



Introduction

L'ensemble des parties d'un **bâtiment** est **soumis** aux **transferts thermiques**, qui sont des **échanges de chaleur** entre le **milieu chaud** et le **milieu froid** (entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment). La **connaissance** et la **maîtrise** de ces **transferts thermiques** permettent une **meilleure gestion** de la **facture énergétique** d'un bâtiment.

I) Notions théoriques

1) Les différents modes de transferts de chaleur

D'après le, on peut admettre que la chaleur (ou l'énergie thermique) ne peut passer que d'un **corps** qui est vers un **corps à température plus**



Tant que les deux **éléments** sont en **liaison** entre eux, il y a jusqu'à ce que les deux corps soient à la ($T1=T2$).

Le transfert d'énergie ou de chaleur mentionné ci-dessus peut se produire selon 3 modes :

- Par contact : la
- A distance : le
- Mixte : la

2) La conduction

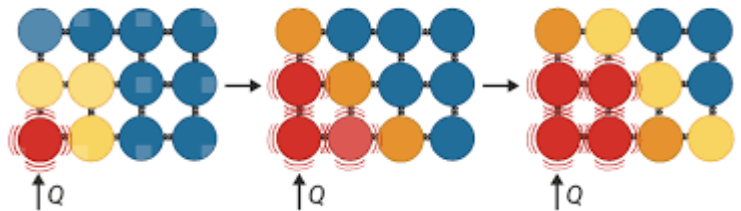
.....

.....

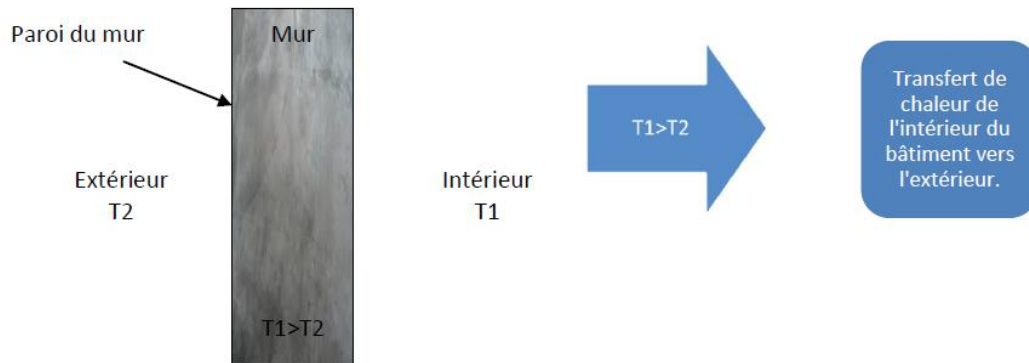


Exemple : Lorsqu'on utilise une casserole en métal, on constate qu'après un petit moment, le manche se réchauffe progressivement, alors que c'est le fond de la casserole qui est sous la source de chaleur.

La
se fait de **proche en proche**, c'est-à-dire de
..... en, dans le
métal, de l'**endroit** le
à l'**endroit** le



- On retrouve ce transfert de chaleur dans toutes les du



Ce transfert de chaleur sera d'autant plus important si :

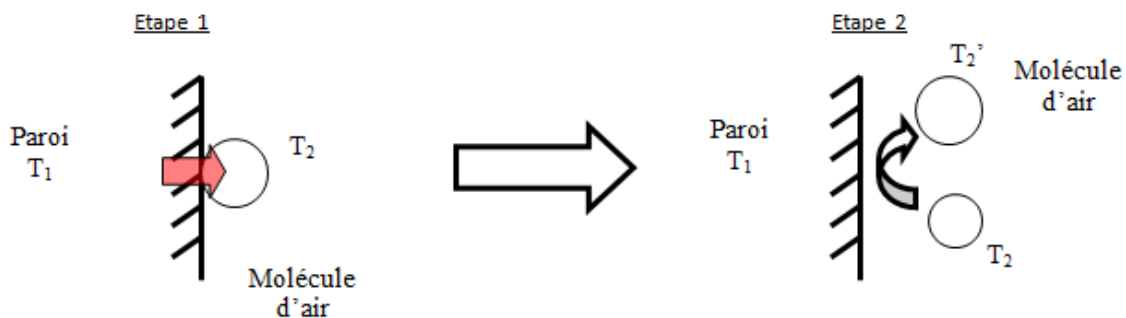
- est Pour une même température intérieure d'un local, l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur sera plus important lorsque la température extérieure est de -5°C que s'il fait $+5^{\circ}\text{C}$.
- Le est (pour un matériau donné).
- Le est à la Si la casserole avait un manche en bois, on ressentirait moins ce transfert de chaleur en bout de manche, étant donné que le bois conduit moins la chaleur que le métal. Les **mauvais conducteurs** (gaz, laine de verre ou polystyrène) sont appelés
- La est Une chambre possédant un mur de 15m^2 en contact avec l'extérieur perd davantage de chaleur qu'une chambre n'ayant qu'un mur de 8m^2 en contact avec l'extérieur.

