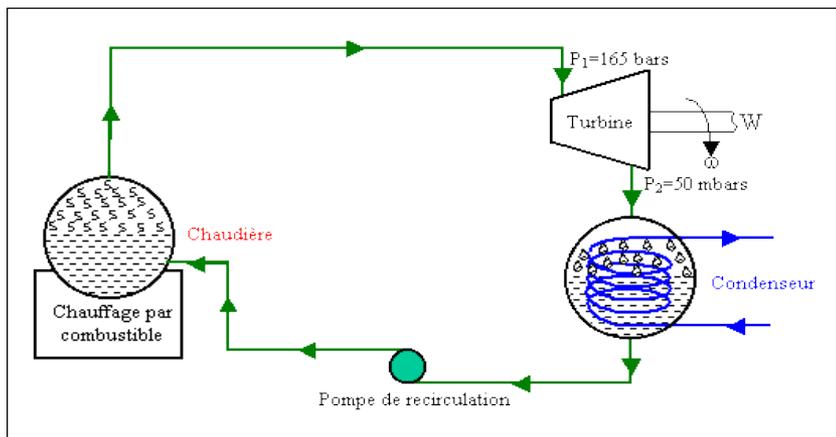


Importance des transferts thermiques

- Le transfert thermique intervient **dès qu'il existe une différence de température** dans un système : il est difficile de trouver une activité humaine où n'intervient pas un échange de chaleur.
- Exemples d'application: chauffage centrale, production de vapeur, refroidissement moteur thermique, mise en température d'un réacteur, maintien de la température au cours d'une réaction, hauts-fourneaux (élaboration d'aciers, verres), isolation de bâtiments, refroidissement de composants électriques ou électroniques, biothermie, géothermie, etc, etc...



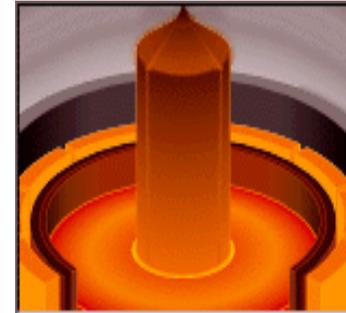
Transfert de chaleur dans les centrales thermiques et nucléaires



Les différents modes de transmission de la chaleur

On distingue 3 modes différents de transmission de la chaleur :

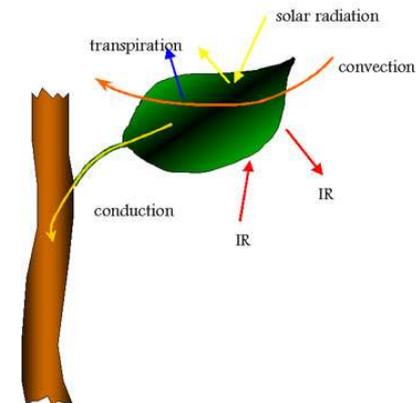
- **La conduction.** Transmission provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu en contact physique. Il n'y a pas de déplacement appréciable des atomes ou molécules.



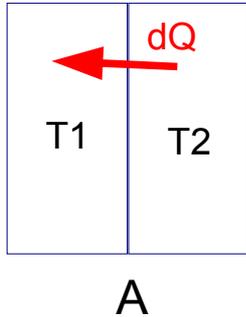
- **La convection.** Transmission provoquée par le déplacement d'un fluide (liquide ou gazeux).



- **Le rayonnement.** Transmission provoquée par la différence de température entre deux corps sans contact physique, mais séparés par un milieu transparent tel l'air ou le vide. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique.



La conduction thermique : la loi de Fourier



Dans le cas d'un champ de températures à une dimension:

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad \text{ou} \quad q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

A: surface perpendiculaire au flux thermique

λ : conductivité thermique du matériau

$\frac{dT}{dx}$ Le gradient de température au point x considéré, c'est à dire la variation de la température par unité de longueur dans la direction x

- Le signe moins : le flux de chaleur est positif quand la température diminue avec x.

Origine physique : la vibration des atomes dans les matériaux

La conductivité thermique

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{-\dot{Q}}{A \frac{dT}{dx}}$$

La conductivité thermique : flux de chaleur qui traverse une surface unitaire quand le gradient de température est égal à l'unité.

