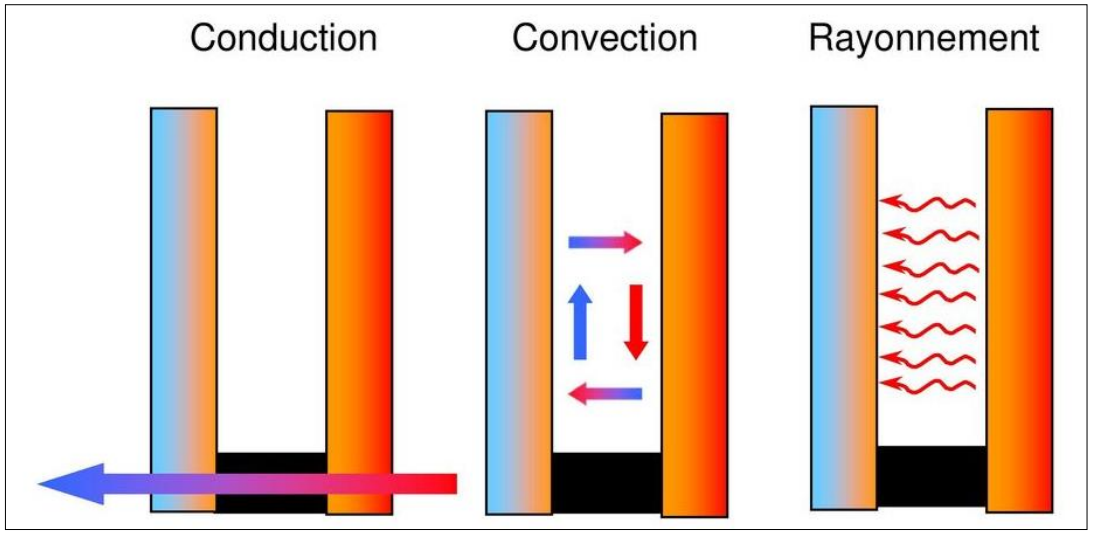
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Ecole Supérieure de technologie -Fès

Cours des Transferts thermiques



Pr. Said Hamdaoui

Transferts thermiques

Sommaire :

Chapitre 1: Introduction

Chapitre 2: Conduction et équation de diffusion thermique

Chapitre 3: Conduction unidirectionnelle en régime permanent

Chapitre 4: Conduction stationnaire en deux dimensions

Chapitre 5: La convection

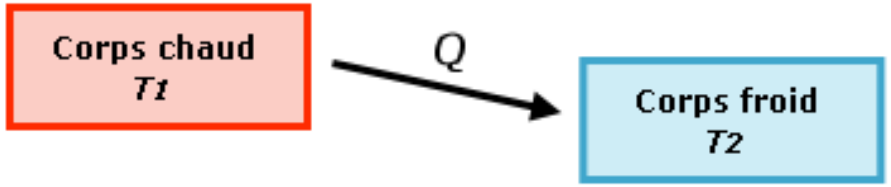
Chapitre 6: Le rayonnement

Transferts thermiques

Chapitre 1: Introduction

Transfert de chaleur, qu'il convient d'appeler transfert thermique, est défini comme de l'énergie thermique en transit à cause d'une différence de température.

Deux corps ayant la même température sont dits en " équilibre thermique ". Si leurs températures sont différentes, le corps le plus chaud cède de l'énergie thermique au corps le plus froid : on dit qu'il y a transfert thermique.

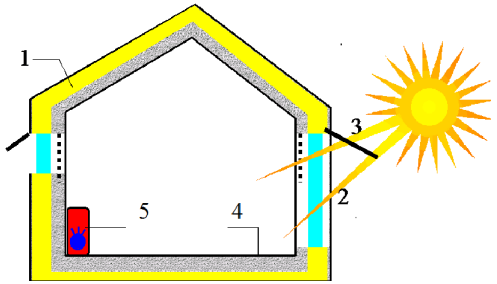


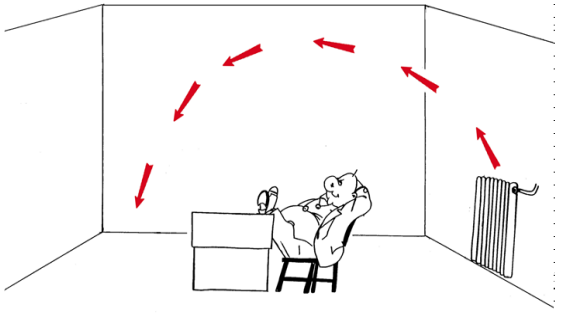
Le transfert thermique s'effectue du corps chaud vers le corps froid.

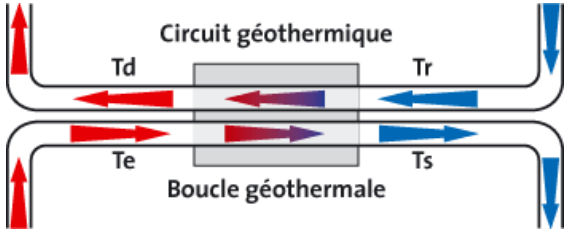
Transferts thermiques

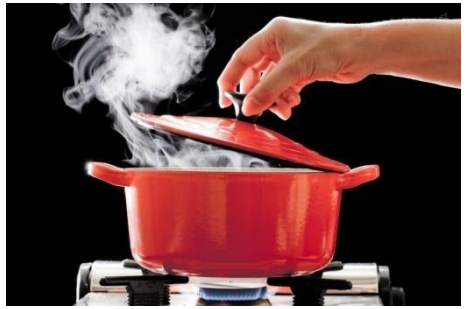
Chapitre 1: Introduction

On peut observer les phénomènes de transfert de chaleur aussi bien dans des situations industrielles (fours, échangeurs de chaleur, chambres froides, …) que dans notre vie quotidienne (le chauffage, l'isolation des maisons, la cuisson des aliments, les vêtements d'hiver …).









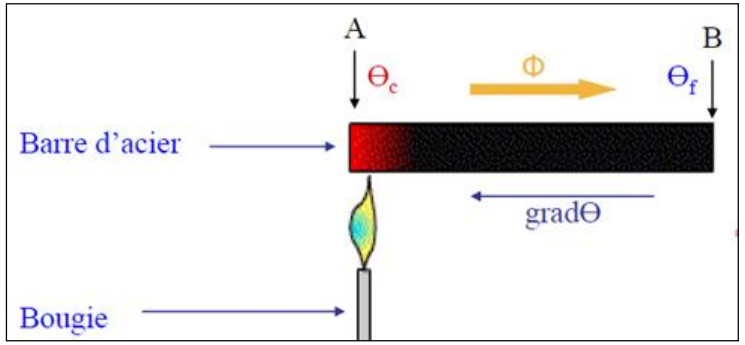
Transferts thermiques

Chapitre 1: Introduction

Modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur entre deux systèmes peut s'effectuer en général selon trois modes (**conduction**, **convection** et **rayonnement**)

❖ **La conduction:** La conduction thermique, aussi appelée diffusion thermique, est un transfert d'énergie dans un milieu matériel sans mouvement macroscopique, mettant en jeu des chocs de molécules (dans les fluides) ou des transferts de vibrations (dans les solides).