3) La convection

Exemple : Chauffage d'un local à la température T_2 par un radiateur à la température T_1 ($T_1 > T_2$). L'air de la pièce se réchauffe au contact de la paroi du radiateur ce qui réchauffe la pièce entière.

Il y a en fait transfert de chaleur par conduction entre une molécule d'air et la paroi en contact (étape 1, l'énergie est transférée du radiateur vers l'air vu que $T_1 > T_2$). La chaleur gagnée par la molécule d'air fait que

sa température augmente et sa masse volumique diminue. L'air ainsi chauffé devient alors plus léger et s'élève, laissant sa place à une autre molécule (étape2). Le cycle peut alors continuer.



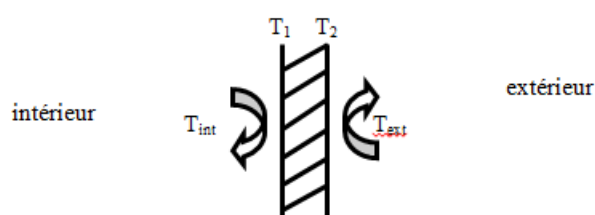
Exemple : Lorsque que l'on met ses mains au-dessus d'un feu, on ressent de l'air chaud. En effet, celui-ci est produit par convection. La convection se fait grâce aux molécules d'air (dioxygène, diazote) qui se trouvent au-dessus du feu ; ces molécules montent vers le haut, où il fait plus froid (lors de leur montée, elles entrent en contact avec la main, d'où la sensation de chaleur).

Exemple : Lorsqu'on souffle sur une cuillerée de soupe brûlante, elle refroidit plus vite (les molécules du fluide chaud sont remplacées par de nouvelles molécules à plus basse température).

Application : On retrouve ce **transfert de chaleur** sur toutes les **parois** d'un **bâtiment** et **l'air environnant** (air intérieur et extérieur).

On retrouve ce phénomène aussi dans les de la maison (..... et **plancher chauffant**), ainsi que dans les **échangeurs** (convection côté air mais aussi côté eau).

Paroi d'une chambre en contact avec l'extérieur : en effet, **l'air intérieur** à la température **T_{int}** donne de la **chaleur** à la **paroi** qui est à la **température T₁** (**T_{int} > T₁**). **L'air intérieur** se **refroidit** et sa **masse volumique augmente** donc **l'air descend**. De même de l'autre côté à **l'extérieur**, **l'air** se **réchauffe** au contact de la paroi et s'élève (**T₂ > T_{ext}**).



Ce transfert de chaleur sera d'autant plus important si :

- La de la est Une surface de paroi d'un radiateur de 2m^2 en contact avec l'air intérieur de la pièce échange d'avantage d'énergie qu'une surface de $0,5\text{m}^2$.
- **L'écart de température** est Plus **l'écart de température** entre les **parois du radiateur** et **l'air** est **élevé** et plus **l'échange d'énergie** le sera aussi.
- Le fluide est capable de prélever ou céder de la chaleur. Certains **fluides** sont de **nature à échanger beaucoup plus d'énergie thermique** que d'autre pour les mêmes conditions d'utilisation (l'eau échange plus d'énergie que l'air).

Remarque : On distingue 2 types de convection :

- La **convection**: le mouvement du fluide est simplement la conséquence de la variation de la masse volumique du fluide.
- La **convection**: le mouvement de fluide est la conséquence d'une action extérieure (ventilateur ou pompe).