La conductivité thermique dépend de:

- La nature chimique du matériau
- La nature de la phase considérée (solide, liquide, gazeuse)
- La température
- L'orientation des fibres ou cristaux dans les corps anisotropes (bois, plastiques laminés, etc.)

Unités : $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

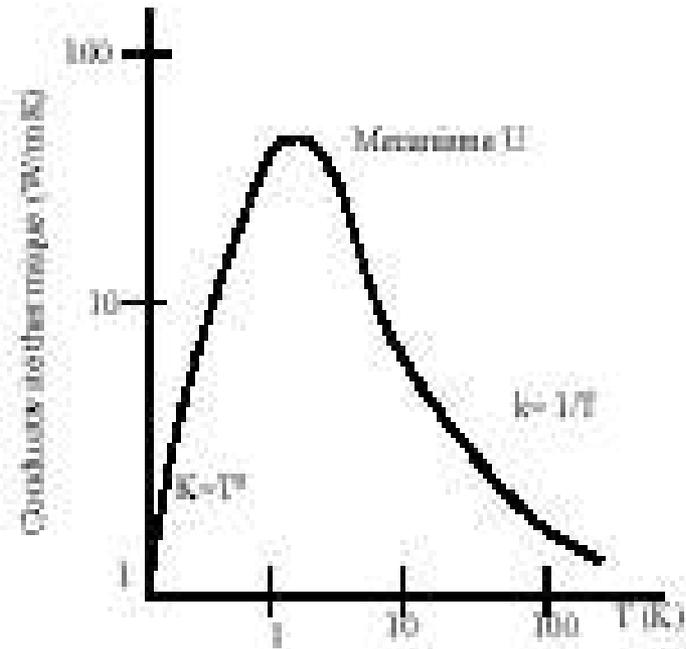
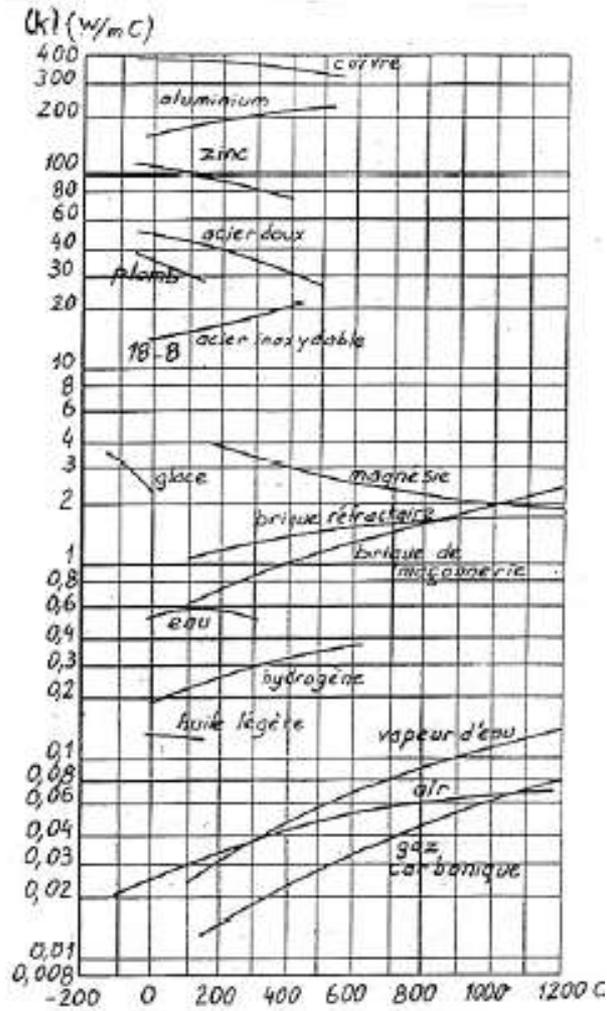
Ordre de grandeur de λ à 20 °C :

Matériaux	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Gaz à la pression atmosphérique	0.006 - 0.18
Matériaux isolants	0.025 - 0.25
Liquides non métalliques	0.1 - 1.0
Solides non métalliques	0.025 - 3.0
Liquides métalliques	8.5 - 85
Alliages métalliques	10 - 150
Métaux purs	20 - 400

