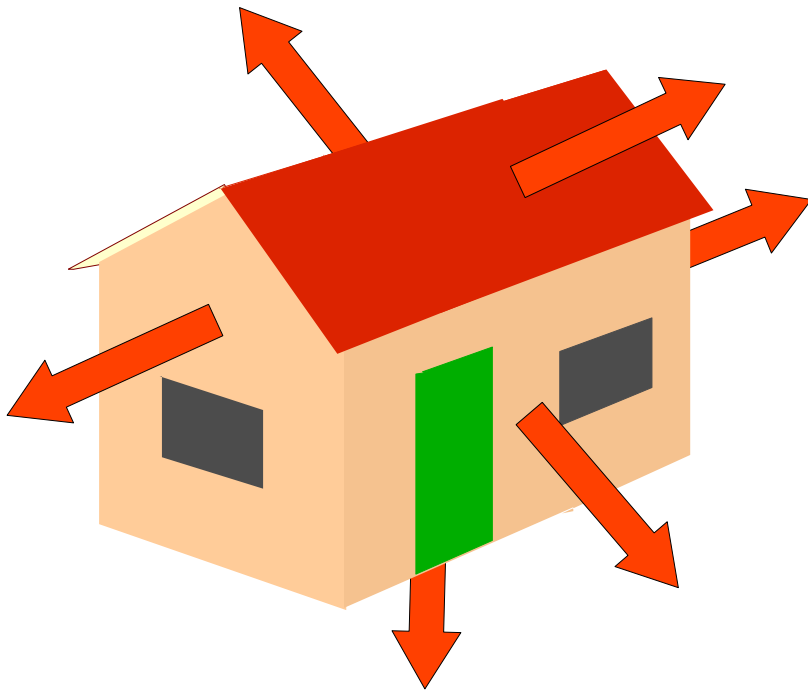


Transferts thermique et bâtiment

- 1. Flux thermique**
- 2. Transfert thermique par une façade**
- 3. Modes de transfert thermique**
- 4. Transfert par conduction à travers une paroi**
- 5. Résistance et coefficient de transmission thermiques**
- 6. Prise en compte des échanges en surface**
- 7. Résistance thermique globale d'une façade**

1. Flux thermique

Transfert thermique sortant d'un bâtiment



Flux thermique Φ :
énergie thermique transférée
par unité de temps

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{dQ}{dt}$$

W

J

s

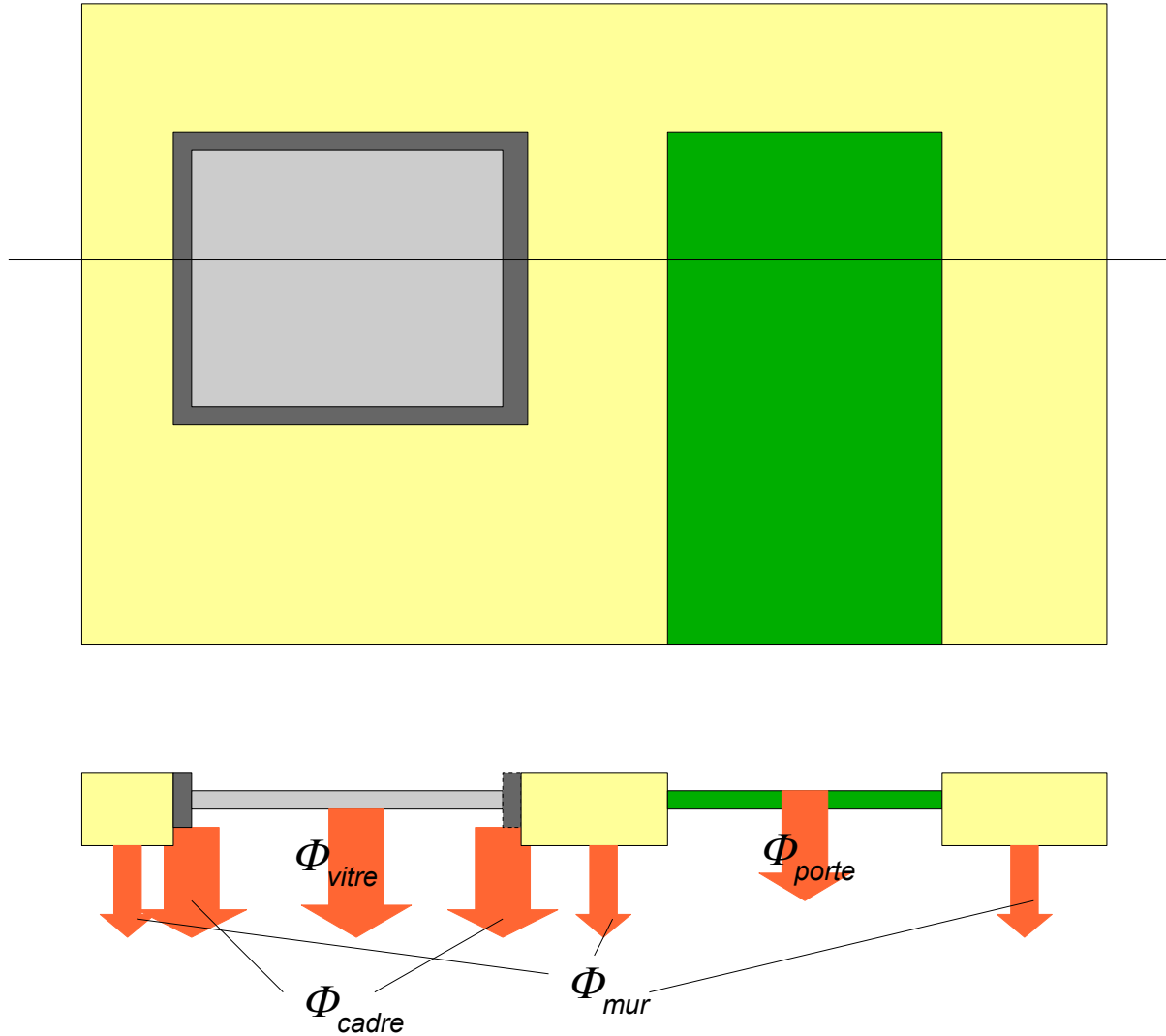
Densité linéaire de flux thermique $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ = flux thermique par unité de surface