Chauffage d'une barre métallique à l'une de ses extrémités

Loi de Fourier

$$\vec{\varphi} = -\lambda\ \overrightarrow{grad}(T) = -\lambda\ \vec{\nabla}(T)$$

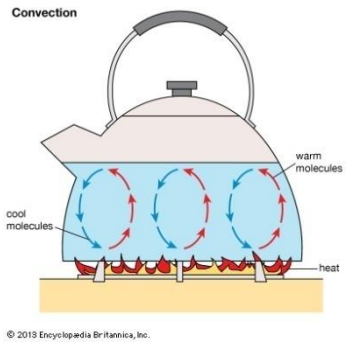
Transferts thermiques

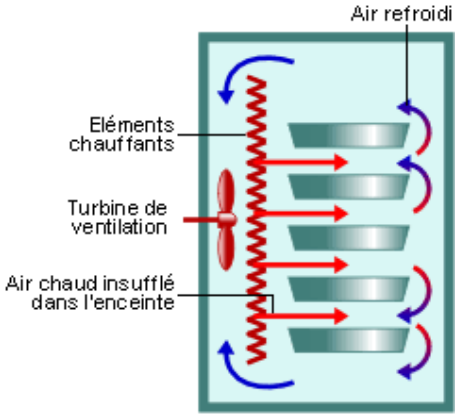
Chapitre 1: Introduction

Modes de transfert de chaleur

❖ **La convection:** La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, le <u>mouvement macroscopique de la matière</u>. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement.

On distingue deux types de convection: naturelle et forcée.





Loi de Newton

$$\varphi = h(T_s - T_\infty)$$

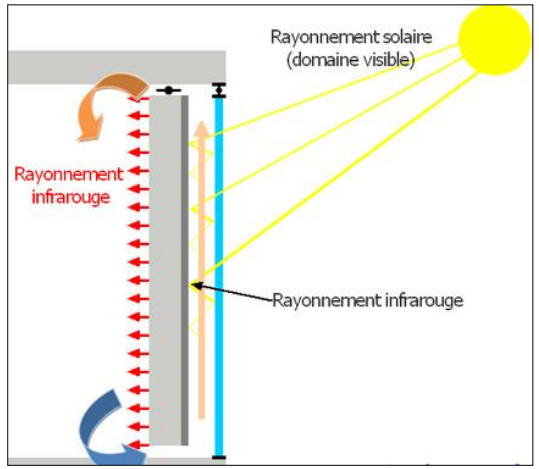
Transferts thermiques

Chapitre 1: Introduction

Modes de transfert de chaleur

❖ **Le rayonnement:** Tout corps matériel émet et absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique.

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel.

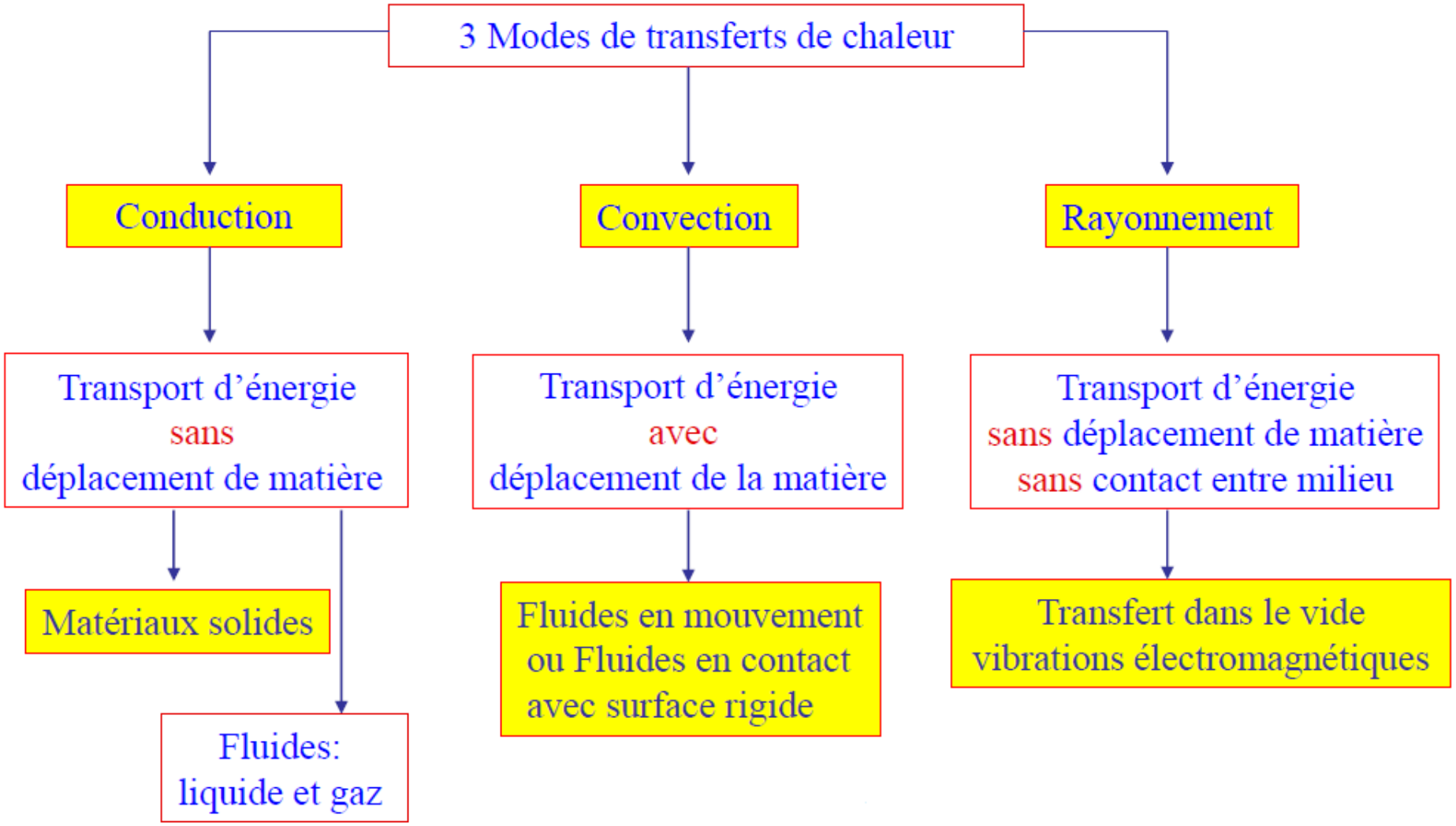


Loi de Stephan-Bolztman

$$\varphi_{max} = \sigma T_s^{\,4}$$

Où, σ est la constante de Stefan-Boltzman, vaut 5.67 10^{-8} W/(m^2.K^4)

Les différents modes du transfert thermique



Transferts thermiques

Chapitre 1: Introduction

Définitions

Les transferts de chaleur sont déduits de la détermination de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température, T(x, y, z, t).

- La variation dans le temps de la température en un point *M(x, y, z) du système est donnée par la dérivée* partielle de *T(x, y, z,t) par rapport au temps :* $\frac{\partial T}{\partial t}$

- Pendant un intervalle de temps dt, la variation de température en un point M sera : $dT = \frac{\partial T}{\partial t} dt$

- La variation dans l'espace de la température à un instant t est donnée par le **gradient de température.**

$$\vec{\nabla} T = \overrightarrow{grad} T = \left| \begin{array}{c} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{array} \right.$$

Transferts thermiques

Chapitre 1: Introduction

Définitions

a) Surface isotherme

Une surface isotherme (S_T) est une surface dans un milieu matériel où la température est identique en chaque point à un instant t donné :

$$\forall\ (M, M') \in (S_T)^2\ ;\ T(M,t) = T(M',t)$$

Transferts thermiques

Chapitre 1: Introduction

Définitions

b) Flux de chaleur:

Un flux de chaleur est une quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur par unité de temps. C'est donc une puissance, qui s'exprime en Watt (J/s) :

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \dot{Q} \qquad \textbf{(W)}$$

c) Densité de flux de chaleur

Pour indiquer dans quelle direction et quel sens se fait le transfert, on définit le vecteur $\vec{\varphi}$ vecteur densité de flux de chaleur (**Watt/m²**) : $d\Phi = \vec{\varphi}.d\vec{s}$

avec $d\vec{s} = \vec{n}\, ds$ où, $\vec{n}$ est le vecteur normal à la surface

Et ds représente le module de l'aire considérée.

