Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène

Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés
Filière Génie des Procédés (GP)
3ème année LMD :
Génie Chimique
Froid & Cryogénie
Raffinage & Pétrochimie
Génie de l’Environnement

Transfert Thermique

2012/2013

Fait par : M. Y.K. BENKAHLA

Transfert Thermique

I. Généralités sur le transfert thermique

II. Transfert thermique par conduction

III. Résistance au transfert : La convection thermique

IV. Echangeurs thermiques

V Transfert thermique par rayonnement

Transfert Thermique

Programme :

I. Généralités sur le transfert thermique
- I.1 Introduction
- I.2 Champ de température et gradient de température
- I.3 Flux thermique et densité de flux thermique
- I.4 Modes de transmission thermique

II. Transfert thermique par conduction
- II.1 Conduction thermique : Loi de Fourier
- II.2 Conservation de l’énergie : Équation de l’énergie
- II.3 Ecoulement stationnaire de chaleur par conduction
- II.4 *Pas de résistance au transfert*
  - *a) Mur plan*
  - *b) Mur composite multicouches*
  - *c) Conduite cylindrique creuse*
  - *d) Conduite gainée multicouches*
  - *e) Sphère creuse*

III. Résistance au transfert : La convection thermique
- III.1 Conductances partielles et globales de transfert par convection
- III.2 Conduite cylindrique recouverte d'un manchon isolant
- III.3 Epaisseur critique d'isolation
- III.4 Détermination du coefficient thermique de convection

IV. Echangeurs thermiques
- IV.1 Description des principaux types d'échangeurs thermiques
  - *a) Echangeurs double tube*
  - *b) Echangeurs à faisceau et calandre*
  - *c) Echangeurs à plaques*
  - *d) Echangeurs refroidis par une circulation forcée d'air*
- IV.2 Calcul des échangeurs tubulaires
  - *a) Modes de fonctionnement des échangeurs*
  - *b) Dimensionnement d'un échangeur de chaleur*
  - *c) Etude du transfert thermique*
  - *d) Différence de température moyenne*
  - *e) Coefficient de transfert thermique global*
  - *f) Pertes de charge*

V Transfert thermique par rayonnement
- V.1 Introduction
- V.2 Lois du rayonnement
- V.3 Brillance et Corps noir

II.3 Ecoulement stationnaire de chaleur

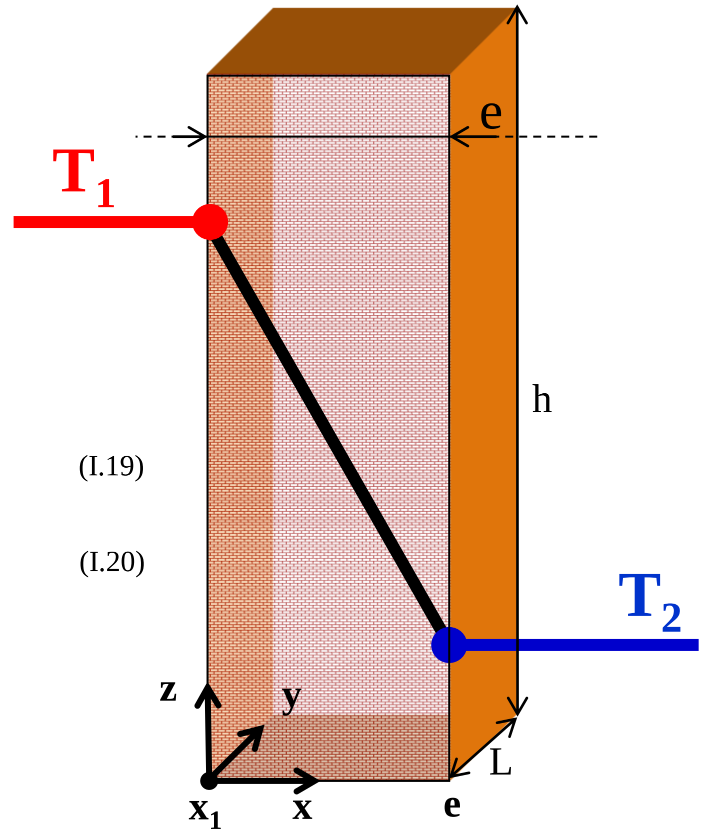
a) Mur plan (L et h >> e)

$$\left(\partial^2 T/\partial x_i^2\right)=0 \qquad \text{(V.11)}$$

$$\frac{dT}{dx}=Cte$$

- Conditions aux limites
- Ecoulement unidirectionnel de chaleur : T = T(x) et unidirectionnel : $q = q_x$
- k = Cte.

Deux cas peuvent se présenter : ***Pas de résistance au transfert***



$$\rho\, C_p \frac{dT}{dt} = \begin{cases} \dfrac{\partial q_i}{\partial x_i} \\ k\,\Delta T \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \dfrac{\partial q_x}{\partial x}+\cancel{\dfrac{\partial q_y}{\partial y}}+\cancel{\dfrac{\partial q_z}{\partial z}}=0 \\ k\left[\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\cancel{\dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2}}+\cancel{\dfrac{\partial^2 T}{\partial z^2}}\right]=0 \end{cases} \qquad \begin{cases} q_x \equiv q = Cte \\ \dfrac{dT(x)}{dx}=Cte \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} q=-k\dfrac{dT}{dx} & \text{(I.19)} \\ T(x)=a\,x+b & \text{(I.20)} \end{cases}$$