4) Le rayonnement

.....
.....
.....

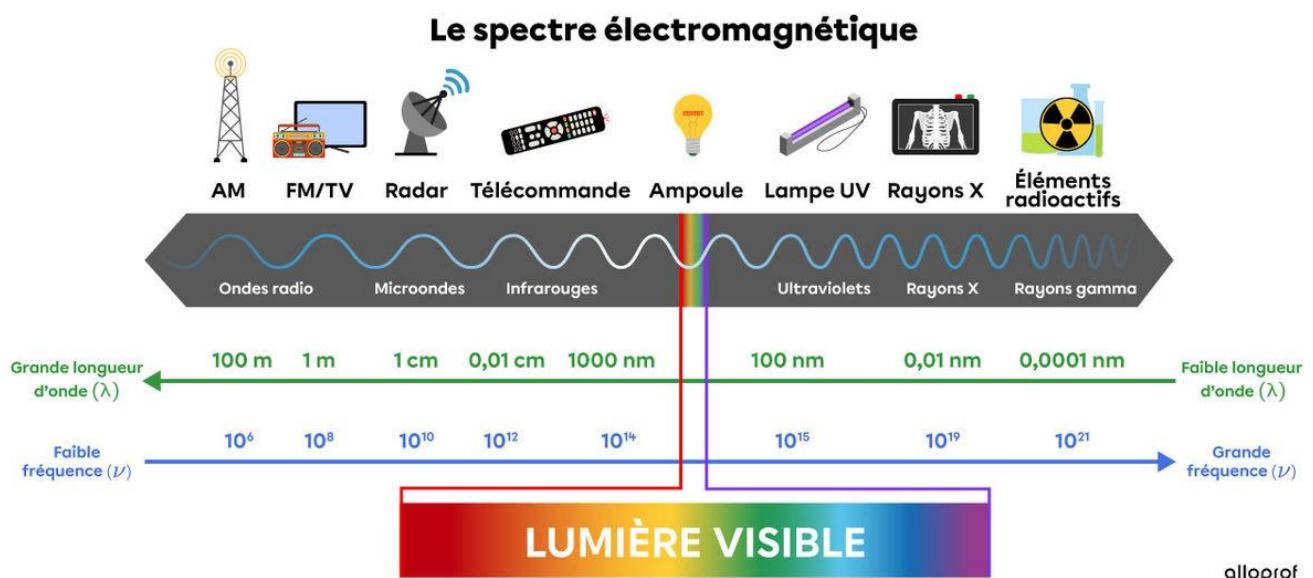
Exemple : une voiture garée en plein soleil l'été. Lorsque l'on gare une voiture en plein soleil, la carrosserie se réchauffe et voit sa température augmenter considérablement (plus de 60°C). Pourtant, il n'y a aucun échange de chaleur par contact (conduction), et de plus l'air environnant est à température inférieure (35°C) et donc une quantité d'énergie thermique à la carrosserie par convection faible. Il y a en fait transfert de la chaleur par rayonnement entre le soleil et la carrosserie.

Remarque :, dont la, est, au,
(0° Kelvin équivaut à - 273°C) **émet** un Celui-ci est **émis** et
reçu en **permanence** par **plusieurs corps** séparés entre eux par une **ambiance transparente** ou **semi transparente** (vide, gaz, air).

Ainsi, les échanges thermiques par rayonnement entre plusieurs corps dépendent de :

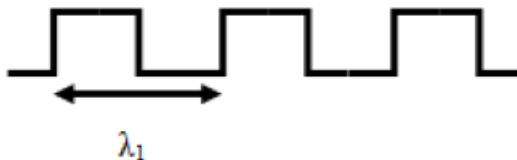
-
-
-

Afin de mieux expliquer leurs caractéristiques, l'ensemble des **ondes électromagnétiques** connues sont répertoriées et présentées dans le **spectre électromagnétique**. Le spectre électromagnétique est une classification qui présente l'ensemble des ondes électromagnétiques selon leur **longueur d'onde** et leur **fréquence**.