The diagram shows the formula $\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{d\Phi_{1 \rightarrow 2}}{dS}$ enclosed in a yellow rectangular box. Three lines with labels point to parts of the formula: a line from the label $W.m^{-2}$ on the left points to the symbol $\varphi_{1 \rightarrow 2}$; a line from the label W on the top right points to the numerator $d\Phi_{1 \rightarrow 2}$; and a line from the label m^2 on the bottom right points to the denominator dS .

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{d\Phi_{1 \rightarrow 2}}{dS}$$

φ est aussi fréquemment appelé "**flux thermique surfacique**"

2. Transfert thermique par une façade



◆ Flux total à travers la façade :

$$\Phi_{i \rightarrow e} = \Phi_{mur} + \Phi_{vitre} + \Phi_{cadre} + \Phi_{porte}$$

et

$$\Phi_{mur} = S_{mur} \times \varphi_{mur}$$

$$\Phi_{vitre} = S_{vitre} \times \varphi_{vitre}$$

$$\Phi_{cadre} = S_{cadre} \times \varphi_{cadre}$$

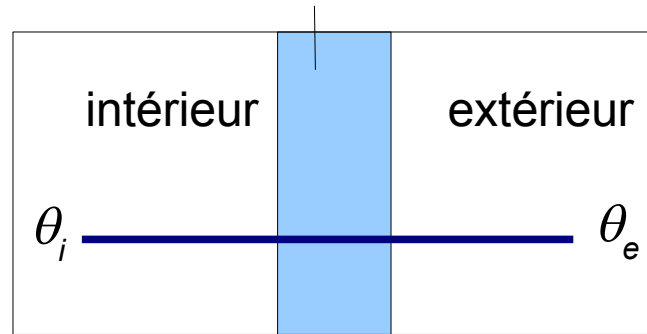
$$\Phi_{porte} = S_{porte} \times \varphi_{porte}$$

donc

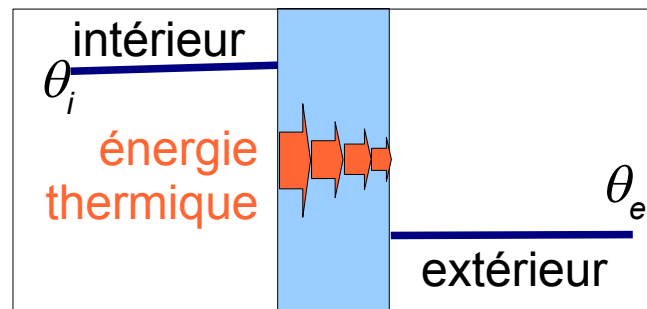
$$\Phi_{i \rightarrow e} = S_{mur} \times \varphi_{mur} + S_{vitre} \times \varphi_{vitre} + S_{cadre} \times \varphi_{cadre} + S_{porte} \times \varphi_{porte}$$

Régime permanent

Paroi

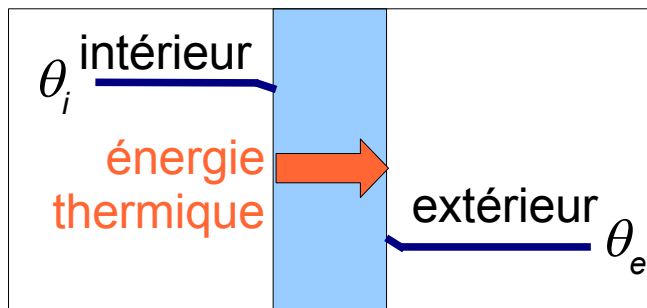


Etat **initial** : local non chauffé : les températures intérieure et extérieure sont égales, le flux thermique est nul



régime **transitoire** :