$$q\int_{x_1=0}^{x_2=e} dx = -k\int_{T_1}^{T_2} dT$$

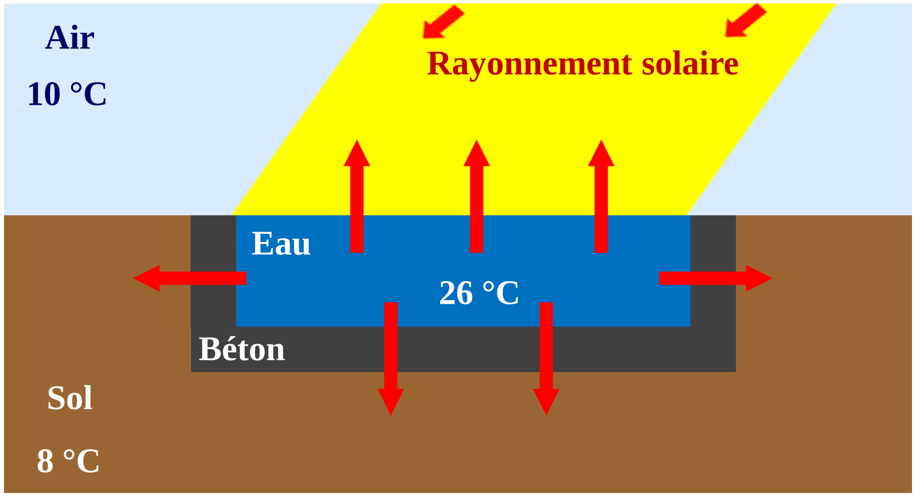
$$q = k\frac{(T_1-T_2)}{e}=\frac{\dot q}{S}$$

Surface orthogonale au flux thermique : S = L h

$$T(x)=T_1-(T_1-T_2)\frac{(x-x_1)}{e} \qquad \text{(V.12)}$$

$$\dot q = \frac{(T_1-T_2)}{(e/kS)}=\frac{\Delta T}{\mathcal{R}_{cd}^{mur}} \qquad \text{(V.13)}$$

Exemple 1 : Déperditions d'une piscine

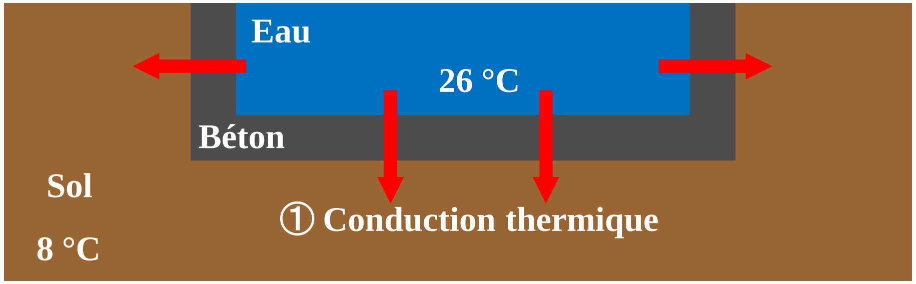


Eau de la piscine : 10 °C
Sol : 08 °C
Air : 10 °C

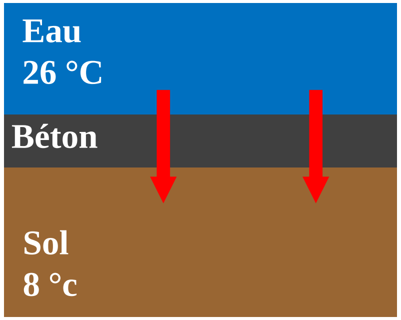
1. Cause du phénomène de transfert : écart de température (force motrice).
   $\Delta T_1 = 18\ °C$
   $\Delta T_2 = 16\ °C$

2. Milieu de propagation du flux thermique :
   Solide : béton
   Fluide : air

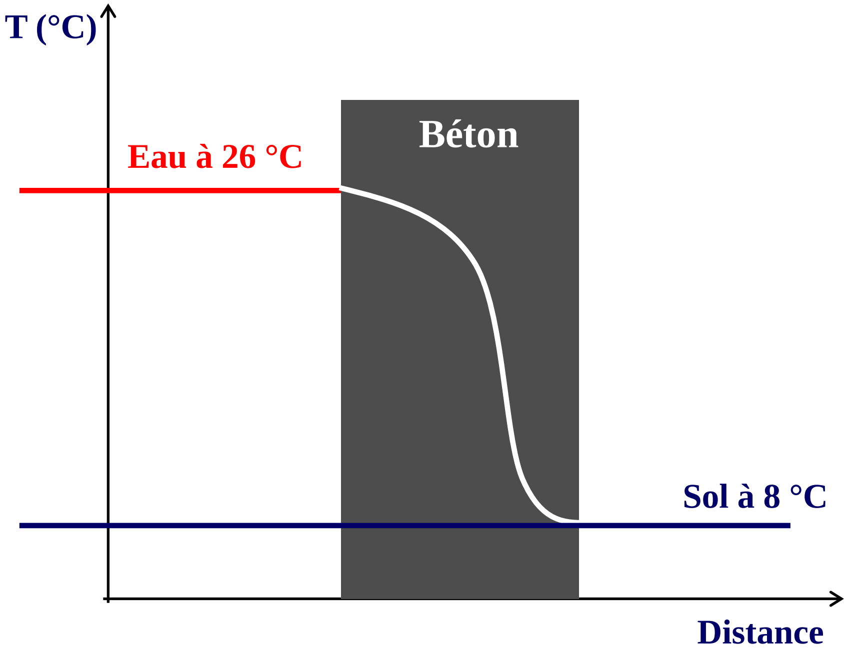
II. Transfert thermique par conduction



Milieu de propagation du flux thermique : Solide (la couche de béton).



Dans le béton, la température T(M) varie de 26 °C au contact de l'eau, à 8 °C au contact du sol.