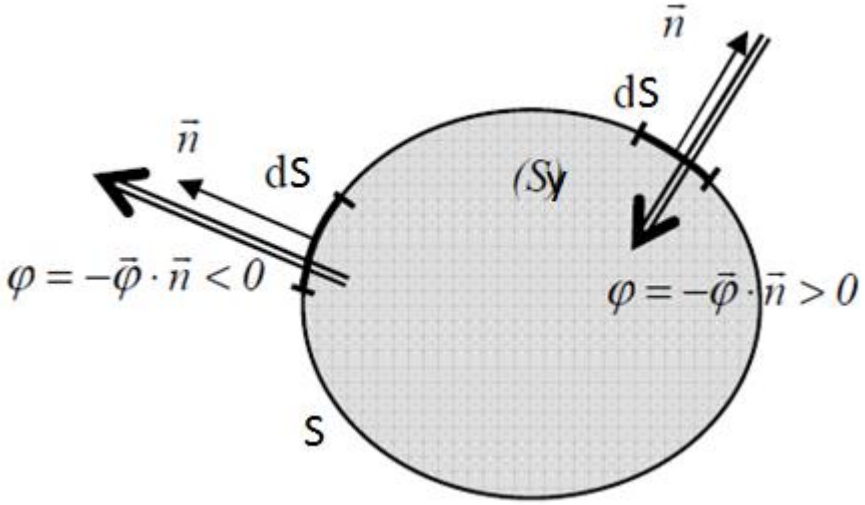
Transferts thermiques

Chapitre 1: Introduction

Définitions

Densité de flux de chaleur

Exemple : flux de chaleur échangé par un système avec l'extérieur à travers une surface S:



$$\phi = \iint_S \varphi dS = \iint_S -\vec{\varphi}.\vec{n}\, dS$$

$\vec{n}$ est la normale extérieure à l'élément de surface dS.

Le signe (-) est introduit pour respecter la convention suivante: on compte positivement le flux qui entre dans le système.

Transferts thermiques

Chapitre 2: conduction et équation de diffusion thermique

Loi de Fourier (1807) généralisée:

Dans un milieu non isotherme (dans lequel la température locale *T(M)* (au point M) n'est pas uniforme), mais ne dépend pas du temps **(régime stationnaire)**, la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température:

$$\vec{\varphi} = -\lambda\, \overrightarrow{grad}(T) = -\lambda\, \vec{\nabla}(T)$$

$$\vec{\varphi} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z}\vec{k} \right)$$

Le coefficient de proportionnalité, λ est la conductivité thermique en **W/m K** .

Dans un milieu homogène et isotrope : λ est constante.

Transferts thermiques

Chapitre 2: conduction et équation de diffusion thermique

La conductivité thermique est une caractéristique thermique des matériaux. Elle traduit la capacité d'un matériau à transporter la chaleur par conduction.

Matériaux	Conductivité thermique (W/ m . K)
Cuivre	386
Verre	0,81
Brique rouge	0,63
Eau	0,58
Air	0,026

Influence de la température

$$\lambda = \lambda_0 (1 + aT)$$

λ_0, a : constantes dépendantes du matériau

Transferts thermiques

Chapitre 2: conduction et équation de diffusion thermique

Formulation d'un problème de transfert de chaleur

On sait que le flux de chaleur à travers l'élément de surface ds est :

$$d\Phi = \varphi\, ds = -\lambda\, \overrightarrow{grad}(T) \cdot \vec{n} ds = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} ds$$

le flux total à travers la surface ***s***, sera :

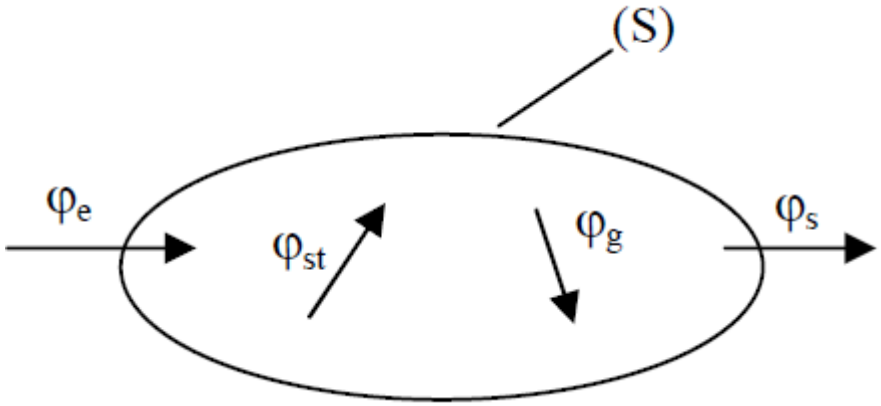
$$\Phi = \iint_S -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} ds = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \iint_S ds = -\lambda\, s \frac{\partial T}{\partial n}$$

La plus part des problèmes de transferts thermiques consistent à déterminer le flux Φ échangé ou les conditions qui permettent de l'augmenter ou le diminuer.

Pour cela il est nécessaire de connaitre le champ de température $T\ (M,\ t)$. **À cette fin on écrit et on résout l'équation de l'énergie, qu'on obtient du bilan énergétique.**

Chapitre 2: conduction et équation de diffusion thermique

Bilan d'énergie : pour un système délimité par une surface (S) les différents flux thermiques intervenus dans le bilan énergétique sont principalement :



Système et bilan énergétique

φ_e *Flux de chaleur entrant*

φ_S *Flux de chaleur sortant*

φ_g *Flux de chaleur généré*

φ_{St} *Flux de chaleur stocké*

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\Phi_e + \Phi_g = \Phi_S + \Phi_{St}$$