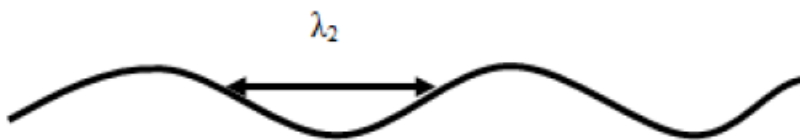
Suivant la température des corps, il existe deux types de rayonnement électromagnétique :

- Le rayonnement des corps « chauds » (soleil $T = 6000\text{ }^{\circ}\text{K}$), qui produit un



Avec λ_1 longueur d'onde petite

- Le rayonnement des corps à « température courante » (0°C - 1000°C), qui émet un



Avec λ_2 longueur d'onde grande

Application : Ce transfert de chaleur est omniprésent dans le bâtiment, on le retrouve par exemple :

- Entre
- Entre
- Entre

Cette multitude d'échanges thermiques qui intervient par rayonnement en fait un transfert de chaleur extrêmement compliqué.

II) Quantification des transferts thermiques

Pour pouvoir nos différents (**radiateurs, chaudières, climatisation, etc.**) à **installer**, il faut pouvoir (calculer) les vus précédemment. On définit pour cela 2 grandeurs :

-
-

Flux de chaleur : Le flux de chaleur représente la **quantité d'énergie Q** ([J] ou [W/s]) **échangée** par **unité de temps t** [s]. On peut l'appeler aussi **puissance**. Il est noté **Φ** et son unité est le **Watt [W]**.

Densité de flux de chaleur : La densité de flux de chaleur représente le **flux de chaleur** ramené à l'unité de **surface**. Elle est notée **ϕ** et son unité est le **[W/m²]** : **$\phi = \frac{\Phi}{s}$**

Cas d'étude : Pour les calculs des flux thermiques, nous utiliserons pour les exemples, le cas d'un bâtiment, où les transferts de chaleur s'effectuent sur ses parois.

1) Flux de chaleur par conduction

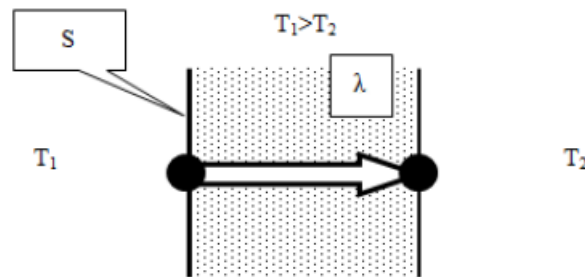
On ne s'intéresse ici qu'à notre cas d'étude, c'est-à-dire à des parois planes de type dans le cadre du régime permanent (.....).

a) Loi de FOURIER

La **loi de Fourier** (1807) décrit le phénomène de, c'est-à-dire la description de la de la à travers un Fourier a découvert que le qui traverse un matériau d'une face A à une face B est àentre les deux faces.

Rappel : La valeur du **flux de chaleur** par **conduction** à travers une paroi est plus **grande** si :

- La **surface d'échange** est **importante**,
- L'**écart de température** de part et d'autre de la paroi est **grand**,
- La **nature du matériau** est **favorable** au transfert de chaleur,
- L' de la **paroi** est **faible**.



$$\Rightarrow \Phi_{CD} = \frac{(T_1 - T_2) \times S \times \lambda}{e}$$

Avec :

- Φ_{CD} : **Flux de chaleur** cédé par conduction [W]
- S : **Surface** d'échange en [m²]
- T1 - T2 : **Ecart de température** entre les points 1 et 2 en [°C] ou [K]
- e : **Epaisseur** de la paroi en [m]
- λ : **Coefficient de conductivité thermique** du matériau [W.m⁻¹.K⁻¹]

b) Coefficient de conductivité thermique λ

Le **coefficient de conductivité thermique** est une **caractéristique physique** du **matériau** qui exprime la **capacité** d'un **corps** à Il est noté λ et son unité est le [W.m⁻¹.K⁻¹].