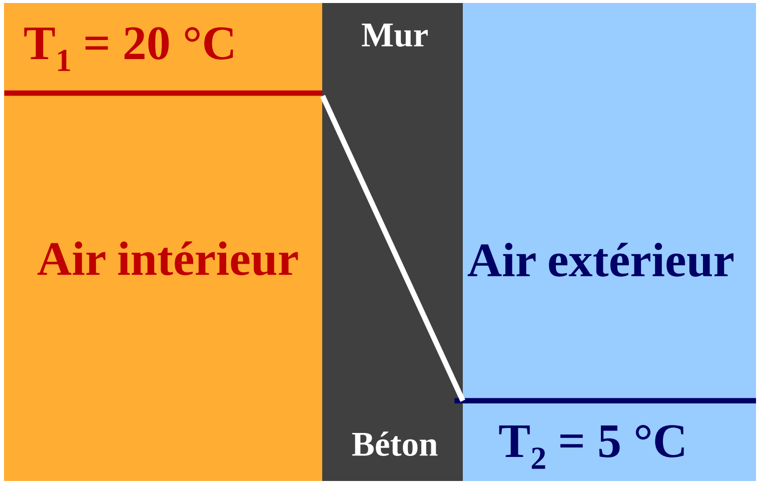


Il existe donc une fonction
de variation de la température :

$$T = T(M)$$

dans le milieu conduisant la chaleur

Exemple 2 : Déperditions d’une chambre



L'écart de température (T_1 - T_2) provoque une densité de flux de thermique à travers le mur :

$$q = k\frac{(T_1 - T_2)}{e}$$

Données :

Ecart de température: (T_1 - T_2) = 15°C

Epaisseur du mur : e = 0,20 m

Conductivité thermique du béton : k = 0,92 W / (m K)

But :

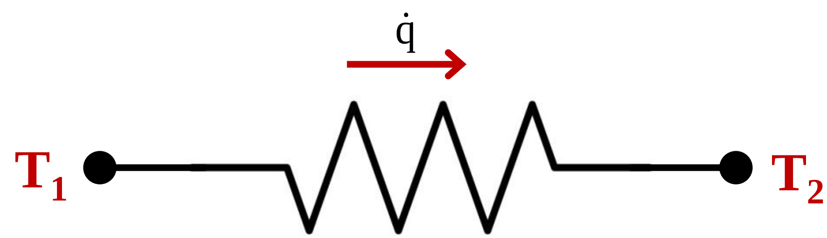
Densité de flux thermique à travers le mur : **ϕ = 69 W/m²**

Puissance pour S = 5 m x 4 m = 20 m², **φ = ϕ S = 1,38 kW**

Analogie électrique

$$\dot{q} = \frac{(T_1 - T_2)}{(e/kS)} = \frac{\Delta T}{\mathfrak{R}_{cd}^{mur}}$$

Cette relation est analogue à la loi d’Ohm en électricité qui définit l’intensité du courant comme le rapport de la différence de potentiel électrique sur la résistance électrique. La température apparaît ainsi comme un ***potentiel thermique*** et le terme (e / k S) apparaît comme la ***résistance thermique de conduction*** $\mathfrak{R}$ d’un mur plan d’épaisseur e, de conductivité thermique k et de surface latérale S. On se ramène donc au schéma équivalent représenté sur la figure ci-dessous :



$$\mathfrak{R} = (e/kS)$$

Figure : Schéma électrique équivalent d’un mur simple.