L'air à température ambiante : $\lambda \approx 0.026$ W m⁻¹ K⁻¹

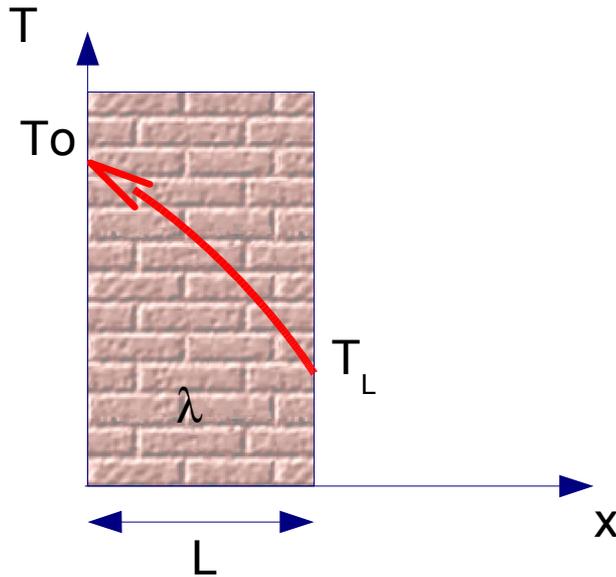
L'eau à température ambiante : $\lambda \approx 0.60$ W m⁻¹ K⁻¹

Variation de la conductivité avec la température



Résistance thermique

Conduction dans un mur de conductivité λ et épaisseur L en régime permanent



$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \rightarrow \frac{\dot{Q}}{A} dx = -\lambda dT$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} \int_0^L dx = -\int_{T_0}^{T_L} \lambda dT$$

$$\text{Si } \lambda \neq f(T) \Rightarrow \frac{\dot{Q}}{A} L = (T_0 - T_L) \lambda$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\frac{L}{A \lambda}} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \text{ avec } R_\lambda \equiv \frac{L}{A \lambda}$$

Résistance thermique: R_λ

Conductance thermique: $K_\lambda = 1/R_\lambda$

Conductance thermique spécifique (ou par unité de surface) : $k_\lambda = K_\lambda/A$

Résistance thermique spécifique (ou par unité de surface) : $r_\lambda = 1/k_\lambda = A R_\lambda$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} = K_\lambda \Delta T \quad \text{ou} \quad q = k_\lambda \Delta T = \frac{\Delta T}{r_\lambda}$$

Analogie électrique

Conduction électrique

Différence de potentiel ΔU

Courant électrique I

Résistance électrique R

Loi d'Ohm : $\Delta U = R I$

$$R = \frac{L}{A \sigma}$$

avec σ la conductivité électrique

Transfert thermique

Différence de température, ΔT

Flux de chaleur \dot{Q}

Résistance thermique R_λ

$$\Delta T = R_\lambda \dot{Q}$$

$$R_\lambda = \frac{L}{A \lambda}$$

avec λ la conductivité thermique

Résistance thermique

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \quad \text{avec} \quad R_\lambda = \frac{L}{A \lambda}$$

Définition plus générale:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\int_a^b \frac{dr}{A(r) \lambda}} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \quad \text{avec} \quad R_\lambda \equiv \int_a^b \frac{dr}{A(r) \lambda}$$

Pour un mur :

$$A = \text{cte} \Rightarrow R_\lambda = \frac{L}{A \lambda}$$

Pour un cylindre creux :