En toute rigueur, le coefficient de conductivité thermique d'un matériau varie en fonction de plusieurs paramètres tels que la température ou l'humidité. Cependant, cette **variation étant faible** dans le cadre de nos applications (paroi d'un bâtiment), on le **considèrera**

Cours : Transferts thermiques

La densité du flux de chaleur par conduction peut être exprimée de la manière suivante :

$$\varphi_{CD} = \frac{\Phi_{CD}}{S}$$

$$\varphi_{CD} = \frac{(T1 - T2) \times S \times \frac{\lambda}{e}}{S}$$

$$\text{➤ } \varphi_{CD} = \frac{\lambda}{e} \times (T1 - T2)$$

Exemple de valeur de λ pour différents matériaux :

	sec	hum.		Conductivité thermique des matériaux λ en W/m.K
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane	
	0,040		laine minérale, liège	
	0,058		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1000 kg/m ³	
	0,54	0,75	briques 1000-1600 kg/m ³	
	0,90	1,1	briques 1600-2100 kg/m ³	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux	45		acier	
	203		aluminium	
	384		cuivre	

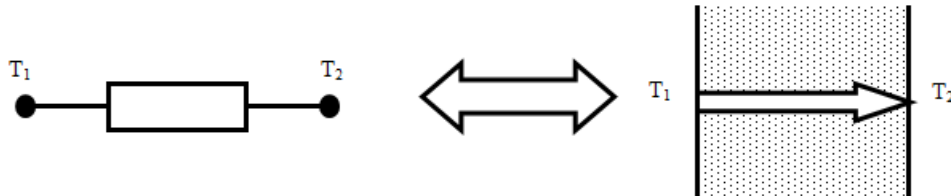
c) Résistance thermique R_{CD}

La **résistance thermique** d'un **matériau** exprime la **capacité** du **matériau** à
au qui le traverse. Elle est notée **R_{CD}** son unité est [**m².K.W⁻¹**].

La **résistance thermique** pour la **conduction** est alors équivalente à :

$$\text{➤ } R_{CD} = \frac{e}{\lambda}$$

Nous pouvons faire une **analogie** entre les **résistances électriques** et les **résistances thermiques**. Ainsi, le mur peut être schématisé par une résistance.



d) Coefficient de transmission thermique surfacique U

Bien souvent, la **paroi** est **caractérisée** non pas par sa faculté à s'opposer au flux de chaleur mais bien au contraire par son **aptitude** à En d'autres termes, le **coefficient de transmission thermique surfacique** est l'**inverse** de la Ce coefficient est noté **U** son unité est le [**W.m⁻².K⁻¹**] :

$$\triangleright U = \frac{1}{R}$$

Expression du flux de chaleur :

$$\Phi_{CD} = \varphi_{CD} \times S$$

$$\Phi_{CD} = \frac{(T1 - T2) \times S}{R}$$

$$\triangleright \Phi_{CD} = U \times S \times (T1 - T2)$$

2) Flux de chaleur par convection et rayonnement

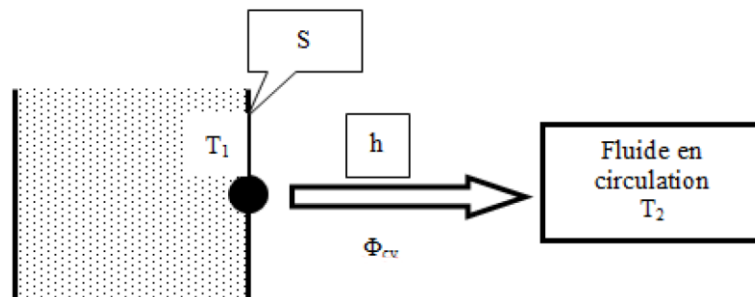
On retrouve ce **transfert de chaleur** quasiment **tout le temps**. On ne s'intéressera ici qu'à notre cas d'étude, c'est-à-dire aux **parois planes type bâtiment**.

a) Calcul du flux convectif

De la même manière qu'en conduction, une relation permet de **relier la valeur du flux de chaleur par convection en fonction des caractéristiques de l'échange**.

Rappel : La **valeur du flux de chaleur par convection** entre une **paroi** et un **fluide** environnant est **plus grande** si :

- La **surface d'échange** est **grande**,
- L'**écart de température** entre la **paroi** et le **fluide** est **important**,
- La **capacité du fluide** à prélever ou céder de la chaleur.