Analogie électrique

Conduction électrique

Différence de potentiel ΔU

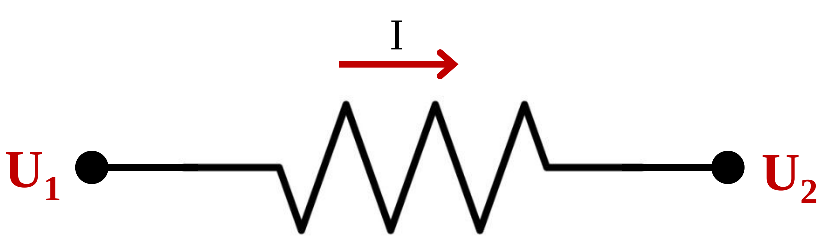
Courant électrique I

Résistance électrique R

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

$$R = \frac{e}{\sigma S}$$

Conductivité électrique



$R = (e/\sigma S)$

Transfert thermique

Différence de température ΔT

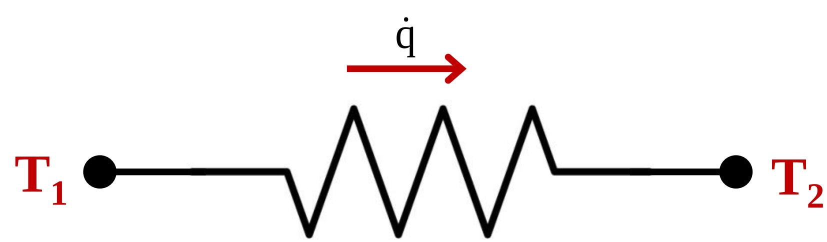
Densité de flux thermique $\dot{q}$

Résistance thermique $\mathfrak{R}_k$

$\Delta T = \mathfrak{R}\,\dot{q}$

$$\mathfrak{R} = \frac{e}{k S}$$

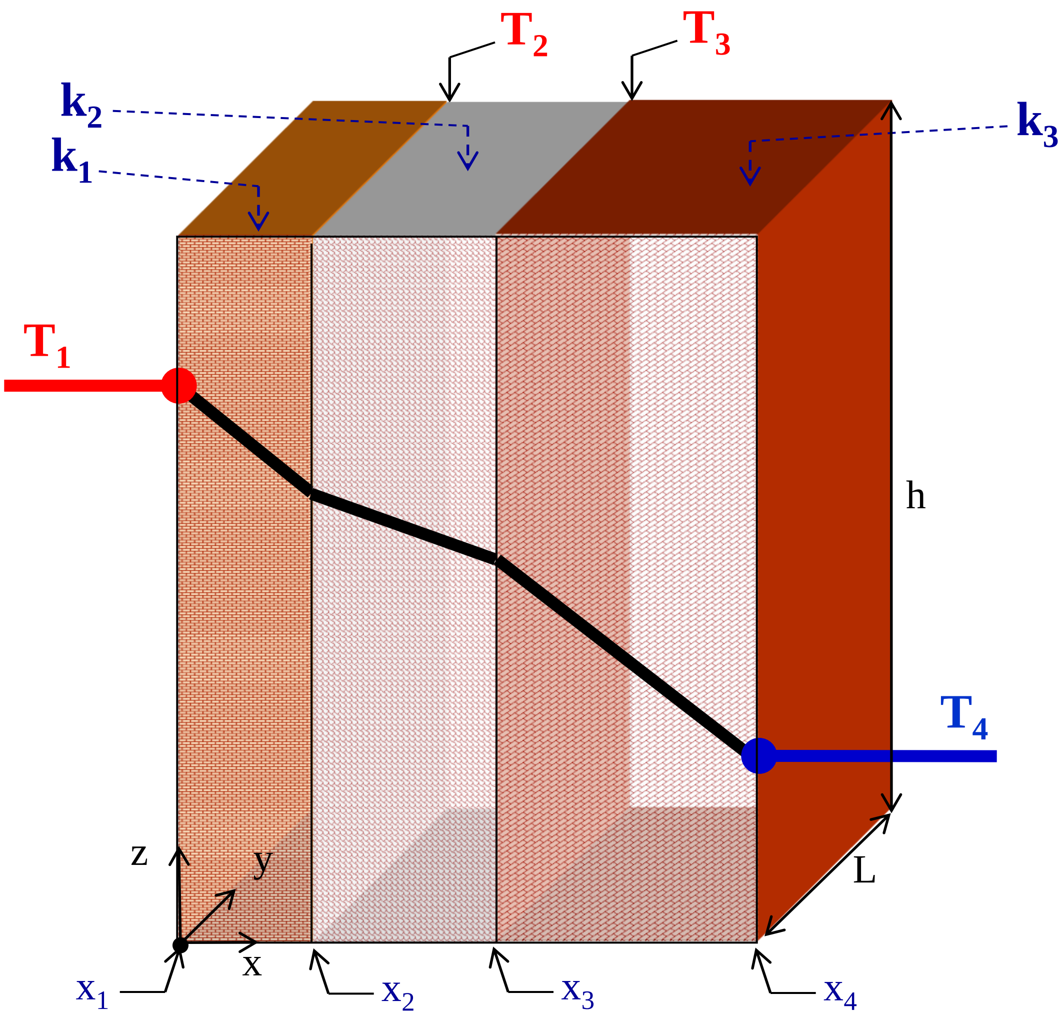
Conductivité thermique



$\mathfrak{R} = (e/k\,S)$

II. Transfert thermique par conduction

b) Mur composite multicouches



$$(T_1 - T_2) = \frac{\dot{q}}{(k_1 S/e_1)}$$

$$\oplus$$

$$(T_2 - T_3) = \frac{\dot{q}}{(k_2 S/e_2)}$$

$$\oplus$$

$$(T_3 - T_4) = \frac{\dot{q}}{(k_3 S/e_3)}$$

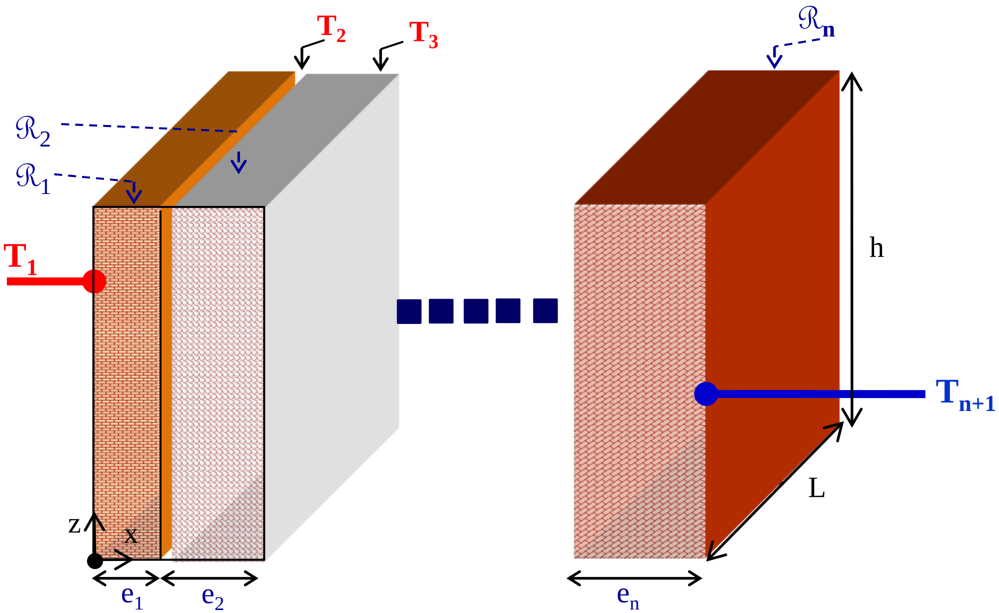
$$\dot{q} = \frac{(T_1 - T_4)}{\left[\left(\frac{e_1}{k_1 S}\right) + \left(\frac{e_2}{k_2 S}\right) + \left(\frac{e_3}{k_3 S}\right)\right]} \quad \text{(V.15)}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{\sum_i (e_i / k_i S)} = \frac{\Delta T}{\sum_i \left(\mathfrak{R}_{cd}^{mur}\right)_i} \quad \text{(V.16)}$$

Remarque : On vérifiera aisément que les différentes valeurs de $\mathfrak{R}$ correspondent à des résistances thermiques qui, placées en série, s'additionnent comme les résistances électriques.