On a élevé la température intérieure (mise en route du chauffage). De l' énergie thermique se propage à travers la paroi, qui se réchauffe progressivement en absorbant une partie de cette énergie.



régime **permanent** :

Les températures restent constantes.
La paroi n'absorbe plus d'énergie thermique.
Le flux thermique est le même à travers toute la paroi

Mise en route du chauffage dans un local

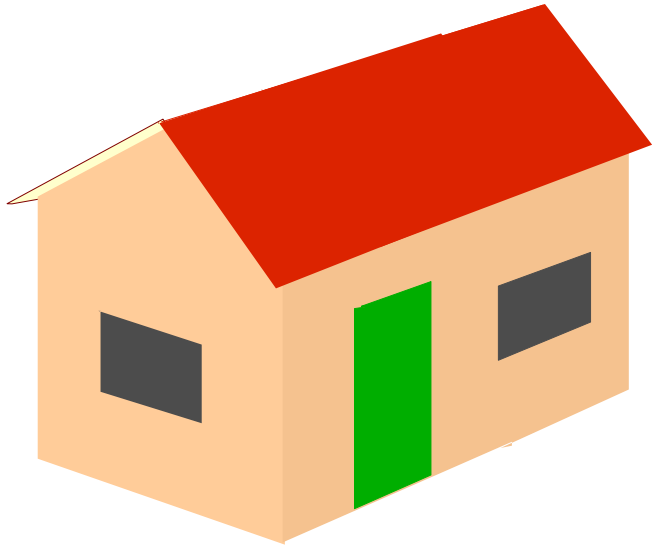


Lors d'une étude d'isolation thermique, on étudie toujours **un régime permanent**

Les conditions suivantes seront donc toujours considérées comme respectées :

(1) Températures intérieure et extérieure constantes au cours du temps

(2) Flux thermique ayant la même valeur dans toute l'épaisseur de la paroi



La température intérieure reste constante quand la puissance fournie par le chauffage est égale au flux thermique total Φ sortant du bâtiment

Exercice I de la fiche
« Exercices Thermique 2020 »

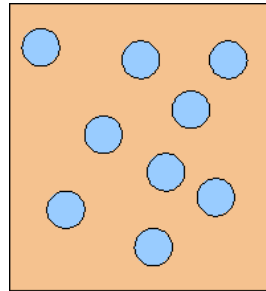
3. Modes de transfert thermique

Trois phénomènes physiques différents peuvent être à l'origine d'un transfert thermique.

Ce sont les trois modes de transfert thermique :

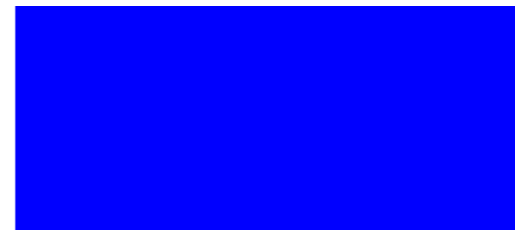
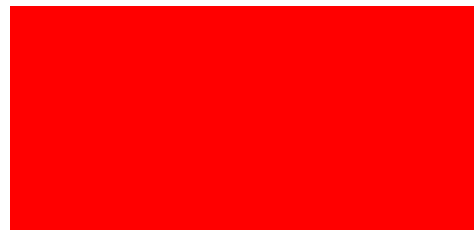
- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

➤ **Conduction** : l'énergie est transférée de proche en proche, par contact. les liquides sont cependant moins bon conducteurs thermiques que les solides, et les gaz sont de très mauvais conducteurs



Agitation thermique
désordonnée des particules
dans la matière

➤ Zones de température différente dans un matériau
⇒ **Transfert thermique par conduction.**

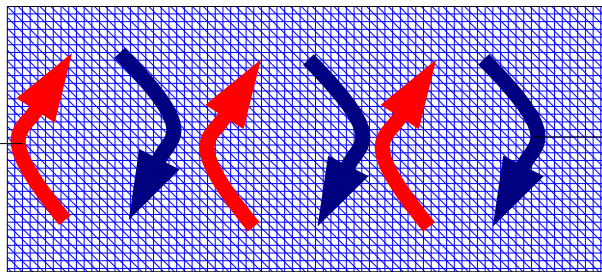


♦ **Convection** : le transfert d'énergie est assuré par le déplacement des atomes ou molécules de fluide. C'est un mode de transfert très efficace.

2 types de convection :

♦ **Convection naturelle** :
mouvements spontanés dans un fluide dont la température n'est pas uniforme.