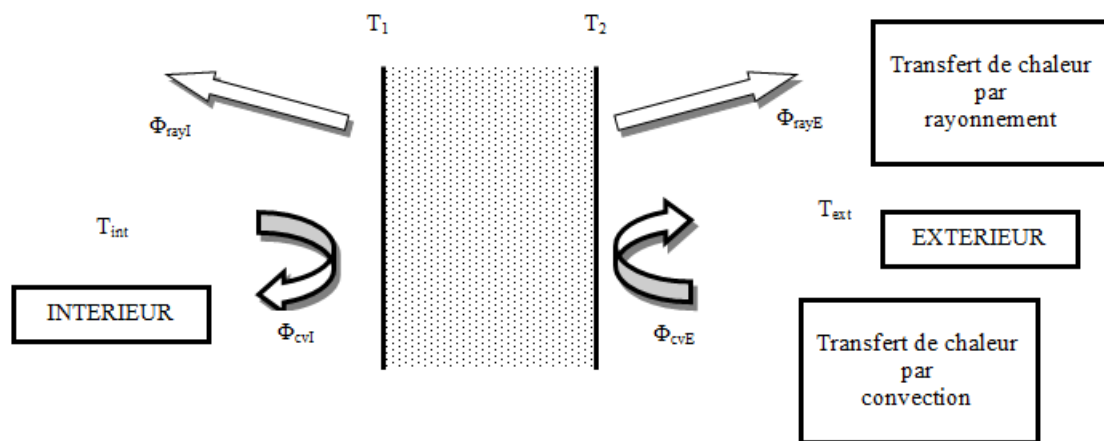
$$\text{➤ } \Phi_{cv} = h \times S \times (T1 - T2)$$

Avec :

- Φ_{cv} : **Flux de chaleur** cédé par convection [W]
- S : **Surface** d'échange en [m²]
- $T1 - T2$: **Ecart de température** entre les points 1 et 2 en [°C] ou [K]
- h : **Coefficient d'échange convectif** [W.m⁻².K⁻¹]

Ci-dessus, nous avons simplement **représenté** et **calculé** le **transfert de chaleur** par **convection**. Cependant dans la réalité, les **parois du bâtiment** sont **également soumises** à des **échanges thermiques** par Il convient donc de **tenir compte** de ce **phénomène** dans l'écriture des **échanges thermiques** entre une **paroi** et l'**air environnant**.

b) Calcul du flux radio-convectif



$$\Phi = \Phi_{RAY} + \Phi_{CV}$$

Si paroi intérieure	Si paroi extérieure
$\Phi_I = \Phi_{RAY_I} + \Phi_{CV_I}$ $\Phi_I = h_{SI} \times S \times (T_i - T_1)$	$\Phi_E = \Phi_{RAY_E} + \Phi_{CV_E}$ $\Phi_E = h_{SE} \times S \times (T_2 - T_e)$

Avec :

- h_{SI} : coefficient d'échange superficiel côté intérieur
- h_{SE} : coefficient d'échange superficiel côté extérieur

c) Résistances thermiques d'échanges superficiels

La **résistance thermique** d'échanges superficiels d'une paroi est l'**inverse** des **coefficients d'échanges** superficiels. Elle est notée **R_{SE}** pour l'**extérieur** et **R_{SI}** pour l'**intérieur** et son unité est [**m².K.W⁻¹**].