II. Transfert thermique par conduction

Généralisation : association en série



$$(T_1 - T_2) = \frac{\dot{q}}{(k_1\, S/e_1)} \quad \oplus$$

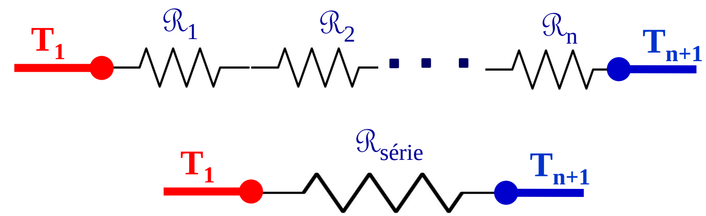
$$(T_2 - T_3) = \frac{\dot{q}}{(k_2\, S/e_2)}$$

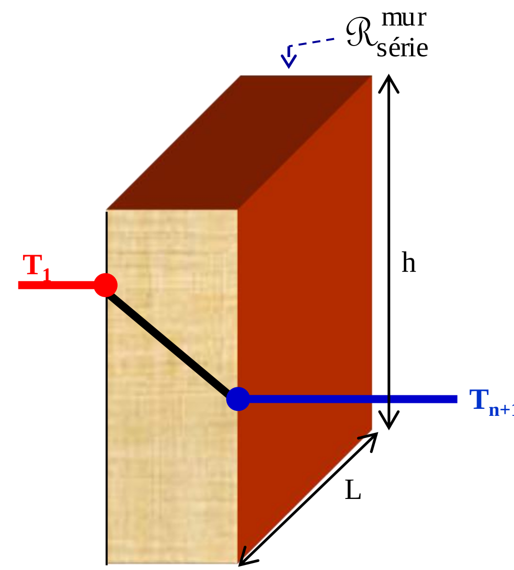
$$\vdots \qquad \vdots \qquad \oplus$$

$$(T_n - T_{n+1}) = \frac{\dot{q}}{(k_n\, S/e_n)}$$

$$\dot{q} = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\left[\left(\frac{e_1}{k_1\, S}\right) + \left(\frac{e_2}{k_2\, S}\right) + \ldots + \left(\frac{e_n}{k_n\, S}\right)\right]}$$

Analogie électrique :





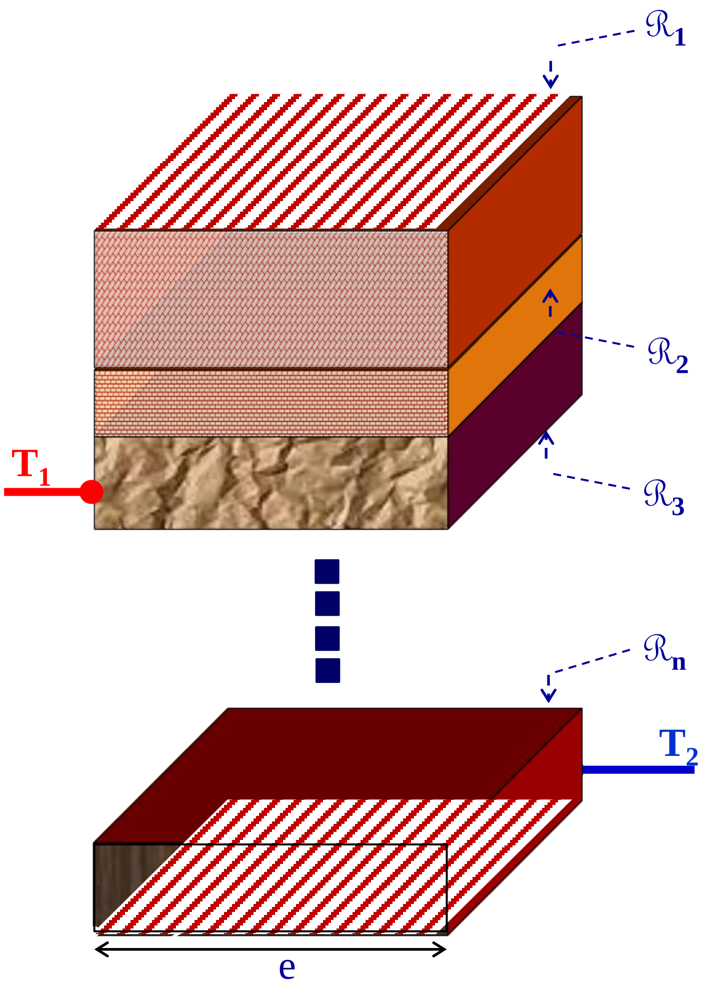
$$\Delta T = \mathcal{R}^{mur}_{série}\ \dot{q}$$

$$\mathcal{R}^{mur}_{série} = \mathcal{R}^{mur1}_{cd} + \mathcal{R}^{mur2}_{cd} + \ldots. + \mathcal{R}^{murn}_{cd}$$

$$\underbrace{(T_1 - T_{n+1})}_{\Delta T} = \dot{q} \sum_{i=1}^{i-n} \left(\frac{e_i}{k_i\, S}\right)$$