Le fluide
plus chaud,
moins dense,
s'élève



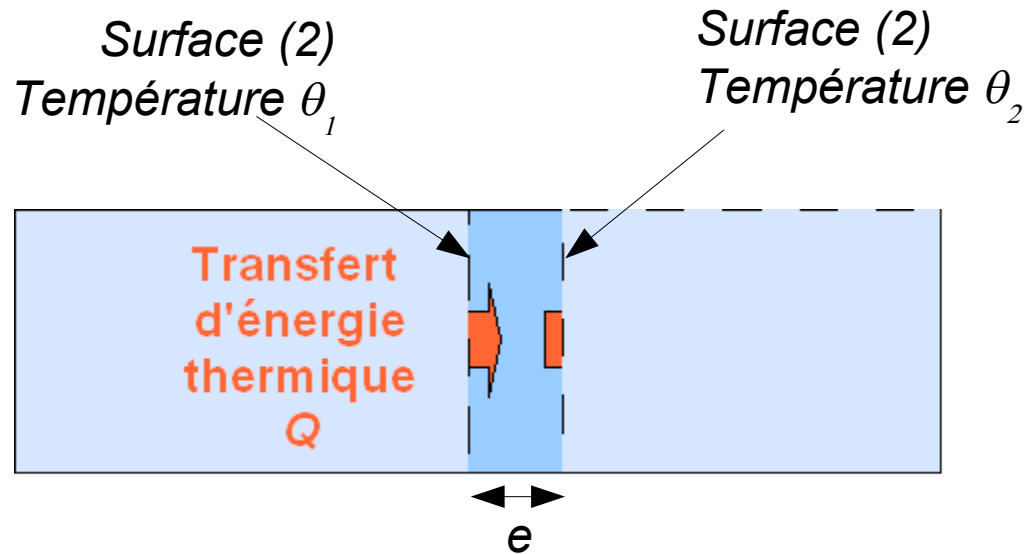
Le fluide
plus froid,
plus dense,
descend

Rouleaux de convection

♦ **Convection forcée**
Brassage mécanique du fluide

➤ **Rayonnement** : l'énergie est transférée par rayonnement électromagnétique (infra-rouge essentiellement). Ce transfert peut s'effectuer à travers tout milieu transparent au rayonnement, notamment le vide et l'air

4. Transfert par conduction à travers une paroi plane



Flux thermique à travers une couche d'épaisseur e de matériau homogène
 $W.m^{-1}.K^{-1}$ ou $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{\lambda}{e} \times (\theta_1 - \theta_2)$$

$W.m^{-2}$ — λ — K ou $^{\circ}C$

m

λ est la **conductivité thermique** du matériau

Pour retenir cette relation : le flux thermique surfacique à travers une couche de matériau homogène d'épaisseur e est

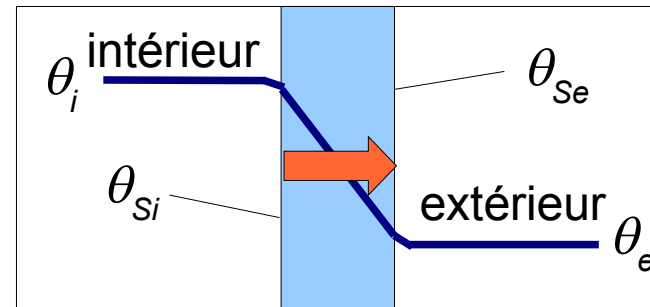
- ◆ Proportionnel à l'écart de température entre les deux côtés de l'élément de matériau considéré : le flux est d'autant plus grand que l'écart de température est important
- ◆ Inversement proportionnel à l'épaisseur e de cet élément : le flux est d'autant plus grand que l'épaisseur est faible
- ◆ Proportionnel à la conductivité thermique du matériau : le flux est d'autant plus grand que λ est grand, c'est à dire que le matériau est bon conducteur

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{\lambda}{e} \times (\theta_1 - \theta_2)$$

Valeurs de λ en $W.K^{-1}.m^{-1}$ pour quelques solides

Matières plastiques	0,13 à 0,4
Plastiques alvéolés	0,03
Laine de roche	0,04
Béton	2
Verre	1,1 à 1,4
Aluminium	230
Cuivre	390
Glace	2,1

Pour une paroi plane homogène on aura donc, en régime permanent :



$$\Phi_{i \rightarrow e} = \frac{\lambda}{e} \times (\theta_{Si} - \theta_{Se})$$

θ_{Si} et θ_{Se} sont les températures superficielles, respectivement intérieure et extérieure, de la paroi.

Exemple :

Les deux faces d'une plaque d'épaisseur 8,0 mm ont pour températures respectives, supposées constantes, 15°C et 25°C.

1. Déterminer la densité de flux thermique φ à travers la plaque

a. si la plaque est en plâtre ($\lambda_{\text{plâtre}} = 0,46 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

$$\varphi_{\text{plâtre}, 1 \rightarrow 2} = \frac{\lambda_{\text{plâtre}}}{e} \times (\theta_1 - \theta_2) = \frac{0,46}{0,008} \times 10 = 575 \text{ W.m}^{-2}$$

b. si la plaque est en polystyrène expansé ($\lambda_{\text{polystyrène}} = 0,038 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

$$\varphi_{\text{poly}, 1 \rightarrow 2} = \frac{\lambda_{\text{poly}}}{e} \times (\theta_1 - \theta_2) = \frac{0,038}{0,008} \times 10 = 47,5 \text{ W.m}^{-2}$$

2. Calculer le flux thermique à travers 1,0m² de chacune de ces plaques

$\phi = S \times \varphi$ soit 575 W pour le plâtre et 47,5 W pour le polystyrène

3. Quelle devrait être la surface de la plaque de polystyrène pour qu'elle soit traversée par le même flux thermique que 1,0m² de plaque de plâtre ?