Bilan d'énergie

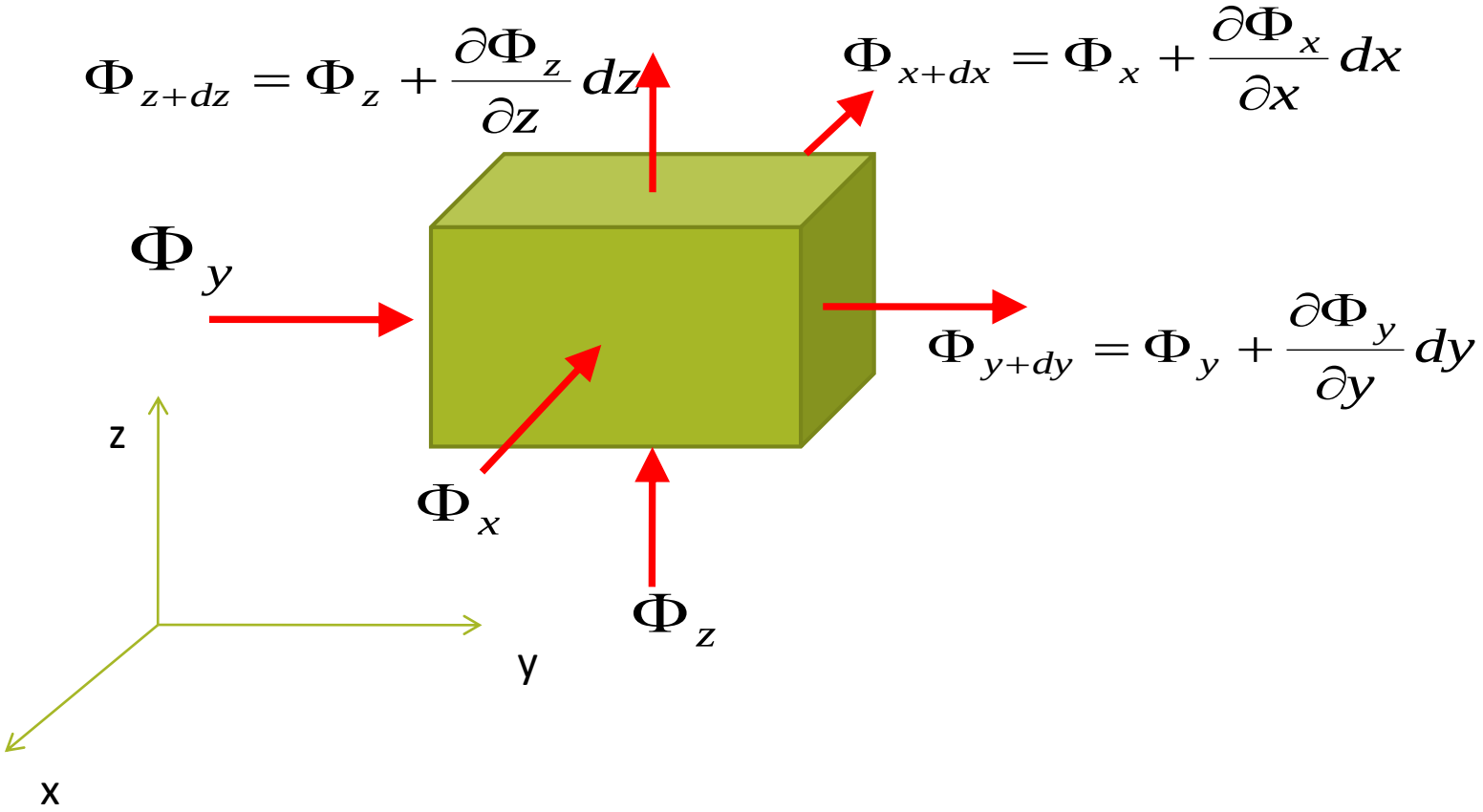
Expression des flux d'énergie:

On établit les expressions des différents flux d'énergie. En les exprimant dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

Chapitre 2: conduction et équation de diffusion thermique

Bilan d'énergie

Considérons un volume élémentaire : **dv = dx dy dz**, dans lequel on note T(x,y,z,t) la température



Bilan d'énergie

φ_e *Flux de chaleur entrant* $(\Phi_x + \Phi_y + \Phi_z)$

φ_S *Flux de chaleur sortant* $(\Phi_{x+dx} + \Phi_{y+dy} + \Phi_{z+dz})$

φ_g *Flux de chaleur généré* $\dot{q}$ Production ou absorption **(W/m³)**

Exemple: réactions chimiques exo ou endothermique,

φ_{St} *Flux de chaleur stocké* $\rho c_v \dfrac{\partial T}{\partial t}$ Stocké **(W/m³)**

$$\Phi_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dy\, dz$$

$$\Phi_{x+dx} = \left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy\, dz$$ (Formule de la moyenne)

Bilan d'énergie

Production ou absorption (W)

$$\boxed{\begin{aligned}&(\Phi_x + \Phi_y + \Phi_z) + \dot{q}\, dv \;=\\ &(\Phi_{x+dx} + \Phi_{y+dy} + \Phi_{z+dz}) + \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} dv\end{aligned}}$$

$$\Phi_e + \Phi_g = \Phi_{st} + \Phi_s$$

Stocké (W)

$$\Phi_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dy\, dz$$

$$\Phi_{x+dx} = \left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy\, dz$$ (Formule de la moyenne)

$$\Phi_x - \Phi_{x+dx} = \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy\, dz$$ (Idem pour y et z)

En substituant dans l'équation de l'énergie:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}=\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t}$$

Si le milieu est isotrope et homogène la <u>conductivité thermique λ est constante</u>

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{\lambda}=\frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\boxed{\Delta T+\frac{\dot{q}}{\lambda}=\frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t}}$$

$$a=\frac{\lambda}{\rho c_v}$$

Diffusivité thermique : traduit la vitesse de propagation d'un flux de chaleur à travers le matériau

Unité: m^2/s

Δ est le Laplacien $\Delta T=\nabla^2 T=\vec{\nabla}\cdot\vec{\nabla}(T)$

Remarque: Cette équation de diffusion de la chaleur peut se simplifier sous certaines conditions.

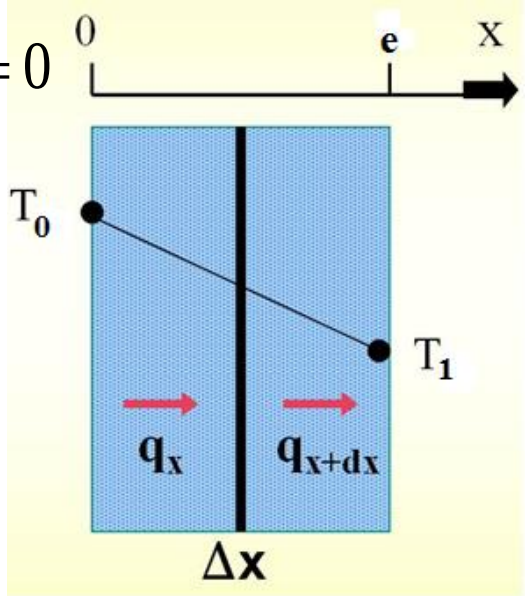
Conduction unidirectionnelle en régime permanent

1.Mur simple sans production de chaleur

a) Température imposées sur les deux faces:

Considérons un mur plan d'épaisseur e, de surface S dont les faces sont à des températures connues T_0 et T_1

$$0 \leq x \leq e$$



Hypothèses

- Il n'y a pas ni production ni absorption interne de la chaleur : $\dot{q} = 0$
- régime permanent : $\dfrac{\partial T}{\partial t} = 0$
- λ=constante
- conduction unidirectionnelle : $T = T(x)$

L'équation de l'énergie se réduit à : $\dfrac{d^2T}{dx^2} = 0$

Solution : $T(x) = Ax + B$

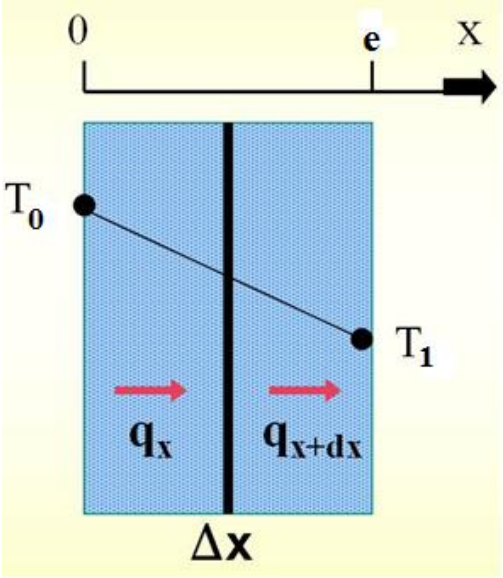
Il s'agit donc d'un profil linéaire. Pour trouver les constantes d'intégration A et B, on utilise les conditions aux frontières (limites) c'est-à-dire en x = 0 et en x = e.