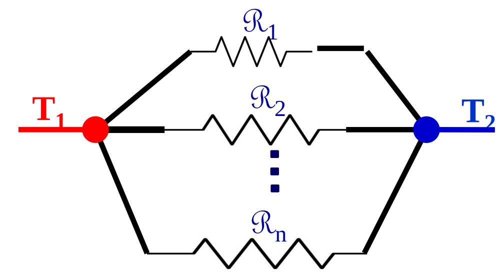
Résistance thermique d'un mur composite : association en parallèle

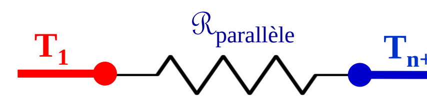
Soit un mur plan, constitué de n couches de matériaux différents, placées en parallèle. Une isolation est placée sur les deux faces externes de l'empilement :



$$\left.\begin{aligned}
\dot{q}_1 &= \frac{(T_1 - T_2)}{(e/k_1 S_1)} \\
\dot{q}_2 &= \frac{(T_1 - T_2)}{(e/k_2 S_2)} \\
\dot{q}_3 &= \frac{(T_1 - T_2)}{(e/k_3 S_3)} \\
&\vdots \\
\dot{q}_n &= \frac{(T_1 - T_2)}{(e/k_n S_n)}
\end{aligned}\right\}$$

Analogie électrique :





$$\dot{q} = \sum_i \dot{q}_i = (T_1 - T_2)\left[\frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \frac{1}{\mathcal{R}_3} + \ldots + \frac{1}{\mathcal{R}_n}\right]$$

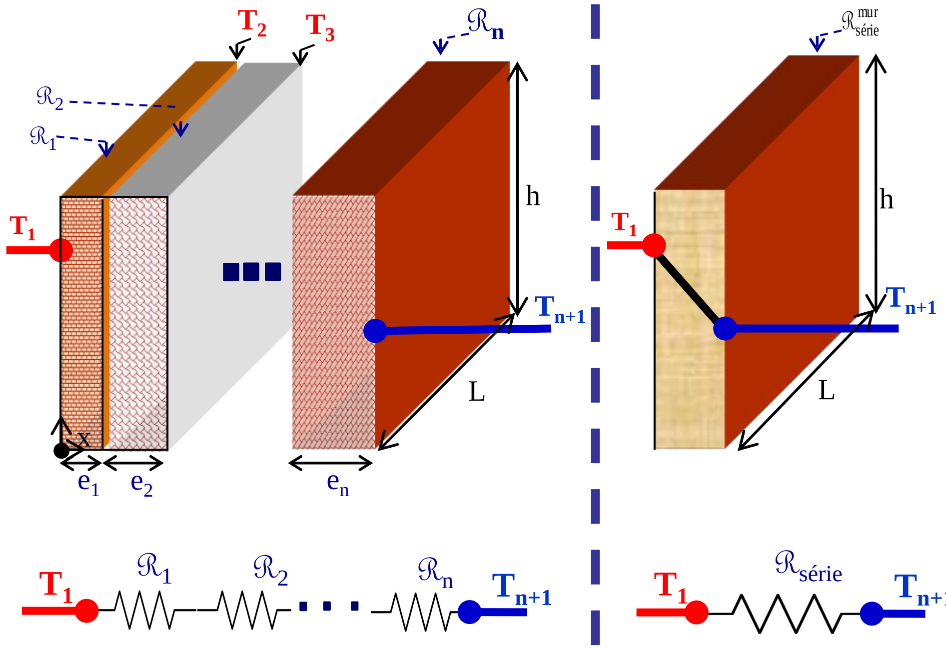
$$\Downarrow$$

$$\dot{q} = \frac{(T_1 - T_2)}{\mathcal{R}_{\text{parallèle}}}$$

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{\text{parallèle}}} = \left[\frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \frac{1}{\mathcal{R}_3} + \ldots + \frac{1}{\mathcal{R}_n}\right]$$

II. Transfert thermique par conduction

Analogie électrique

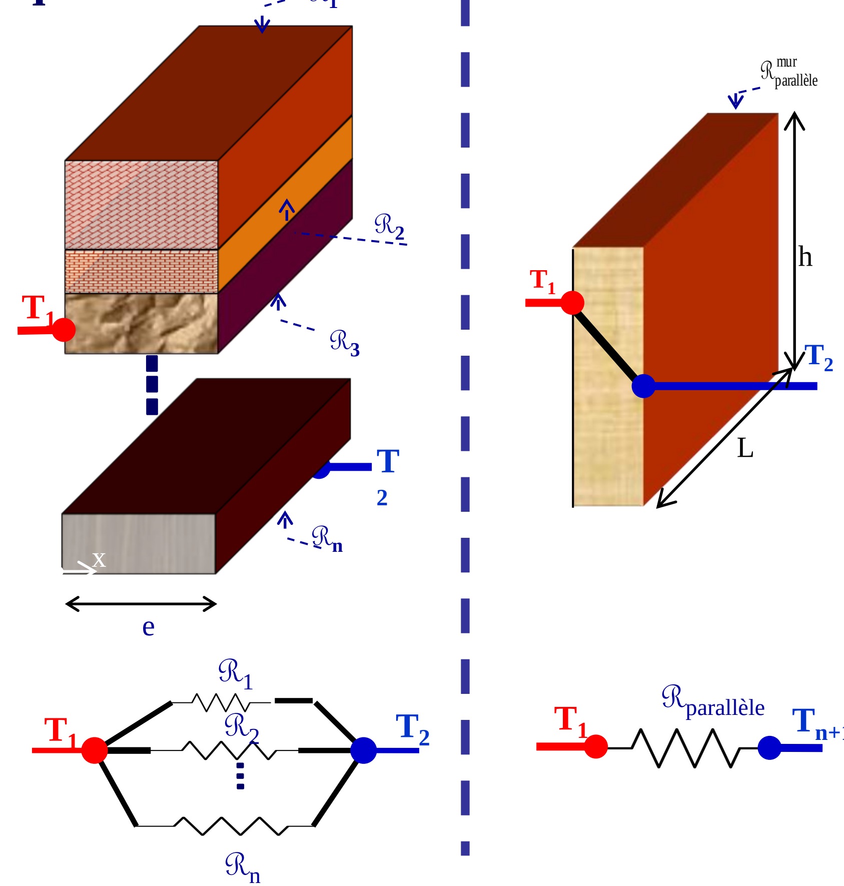


$$\Delta T = \mathcal{R}^{mur}_{série}\ \dot{q}$$

$$\mathcal{R}^{mur}_{série} = \mathcal{R}^{mur1}_{cd} + \mathcal{R}^{mur2}_{cd} + \ldots + \mathcal{R}^{mur\,n}_{cd}$$