12m²

4. Quelle devrait être l'épaisseur de la plaque de plâtre pour que la densité de flux thermique soit la même à travers cette plaque qu'à travers la plaque de polystyrène de 8,0mm d'épaisseur ?

97 mm

5. Résistance thermique et coefficient de transmission thermique

Pour une paroi plane quelconque, en **régime permanent**, on admet que le flux est toujours proportionnel à la différence des températures superficielles :

$$\varphi_{i \rightarrow e} = U \times (\theta_{Si} - \theta_{Se})$$

- ◆ Le terme U est appelé "**coefficient de transmission thermique**" de la paroi . Il s'exprime en $W.K^{-1}.m^{-2}$
- ◆ Son inverse $\frac{1}{U}$ exprimé en $K.m^2.W^{-1}$ est appelé

résistance thermique pour 1m² ou parfois, de manière impropre, "résistance thermique surfacique" de la paroi.

On le notera dans la suite R .

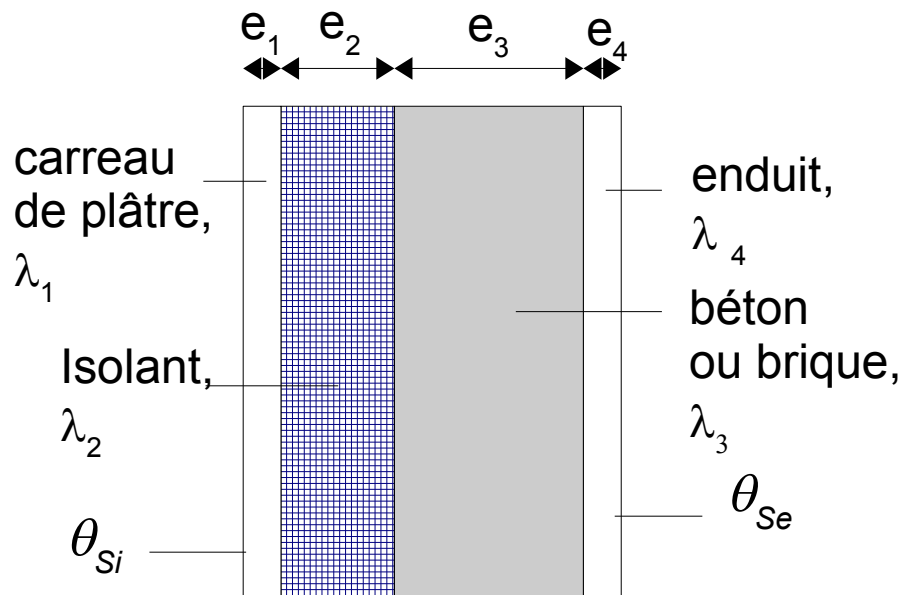
$$(\theta_{Si} - \theta_{Se}) = R \times \varphi_{i \rightarrow e}$$

Exercice II de la fiche
« Exercices Thermique 2020 »

- ◆ Pour une paroi plane homogène

$$U = \frac{\lambda}{e} \quad \text{et} \quad R = \frac{e}{\lambda}$$

- ◆ On devra déterminer U ou R pour une paroi composée d'un assemblage de matériaux différents comme dans l'exemple



En écrivant que le flux thermique est le même à travers chacune des couches et la paroi entière, on montre alors que

$$R = \frac{\theta_{Si} - \theta_{Se}}{\Phi_{i \rightarrow e}} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4}$$

D'une manière générale, **les résistances thermiques pour 1m² de couches de matériaux placées les unes à la suite des autres sur le trajet du flux thermique, s'additionnent.**

$$R = \sum \frac{e_n}{\lambda_n} = \sum R_n$$

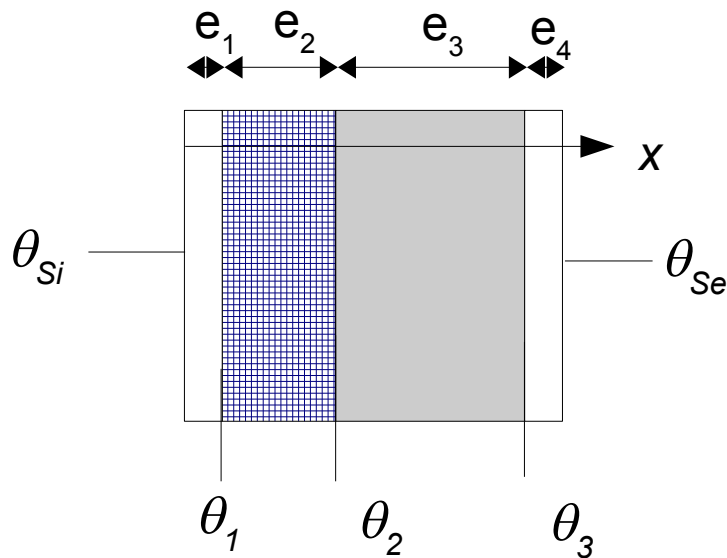
On peut faire une analogie entre la résistance thermique et la résistance électrique : la "résistance thermique équivalente" à un ensemble de couches placés "en série " sur le trajet du flux thermique, est égale à la somme de toutes leurs résistances thermiques

Attention :

les R s'additionnent dans ce cas, **mais** les U **ne** s'additionnent **pas**.