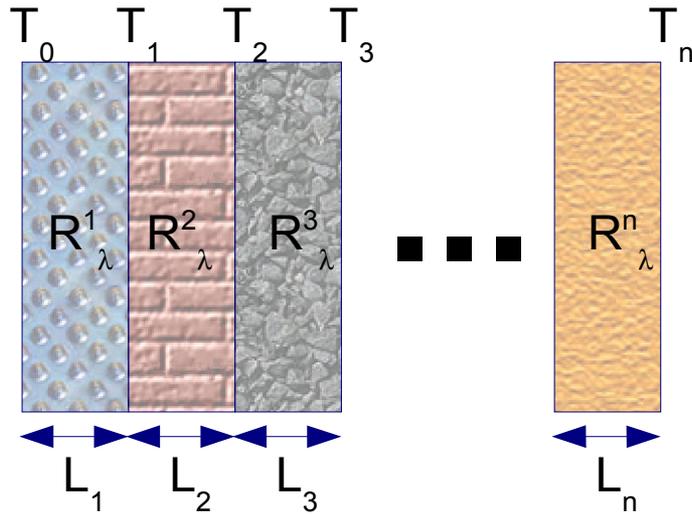
$$A(r) = 2 \pi r l \quad \text{et} \quad R_\lambda = \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{2 \pi \lambda r l} = \frac{1}{2 \pi \lambda l} \ln \left(\frac{r_b}{r_a} \right)$$

Pour une sphère creuse :

$$A(r) = 4 \pi r^2 \quad \text{et} \quad R_\lambda = \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{4 \pi \lambda r^2} = \frac{1}{4 \pi \lambda} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right)$$

Résistance thermique d'un mur composite : association en série

Soit un mur plan e dimensions pratiquement infinies, constitué de n couches de matériaux différents en série:



Pas de perte ou production de chaleur :
 \dot{Q} est identique dans tout le solide

$$\dot{Q} = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^1} \rightarrow T_0 - T_1 = \dot{Q} R_\lambda^1$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_\lambda^2} \rightarrow T_1 - T_2 = \dot{Q} R_\lambda^2$$

$$\dot{Q} = \frac{T_2 - T_3}{R_\lambda^3} \rightarrow T_2 - T_3 = \dot{Q} R_\lambda^3 \quad +$$

...

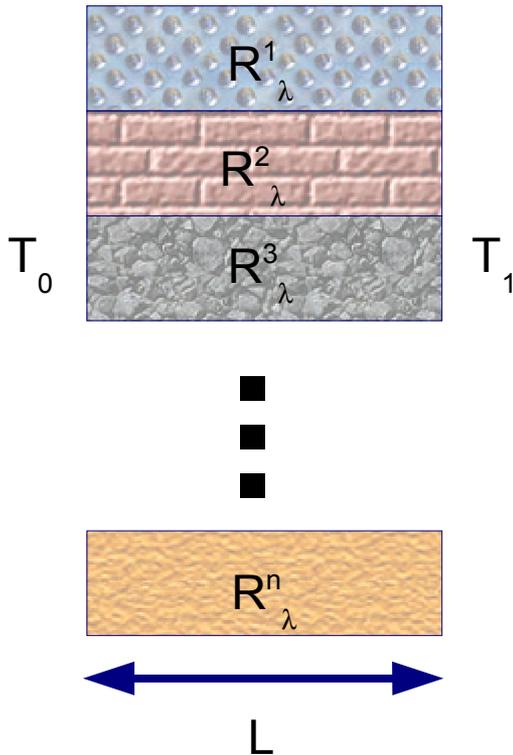
$$\dot{Q} = \frac{T_{n-1} - T_n}{R_\lambda^n} \rightarrow T_{n-1} - T_n = \dot{Q} R_\lambda^n$$

$$T_0 - T_n = \dot{Q} (R_\lambda^1 + R_\lambda^2 + R_\lambda^3 + \dots + R_\lambda^n)$$

$$T_0 - T_n = \dot{Q} (R_\lambda^{série}) \rightarrow \dot{Q} = \frac{T_0 - T_n}{R_\lambda^{série}} \text{ avec } R_\lambda^{série} = R_\lambda^1 + R_\lambda^2 + R_\lambda^3 + \dots + R_\lambda^n$$

Résistance thermique d'un mur composite : association en parallèle

Soit un mur plan e dimensions pratiquement infinies, constitué de n couches de matériaux différents en parallèle:



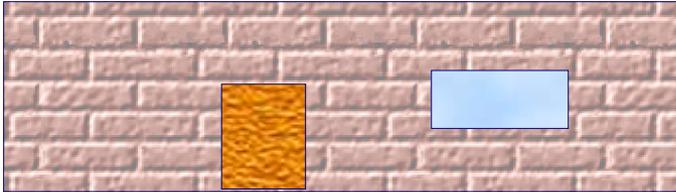
Pas de perte ou production de chaleur :

$$\dot{Q}_1 = \frac{T_0 - T_1}{R_{\lambda}^1} \quad \dot{Q}_2 = \frac{T_0 - T_1}{R_{\lambda}^2} \quad \dot{Q}_3 = \frac{T_0 - T_1}{R_{\lambda}^3} \quad \dots \quad \dot{Q}_n = \frac{T_0 - T_1}{R_{\lambda}^n}$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dots + \dot{Q}_n = T_0 - T_1 \left(\frac{1}{R_{\lambda}^1} + \frac{1}{R_{\lambda}^2} + \frac{1}{R_{\lambda}^3} + \dots + \frac{1}{R_{\lambda}^n} \right)$$

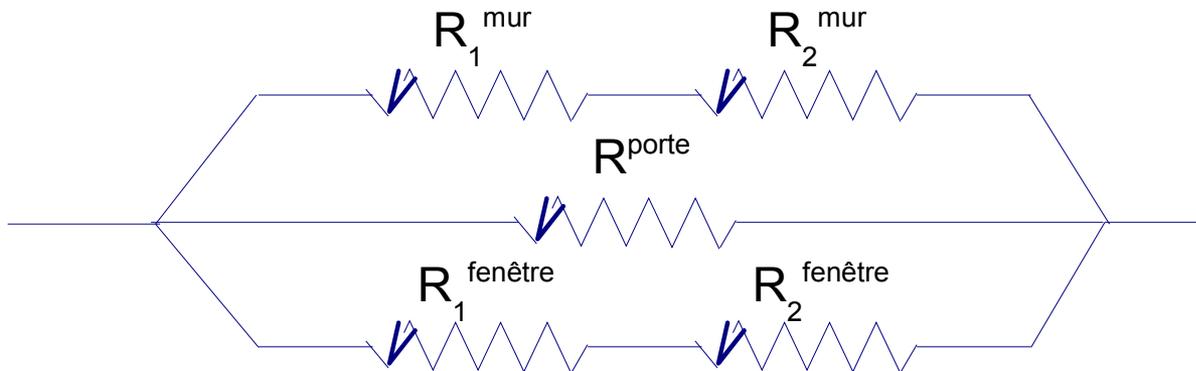
$$\text{donc } \dot{Q} = \frac{T_0 - T_1}{R_{\text{parallèle}}} \quad \text{avec } \frac{1}{R_{\text{parallèle}}} = \frac{1}{R_{\lambda}^1} + \frac{1}{R_{\lambda}^2} + \frac{1}{R_{\lambda}^3} + \dots + \frac{1}{R_{\lambda}^n}$$

Exemple d'application



Mur composite (brique + plâtre) avec une porte simple et une fenêtre à double vitrage.

Mur // porte // fenêtre



$$\frac{1}{R_{\text{equiv.}}} = \frac{1}{(R_1^{\text{mur}} + R_2^{\text{mur}})} + \frac{1}{R_1^{\text{porte}}} + \frac{1}{(R_1^{\text{fenêtre}} + R_2^{\text{fenêtre}})}$$

Coefficient de transfert thermique d'un corps

Le coefficient de transfert h de chaleur d'un corps de surface A et de température T_1 à un corps de température T_2 est défini par la relation:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &\equiv hA(T_1 - T_2) \\ \dot{Q} &= \frac{(T_1 - T_2)}{R_\lambda} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} h &= \frac{1}{AR_\lambda} \\ R_\lambda &= \frac{L}{\lambda A} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad h = \frac{\lambda}{L}$$

Coefficient de transfert thermique d'un mur composite

$$R_\lambda^{série} = R_\lambda^1 + R_\lambda^2 + R_\lambda^3 + \dots + R_\lambda^n \qquad \frac{1}{h_{série}} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \dots + \frac{1}{h_n}$$

$$\frac{1}{R_{parallèle}} = \frac{1}{R_\lambda^1} + \frac{1}{R_\lambda^2} + \frac{1}{R_\lambda^3} + \dots + \frac{1}{R_\lambda^n} \qquad h_{parallèle} = h_1 + h_2 + \dots + h_n$$