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

1. Mur simple sans production de chaleur

Utilisation des conditions aux limites: en $x = 0 : T(0) = T_0$ et en $x = e : T(e) = T_1$

Alors : $$T(x) = \frac{T_1 - T_0}{e} x + T_0$$ (Loi linéaire)



Densité de flux dans le mur :

$$\vec{\varphi}(x) = -\lambda \frac{dT}{dx} \vec{e}_x = -\lambda \frac{T_1 - T_0}{e} \vec{e}_x$$

Le flux de chaleur est : $$\Phi = -\lambda S \frac{T_1 - T_0}{e}$$

Remarque : Le flux de chaleur est conservatif dans le mur, ce qui se traduit mathématiquement par : $div(\vec{\varphi}) = 0 \quad (\varphi_e = \varphi_s)$

Relation vraie si le régime est stationnaire et il n'y a pas de production de chaleur interne

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

1. Mur simple sans production de chaleur

b) Température imposée sur une face et un flux constant sur l'autre

$$x = 0 \quad : \quad T(x=0) = To$$

$$x = e \quad : \quad \varphi(e) = cste = \varphi_1$$

$$\varphi(e) = -\lambda \left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=e} = -\lambda A = \varphi_1$$

alors $\quad T(x) = -\dfrac{\varphi_1}{\lambda} x + T_0$

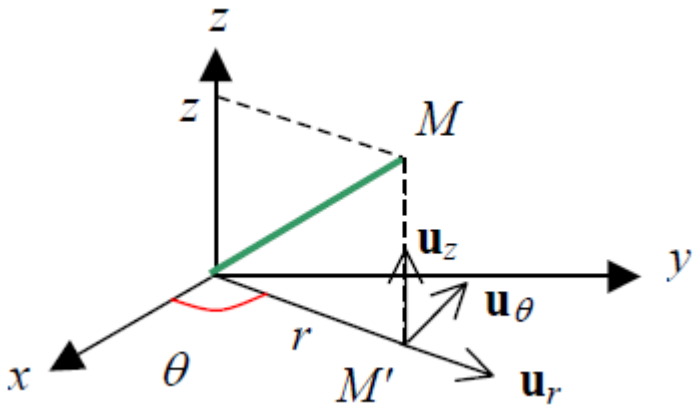
Ici, aussi la densité de flux est constante dans le mur égale à celle imposée sur la face de la paroi.

La température sur la face $x = e$: $\quad T(e) = T_1 = -\dfrac{\varphi_1}{\lambda} e + T_0$

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

Équation générale de la conduction en coordonnées cylindriques

$$\boxed{\Delta T + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t}}$$



$$\vec{\nabla} T = \overrightarrow{grad} T = \left| \begin{array}{c} \dfrac{\partial T}{\partial r} \\ \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial T}{\partial \theta} \\ \dfrac{\partial T}{\partial z} \end{array} \right.$$

$$\Delta T = \nabla^2 T = \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

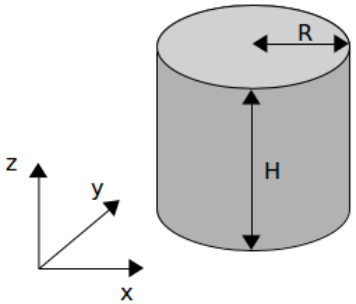
2. Cylindre simple sans production de chaleur

On considère un cylindre constitué d'un matériau homogène et indéformable de conductivité thermique constante. On suppose que la hauteur du cylindre est très grande devant son diamètre de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel. L'équation de la chaleur dans le cas où il n'y a pas de dissipation s'écrit alors :

$$\Delta T = \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dT}{dr} = \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left[r\frac{dT}{dr}\right] = 0$$

$$r\frac{dT}{dr} = cste = A \qquad T(r) = A\ln(r) + B$$

- Cylindre plein



- Cylindre creux

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

2. Cylindre simple sans production de chaleur

Notons T1 et T2 les températures régnant sur les faces intérieure et extérieure du cylindre:

$$T_1 = T(R_1) = A\ \ln(R_1) + B$$

$$T_2 = T(R_2) = A\ \ln(R_2) + B$$

$$T_2 - T_1 = A\left[\ln(R_2) - \ln(R_1)\right] \longrightarrow A = \frac{T_2 - T_1}{\ln(R_2 / R_1)}$$

Et $$B = T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln(R_2 / R_1)}\ln(R_1)$$

$$T(r) = \frac{T_2 - T_1}{\ln(R_2 / R_1)}\ln\left(\frac{r}{R_1}\right) + T_1$$

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

Déterminons la densité de flux de chaleur qui travers le cylindre en r quelconque en appliquant la loi de Fourier;

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{grad}T = -\lambda \frac{dT}{dr}\vec{e}_r$$

$$\vec{\varphi} = -\frac{\lambda}{r}\frac{T_2 - T_1}{\ln(R_2/R_1)}\vec{e}_r \quad \Longrightarrow \quad \varphi_r = -\lambda \frac{A}{r}$$

Remarque: la densité de flux dépend de r, contrairement au cas de mur plan.

Le flux de chaleur traversant une hauteur H de cylindre pour un r quelconque

$$\Phi = \iint_S \varphi_r dS \quad \text{Avec:} \quad dS = r\, d\theta\, dz$$

$$\Phi = \int_0^{2\pi}\int_0^{H} \varphi_r r\, d\theta\, dz$$

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

$$\Phi = 2\pi\lambda H \frac{T_1 - T_2}{\ln(R_2 / R_1)}$$ Cette relation peut encore s'écrire: $$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{\dfrac{\ln(R_2 / R_1)}{2\pi\lambda H}}$$

On constate que le flux de chaleur ne dépend pas de r, ce qui implique notamment que le flux qui travers la frontière en $r=R_1$ (rayon intérieur) est égal au flux qui travers la frontière en $r=R_2$, vérifiant ainsi la conservation du flux dans le cas de régime permanent sans dissipation interne de la chaleur.

En revanche, la densité de flux dépend de r, car la surface traversée par le flux dépend de r.

Exercices d'application

Exercice 1:

Calculer la perte calorifique au travers d'un mur en briques de 8 cm d'épaisseur, 4 m de hauteur et de 2 m de largeur. Les températures des deux faces du mur sont respectivement 35°C et 3°C. (λ = 0,69 W/m.°C).

Exercice 2: Tube cylindrique

Soit un tube d'acier 20/27 mm dont la température de la paroi interne est T_1= 119,75°C et celle de la paroi externe T_2 = 119,64°C. La conductivité thermique de l'acier est : λ= 46 $W.m^{-1}.°C^{-1}$

Calculer le flux thermique au travers le tube pour une longueur L=1m.

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

3. Notion de résistance thermique

D'après les résultats précédemment établis, on constate que les expressions des flux de chaleur qui traversent un milieu par conduction ou qui sont échangés par convection peuvent se mettre sous la forme :

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{Thermique}}$$

- Pour le mur plan: $\Phi = \dfrac{T_0 - T_e}{e/\lambda S} \longrightarrow R_{Thermique} = \dfrac{e}{\lambda S}$

- Pour le cylindre creux: $\Phi = \dfrac{T_1 - T_2}{\dfrac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi\lambda H}} \longrightarrow R_{th} = \dfrac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi\lambda H}$

- Pour le flux convectif: $\Phi = hS(T_p - T_\infty) \longrightarrow R_{th} = \dfrac{1}{hS}$

La résistance thermique représente ainsi la résistance du milieu soumis à un écart de température donné, à laisser se propager un flux de chaleur.