(On a $\frac{1}{U} = \sum \frac{1}{U_n} = \sum \frac{e_n}{\lambda_n}$)

Exercice III de la fiche
« Exercices Thermique 2020 »



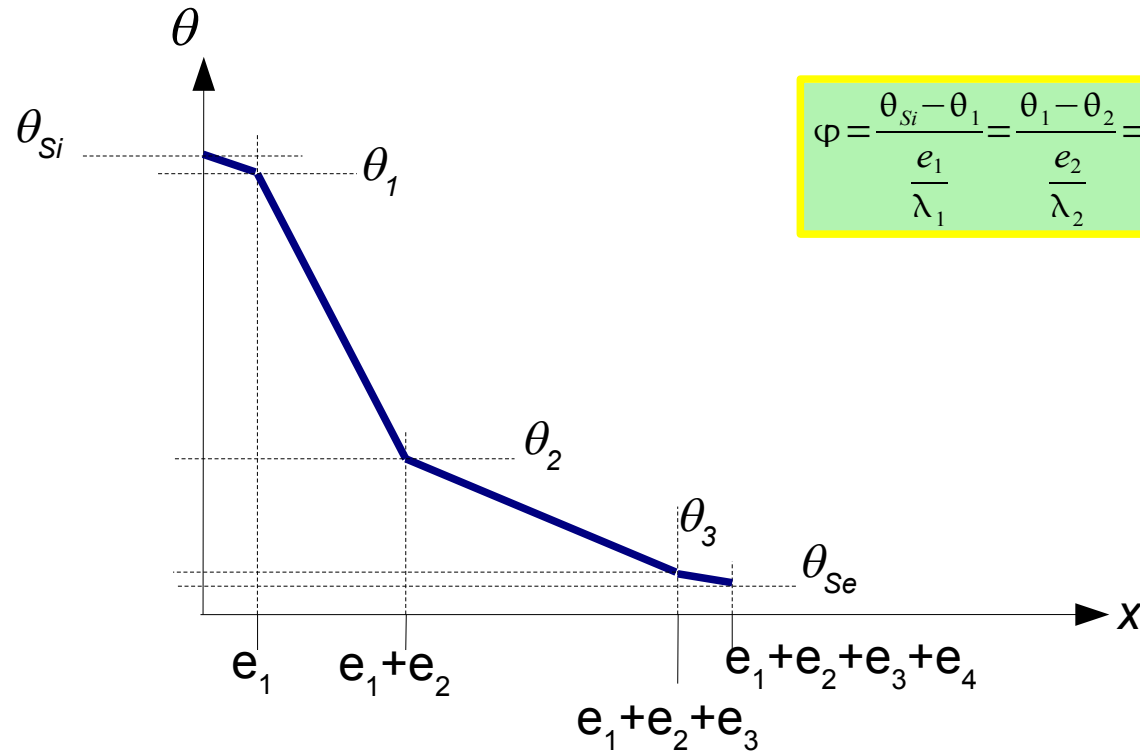
La conservation du flux à travers la paroi entraîne que

la différence de température entre les deux faces d'une couche est proportionnelle à sa résistance thermique pour 1m^2 $\frac{e}{\lambda}$

$$\Delta \theta = \varphi \times \frac{e}{\lambda}$$

L'écart de température est donc d'autant plus grand que la couche est isolante.