$$\underbrace{(T_1 - T_{n+1})}_{\Delta T} = \dot{q} \sum_{i=1}^{i-n} \left(\frac{e_i}{k_i\, S} \right)$$

Conclusion : Ainsi lorsque les murs sont en **série**, la résistance thermique équivalente est égale à la somme des résistances thermiques élémentaires.



$$\dot{q} = \frac{(T_1 - T_2)}{\mathcal{R}_{parallèle}} \qquad \frac{1}{\mathcal{R}_{parallèle}} = \left[\frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \frac{1}{\mathcal{R}_3} + \ldots + \frac{1}{\mathcal{R}_n} \right]$$

Lorsque les murs sont disposés en **parallèles** avec **une isolation aux frontières,** la résistance thermique équivalente s'obtient en utilisant les résultats relatifs aux circuits électriques.

II. Transfert thermique par conduction

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

**Photo de la façade
de votre maison.**

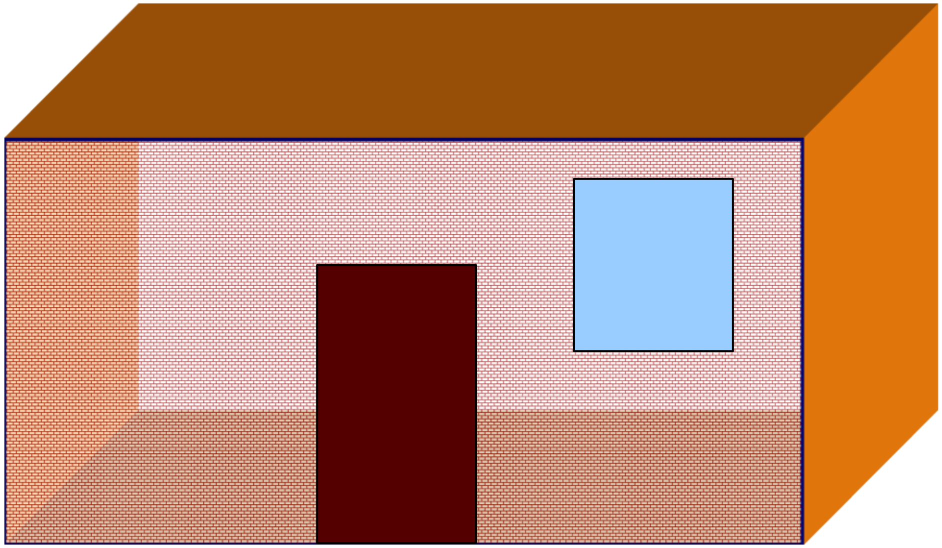


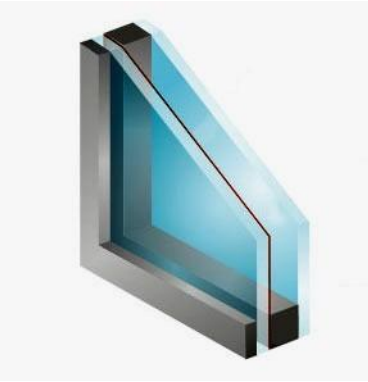
**Schéma simplifié de la façade
(cadre rouge sur la photo).**

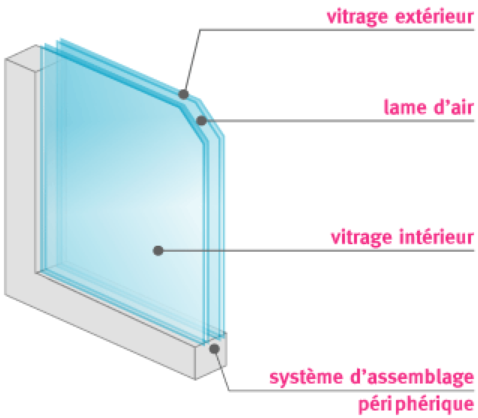
II. Transfert thermique par conduction

Photo de la façade
de votre maison.

Accessoires : Plaques
de plâtre.

Fenêtre à double vitrage.