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

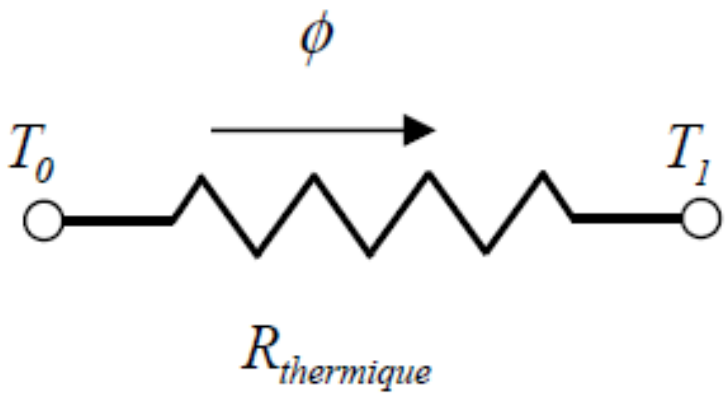
3. Notion de résistance thermique

Analogie électrique

L'expression du flux thermique ainsi écrite présente une certaine analogie avec la loi d'Ohm en électricité : $I = \dfrac{U}{R}$

Le flux de chaleur joue le rôle du courant électrique (flux d'électrons) la différence de température qui donne naissance au flux de chaleur joue le rôle de la différence de potentiel qui donne naissance au courant électrique.

Ainsi, pour représenter un problème thermique, on pourra adopter la méthode des schémas électrique équivalents du type :



Conduction unidirectionnelle en régime permanent

3. Notion de résistance thermique

Analogie électrique

On pourra également appliquer les mêmes lois de composition qu'en électricité (circuits séries ou parallèles) lorsque l'on sera confronté à un système mettant en jeu plusieurs milieux et plusieurs types de flux.

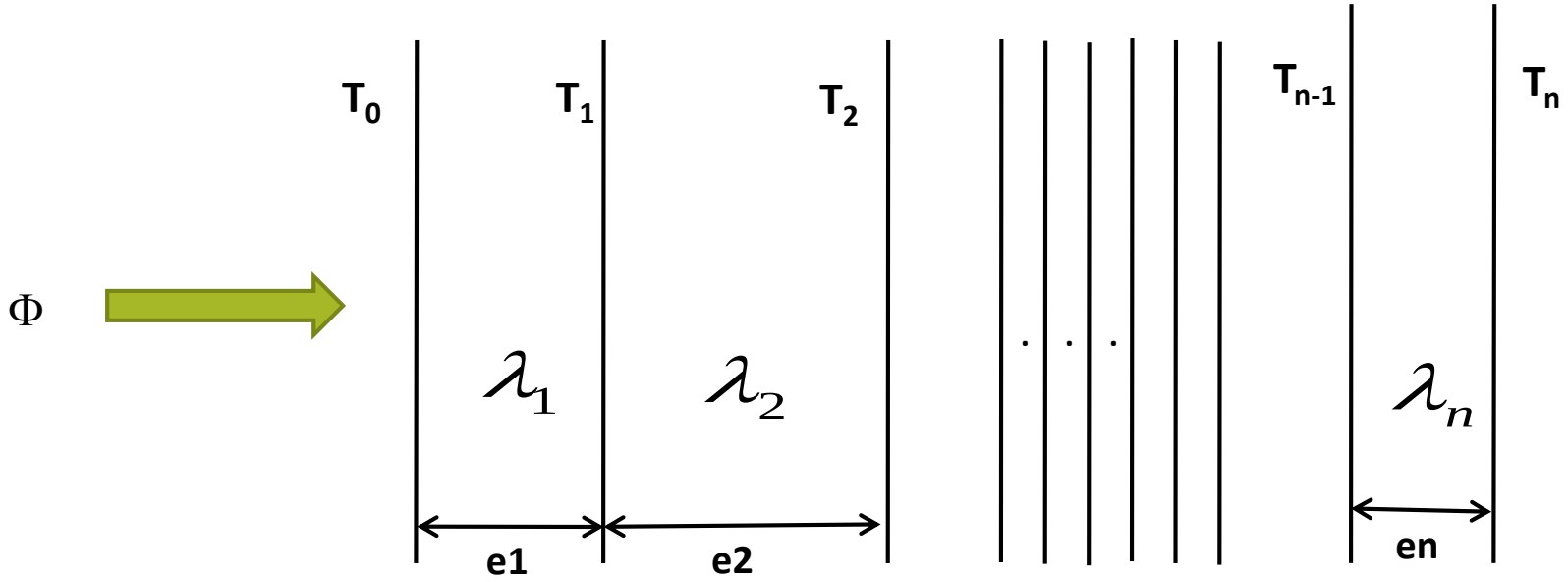
Conduction unidirectionnelle en régime permanent

3. Notion de résistance thermique

a. Résistance thermique d'un mur composite (association en série)

On considère un mur composé de plusieurs couches d'épaisseur e_1 , e_2 ,…, e_n et de conductivité thermique respectivement, $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$

Soient $T_0, T_1, T_2, \ldots, T_n$ les températures des interfaces.



Exprimer la résistance thermique totale (équivalente) de ce mur

$$\varphi = \frac{\lambda_1}{e_1}(T_0 - T_1) = \frac{\lambda_2}{e_2}(T_1 - T_2) \ldots = \frac{\lambda_n}{e_n}(T_{n-1} - T_n)$$

$$\boxed{\begin{aligned} T_0 - T_1 &= \frac{e_1}{\lambda_1}\varphi \\ T_1 - T_2 &= \frac{e_2}{\lambda_2}\varphi \\ T_{n-1} - T_n &= \frac{e_n}{\lambda_n}\varphi \end{aligned}}$$

En additionnant ces relations:

$$T_0 - T_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i}\varphi$$

$$\Phi = S\frac{T_0 - T_n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i}} = \frac{\Delta T}{R_T}$$

Où R_T est la résistance thermique totale du mur

$$\boxed{R_T = \sum_{i=1}^{n} \frac{e_i}{\lambda_i S} = \sum_{i=1}^{n} R_i}$$

La résistance thermique totale du mur est égale à la somme des résistances thermiques de chaque matériau

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

3. Notion de résistance thermique

a. Résistance thermique d'un mur composite (association en série)

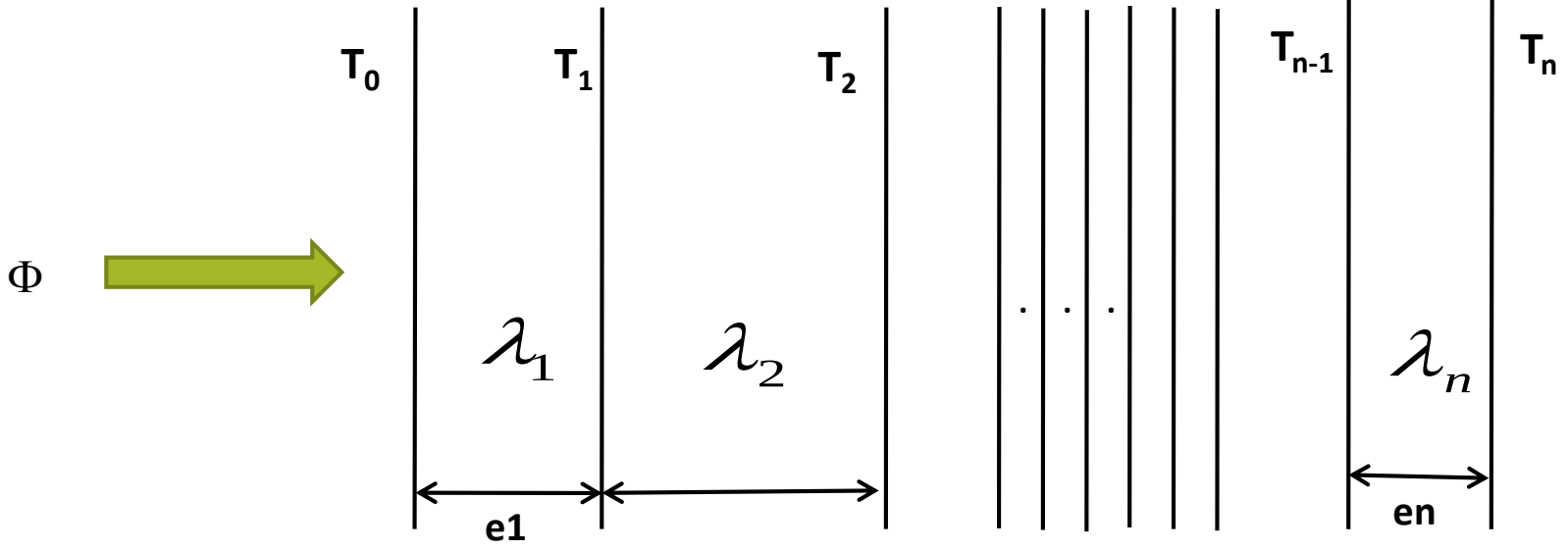
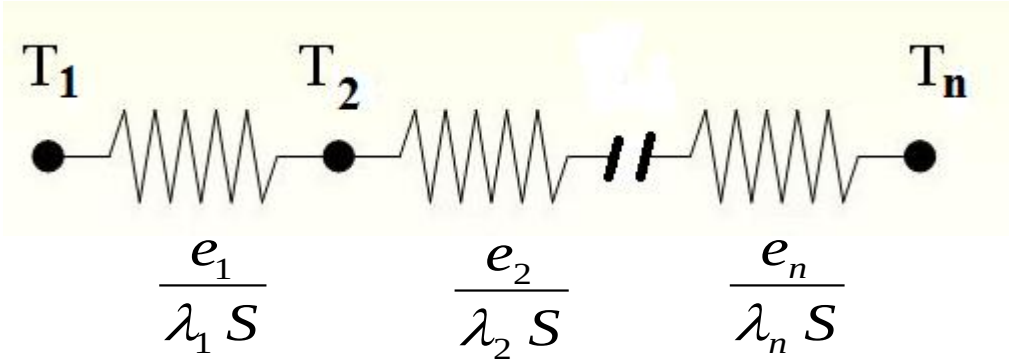