Diagramme des températures à l'intérieur de la paroi



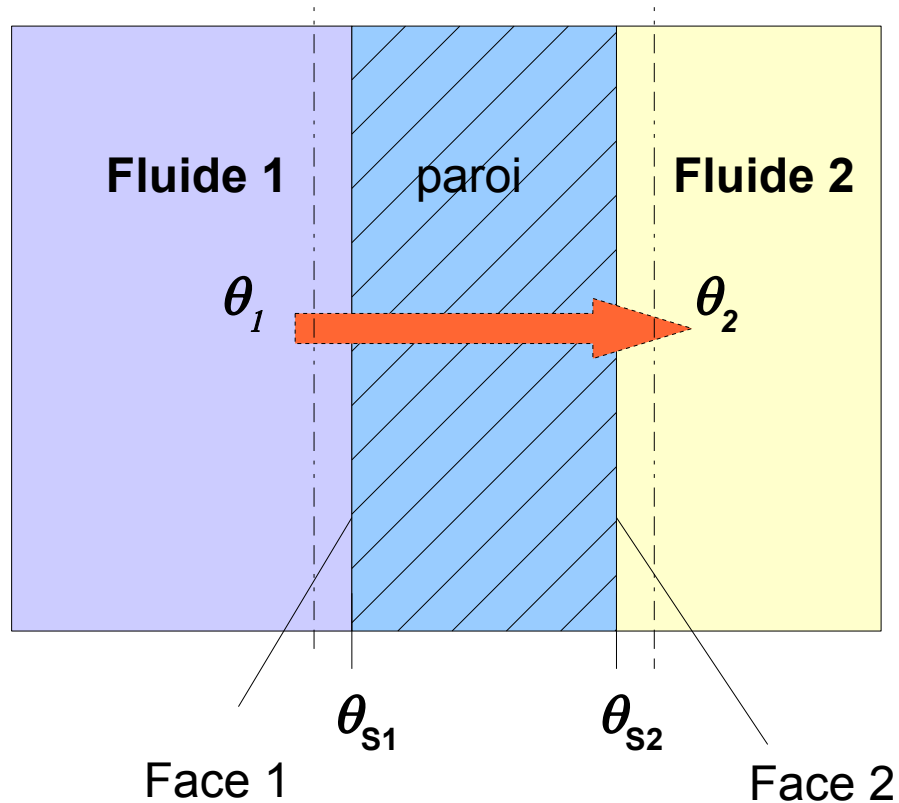
$$\varphi = \frac{\theta_{Si} - \theta_1}{\frac{e_1}{\lambda_1}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{e_2}{\lambda_2}} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{\frac{e_3}{\lambda_3}} = \frac{\theta_3 - \theta_{Se}}{\frac{e_4}{\lambda_4}}$$

Le coefficient directeur du n-ième segment de la courbe des températures est égal à

$$\frac{-\varphi_{i \rightarrow e}}{\lambda_n}$$

Exercice IV de la fiche
« Exercices Thermique 2020 »

4. Prise en compte des échanges en surface



Modèle simplifié pour les échanges, en régime permanent :

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = h_1 \times (\theta_1 - \theta_{s1})$$

et

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = h_2 \times (\theta_{s2} - \theta_2)$$

h_1 et h_2 sont les **coefficients d'échange superficiels** des faces 1 et 2 de la paroi respectivement.

Ils s'expriment en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

♦ h est d'autant plus élevé que l'échange est efficace

♦ On peut définir également les

résistances thermiques superficielles pour 1m²

de chacune des faces, r_{s1} et r_{s2} .

$$r_{s1} = \frac{1}{h_1}$$

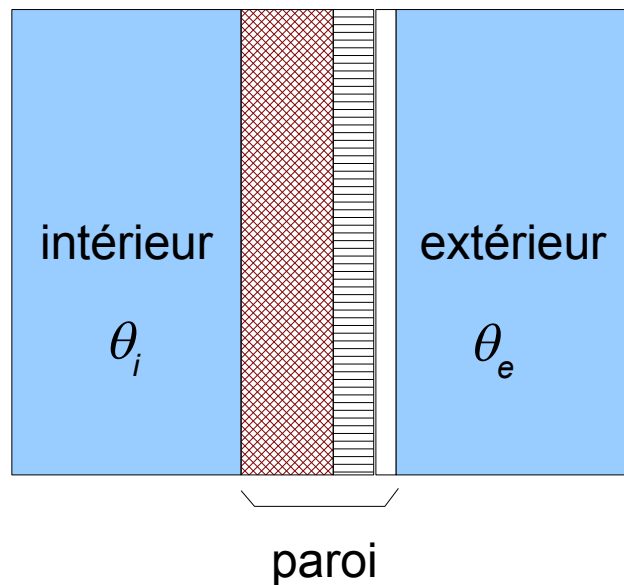
et

$$r_{s2} = \frac{1}{h_2}$$

Les r_s s'expriment en m².K.W⁻¹

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{\theta_1 - \theta_{s1}}{r_{s1}} = \frac{\theta_{s2} - \theta_2}{r_{s2}}$$

Résistance thermique pour 1m^2 , en tenant compte des résistances superficielles



$$R = r_{Si} + \sum \frac{e_n}{\lambda_n} + r_{Se}$$

équivalent à

$$R = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}$$

On a alors $\theta_i - \theta_e = R \times \varphi_{i \rightarrow e}$

Coefficient de transmission thermique de la paroi, en tenant compte des résistances superficielles:

$$U = \frac{1}{r_{Se} + \sum \frac{e}{\lambda} + r_{Si}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