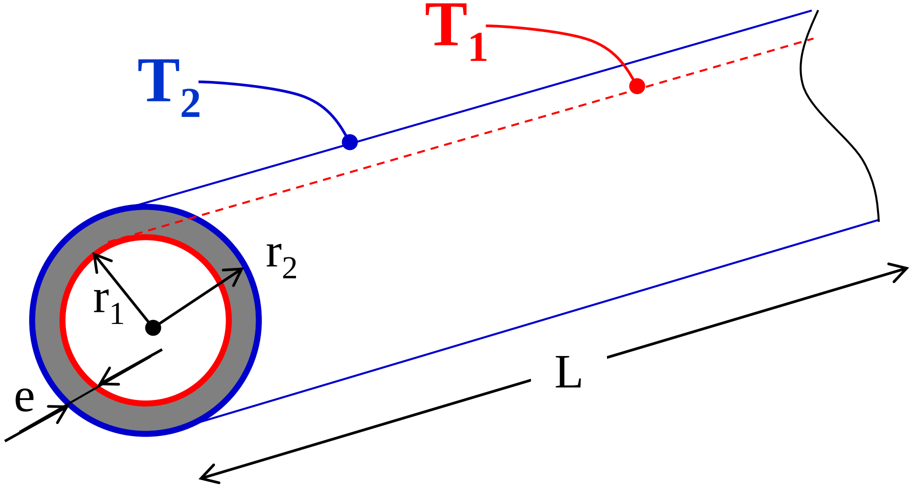


II. Transfert thermique par conduction

c) Conduite cylindrique creuse

$$\left(\partial^2 T/\partial x_i^2\right)=0$$

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right)=0$$



$$\dot{q}=q_r\,S(r)=-k\frac{dT}{dr}(2\pi r L)=Cte$$

$$\dot{q}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r}=-2\pi L k\int_{T_1}^{T_2}dT \;\Rightarrow\; \dot{q}=\frac{(T_1-T_2)}{\left[\dfrac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L}\right]}=\frac{(T_1-T_2)}{\mathfrak{R}_{cd}^{cyl}}$$

$$T(r)=T_1-\frac{(T_1-T_2)}{\ln(r_2/r_1)}\ln(r/r_1) \qquad \text{(V.17)}$$

Remarque : L >> D, le transfert thermique est purement radial

Détail de la procédure

$$\rho\,Cp\frac{dT}{dt}=\begin{cases}\dfrac{\partial q_i}{\partial x_i}\\ k\,\Delta T\end{cases}\longrightarrow\begin{cases}\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r}(r\,q_r)+\cancel{\dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial q_\theta}{\partial\theta}}+\cancel{\dfrac{\partial q_x}{\partial x}}=0\\ k\left[\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r}\left(r\dfrac{\partial T}{\partial r}\right)+\cancel{\dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial}{\partial\theta}\left(\dfrac{\partial T}{\partial\theta}\right)}+\cancel{\dfrac{\partial T}{\partial x}}\right]=0\end{cases}$$

$$\begin{cases}(r\,q_r)=(r\,q)=Cte\\ r\dfrac{dT(r)}{dr}=Cte\end{cases}\longrightarrow\begin{cases}[(r\,q)=Cte]\,2\pi L\\ dT(x)=Cte\,(dr/r)\end{cases}\longrightarrow\begin{cases}S(r)\,q=\dot{q}=Cte\\ T(x)=a\ln(r)+b\end{cases}$$

Flux de chaleur

$$\dot{q}=\frac{(T_1-T_2)}{\left[\dfrac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L}\right]}$$

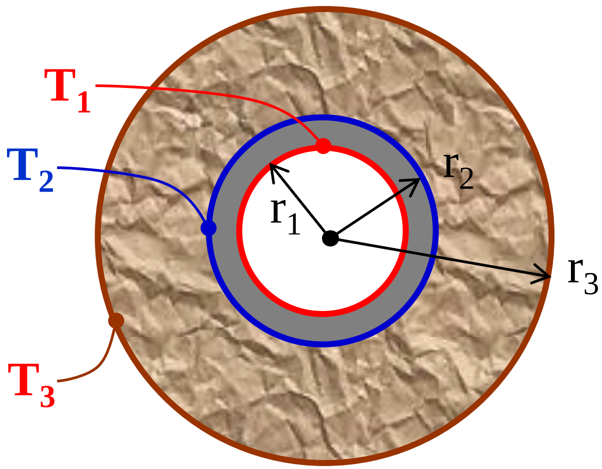
Profil de température

$$T(r)=T_1-\frac{(T_1-T_2)}{\ln(r_2/r_1)}\ln(r/r_1)$$

$$T(r)=T_1-\frac{\dot{q}}{2\pi k L}\ln(r/r_1)$$

II. Transfert thermique par conduction

d) Conduite gainée multicouches : Conduite calorifugée



$$(T_1 - T_2) = \frac{\dot{q}}{2\pi k_1 L} \ln(r_2/r_1)$$

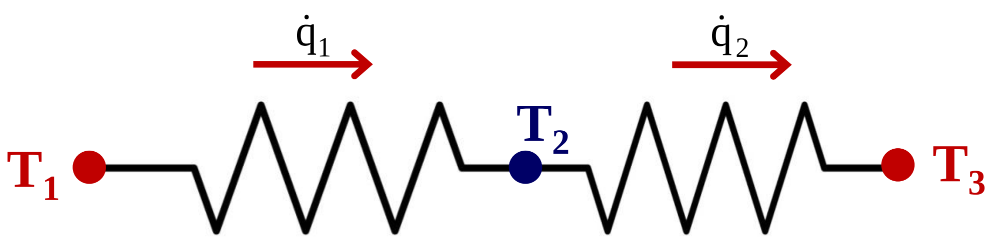
$\oplus$

$$(T_2 - T_3) = \frac{\dot{q}}{2\pi k_2 L} \ln(r_3/r_2)$$

$$\dot{q} = \frac{(T_1 - T_3)}{\left[\left[\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L}\right] + \left[\frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L}\right]\right]}$$

Analogie électrique

$$\dot{q}_1 = \frac{(T_1 - T_2)}{\mathscr{R}_{cd}^{cyl1}} \qquad \dot{q}_2 = \frac{(T_2 - T_3)}{\mathscr{R}_{cd}^{cyl2}}$$



$$\mathscr{R}_{cd}^{cyl1} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} \qquad \mathscr{R}_{cd}^{cyl2} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{\sum_i \left(\mathscr{R}_{cd}^{cyl}\right)_i}$$