Schéma équivalent:



Conduction unidirectionnelle en régime permanent

3. Notion de résistance thermique

Exercice d'application

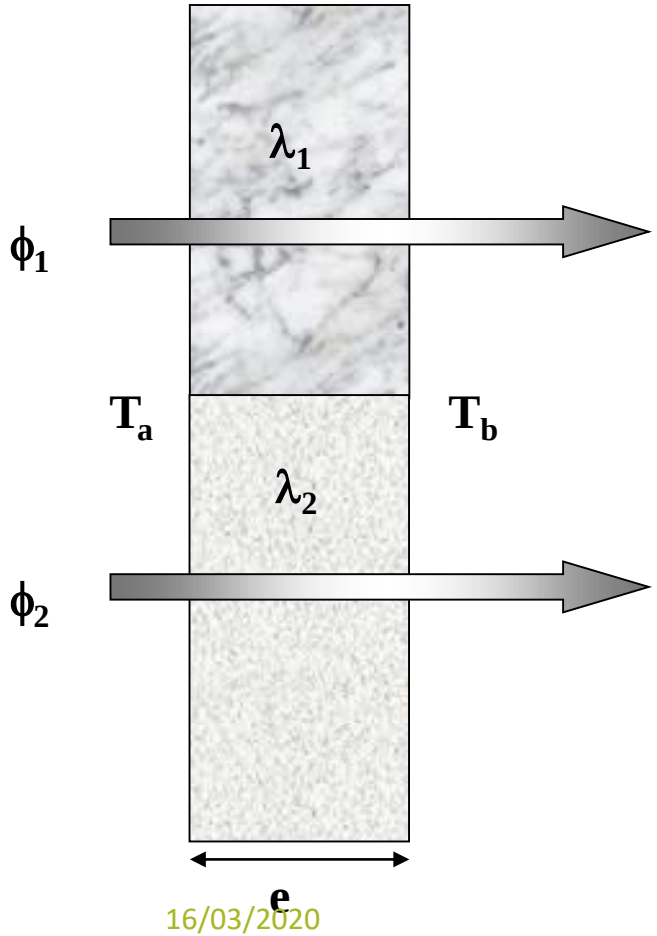
Un double vitrage est constitué de deux plaques de verre séparées par une couche d'air sec immobile. L'épaisseur de chaque vitre est de 3,5 mm et celle de la couche d'air est de 12 mm. La conductivité thermique du verre est égale à 0,7 $W.m^{-1}.°C^{-1}$ et celle de l'air est de 0,024 $W.m^{-1}.°C^{-1}$ sur le domaine de température étudié. Pour une chute de température de 5°C entre les deux faces extrêmes du double vitrage,

1. **Exprimez puis calculez la résistance thermique équivalente de la vitre?**
2. **Déduire le flux thermique qui travers la vitre de surface S = 1 m^2.**

Conduction unidirectionnelle en régime permanent

3. Notion de résistance thermique

b. Résistance thermique d'un mur composite (association en parallèle)



Soit deux éléments de mur en parallèle

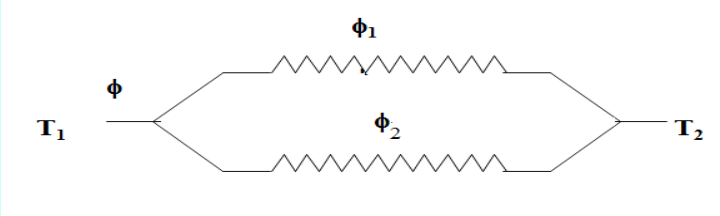
*** T_a et T_b leurs températures de surface**

*** ϕ_1 et ϕ_2 les flux de chaleur**

Le flux total traversant la paroi est la somme des 2 flux thermiques

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = (T_a - T_b).(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$$

$$d'où : \quad R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



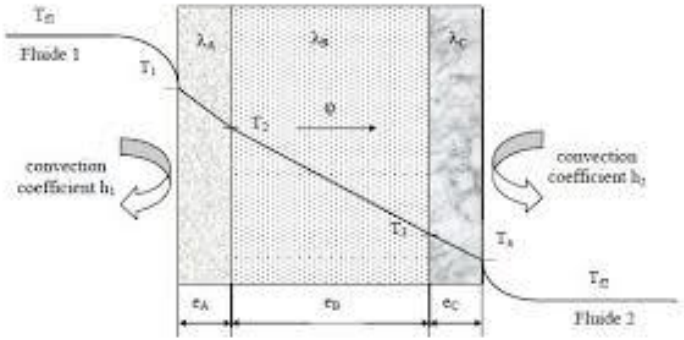
Pour 2 matériaux d'épaisseurs égales :

$$R = \frac{e}{\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2}$$

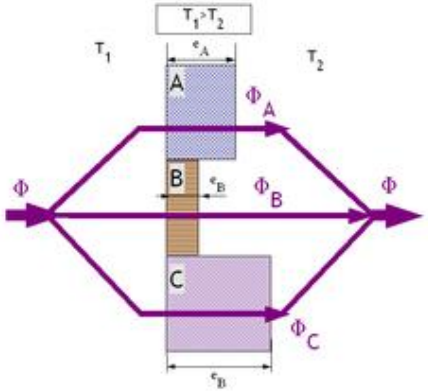
Transfert thermique unidirectionnelle en régime permanent

4. Mur plan avec convection aux surfaces

a. Résistance thermique d'un mur composite (association en série)



b. Résistance thermique d'un mur composite (association en parallèle)