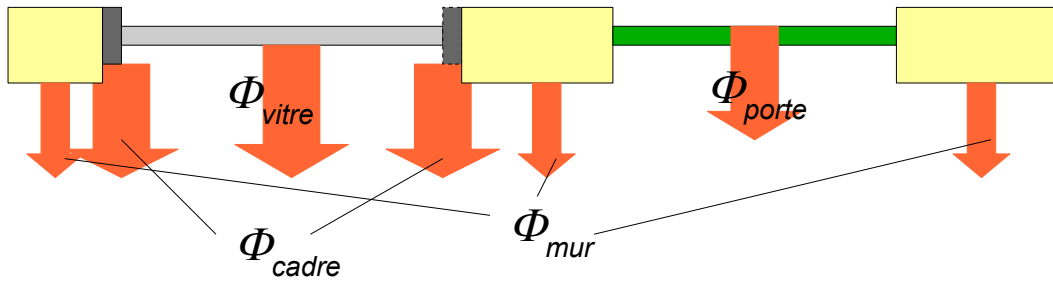
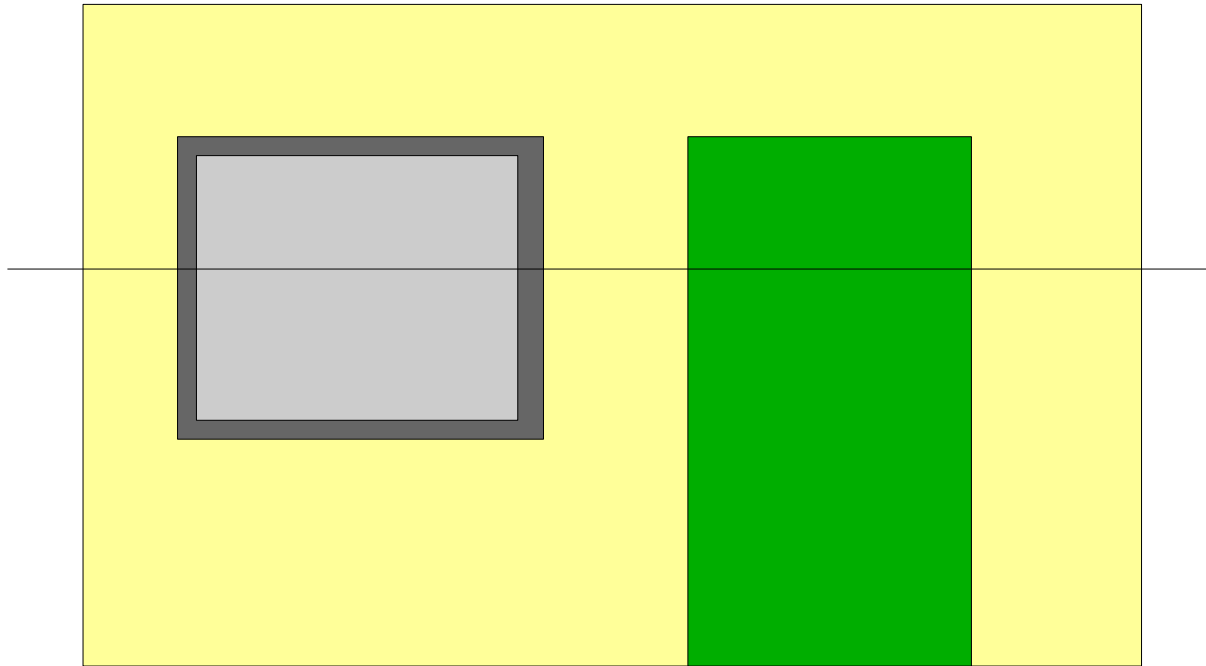
avec

$$\varphi_{i \rightarrow e} = U \times (\theta_i - \theta_e)$$

Remarque :

Négliger les résistances superficielles ($r_{Si} = r_{Se} = 0$) revient à considérer que $\theta_{Si} = \theta_i$ et $\theta_{Se} = \theta_e$

7. Résistance thermique globale d'une façade



Résistances thermiques globale R_g

◆ Définition :

$$R_g = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{\Phi_{i \rightarrow e}} \quad \text{en K.W}^{-1}$$

◆ Calcul pour une façade uniforme :

Pour une surface S_{mur} de mur,
de résistance thermique pour 1m^2 R_{mur} :

$$R_{g, mur} = \frac{R_{mur}}{S_{mur}} = \frac{1}{U_{mur} \times S_{mur}}$$

Calcul de R_s pour une façade

- ◆ Diverses formules de calcul de R_s pour l'exemple de façade décrit précédemment

$$R_g = \frac{1}{U_{mur} \times S_{mur} + U_{vitre} \times S_{vitre} + U_{cadre} \times S_{cadre} + U_{porte} \times S_{porte}}$$

$$R_g = \frac{1}{\frac{S_{mur}}{R_{mur}} + \frac{S_{porte}}{R_{porte}} + \frac{S_{cadre}}{R_{cadre}} + \frac{S_{vitre}}{R_{vitre}}}$$

$$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_{g,mur}} + \frac{1}{R_{g,porte}} + \frac{1}{R_{g,cadre}} + \frac{1}{R_{g,vitre}}}$$

Attention ! Les R et les R_g d'éléments placés côte à côte ne s'additionnent pas

Le R_g d'une façade est **plus petit que le plus petit des R_g des éléments.**

Les différents éléments doivent donc avoir des R_g voisins.
Un élément dont le R_g est beaucoup plus faible constitue un **pont thermique.**

Un pont thermique

- ▶ diminue considérablement la valeur du R_g de la façade
- ▶ génère une augmentation du flux thermique local, créant une sensation d'inconfort à son voisinage.