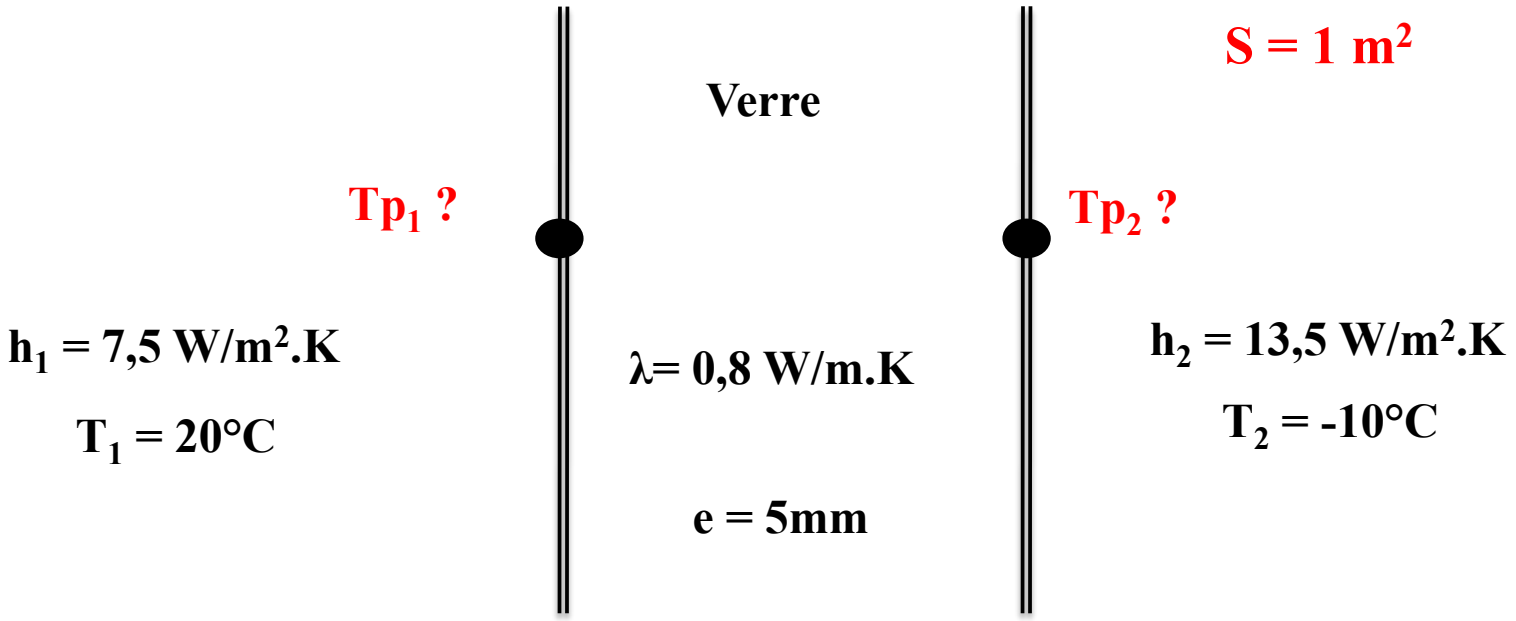


Transfert thermique unidirectionnelle en régime permanent

Exercices d'application

Exercice 1:

Transmission de la chaleur à travers une vitre



1) Calculer la résistance thermique totale
2) Calculer la densité de flux
3) Déterminer les températures des parois

Transfert thermique unidirectionnelle en régime permanent

Exercice 2

Mur composite association en parallèle

Exprimer puis calculer la résistance thermique totale de la façade d'une maison de 50 m². Le mur de la façade est en **brique de 26 cm** d'épaisseur, et il comporte **4 vitres de 2 m²** de surface et 3,5 mm d'épaisseur et une **porte en bois de 2m²** et de 42 mm d'épaisseur.

On suppose que la température de paroi interne est égale à 10°C pour tous les matériaux constituant la façade, de même, la température de paroi externe est de 5°C.

Calculer le flux thermique traversant la façade.

Conductivité thermique du **verre** : $\lambda v = 0,7\ W.m^{-1}.K^{-1}$

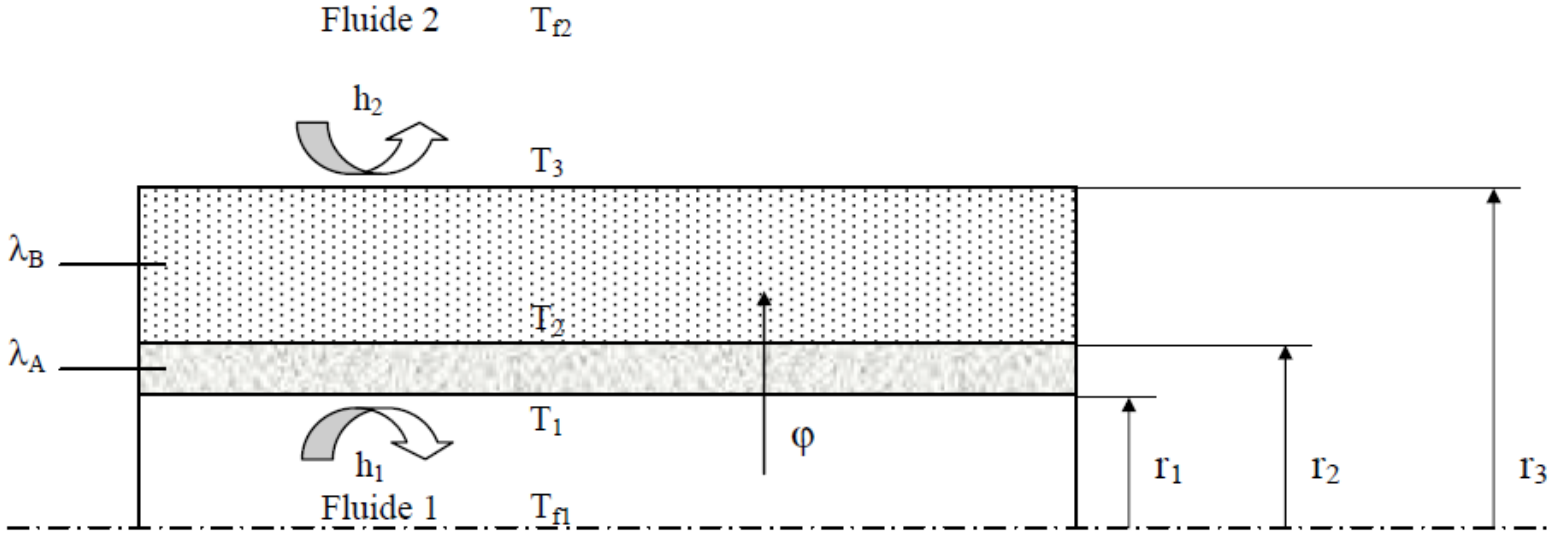
Conductivité thermique des **briques** : $\lambda b = 0,52\ W.m^{-1}.K^{-1}$

Conductivité thermique du **bois** : $\lambda bois = 0,21\ W.m^{-1}.K^{-1}$

Transfert thermique unidirectionnelle en régime permanent

5. Cylindre creux multicouches

a. Résistance thermique d'un cylindre multicouches



C'est le cas pratique d'un tube recouvert d'une ou plusieurs couches de matériaux différents et où l'on ne connaît que les températures T_{f1} et T_{f2} des fluides en contact avec les faces interne et externe du cylindre

En régime permanent, le flux de chaleur se conserve lors de la traversée des différentes couches et s'écrit :

Transfert thermique unidirectionnelle en régime permanent

6. Notion de coefficient global de transfert de chaleur

Par analogie avec la loi de refroidissement de Newton, il est possible d'exprimer la densité de flux en introduisant un **coefficient global de transfert de chaleur U** [W/(m^2.K)]:

$$\varphi = U\Delta T \qquad \varphi = \frac{\Phi}{S} = \frac{1}{S}\frac{\Delta T}{R_{th}} = U\Delta T$$

$$\Rightarrow \quad U = \frac{1}{R_{th}S}$$