Et on a : $R_{SE} = \frac{1}{h_{SE}}$ et $R_{SI} = \frac{1}{h_{SI}}$

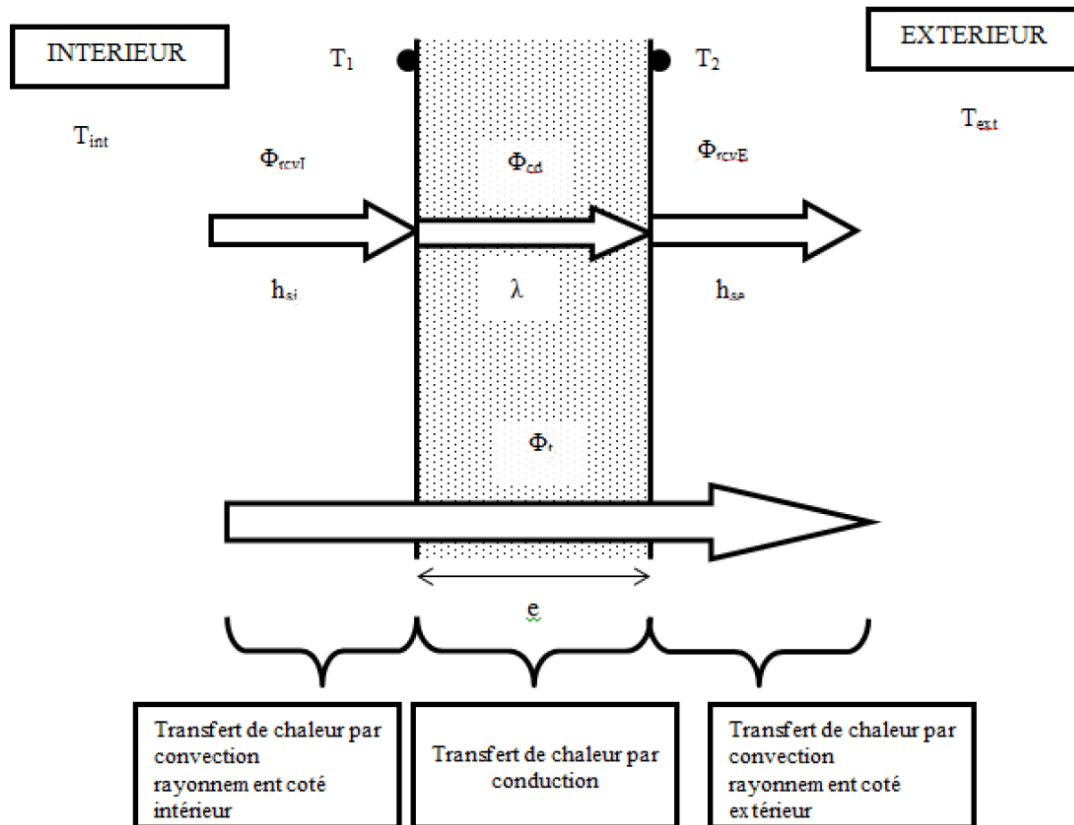
Tableau de valeur par défaut des résistances superficielles.

RESISTANCES SUPERFICIELLES (en m2.K/W)						
TYPE DE PAROIS & SENS DU FLUX	Parois donnant sur l'extérieur, un passage ou local ouvert			Paroi donnant sur un local fermé attenant chauffé ou pas		
	Rsi	Rse	Rsi+Rse	Rsi	Rse = Rsi	ΣRsi
FLUX HORIZONTAL (Ex. murs) (Inclinaison > 60°) 	0,130	0,040	0,170	0,130	0,130	0,260
FLUX ASCENDANT (Ex. Plafond, toiture terrasse) (Inclinaison < 60°) 	0,100	0,040	0,140	0,100	0,100	0,200
FLUX DESCENDANT (Ex. plancher) (Inclinaison < 60°) 	0,170	0,040	0,210	0,170	0,170	0,340

3) Résistance thermique globale d'une paroi

Dans toute l'étude, on se place dans le cadre du **régime permanent**, c'est-à-dire que l'on considère les **températures (intérieures, extérieures et de surface)** comme **constante** puisque l'**énergie perdue** à travers la **paroi** est entièrement **complétée** par l'**apport d'énergie** du **corps de chauffe**.

a) Cas d'une paroi simple



Rappel :

	Convection rayonnement côté intérieur	Conduction	Convection rayonnement côté extérieur
Flux de chaleur	$\Phi_I = h_{SI} \times S \times (T_i - T_1)$	$\Phi_{CD} = \frac{\lambda}{e} \times S \times (T_1 - T_2)$	$\Phi_E = h_{SE} \times S \times (T_2 - T_e)$
Résistance thermique	$R_{THSI} = \frac{1}{h_{SI}}$	$R_{TH} = \frac{e}{\lambda}$	$R_{THSE} = \frac{1}{h_{SE}}$
Densité de flux de chaleur	$\varphi_{ICD} = h_{SI} \times (T_i - T_2)$	$\varphi_{CD} = \frac{\lambda}{e} \times (T_1 - T_2)$	$\varphi_{ECD} = h_{SE} \times (T_2 - T_e)$

Le principe de conservation de l'énergie implique que : $\Phi_t = \Phi_I = \Phi_{CD} = \Phi_E$

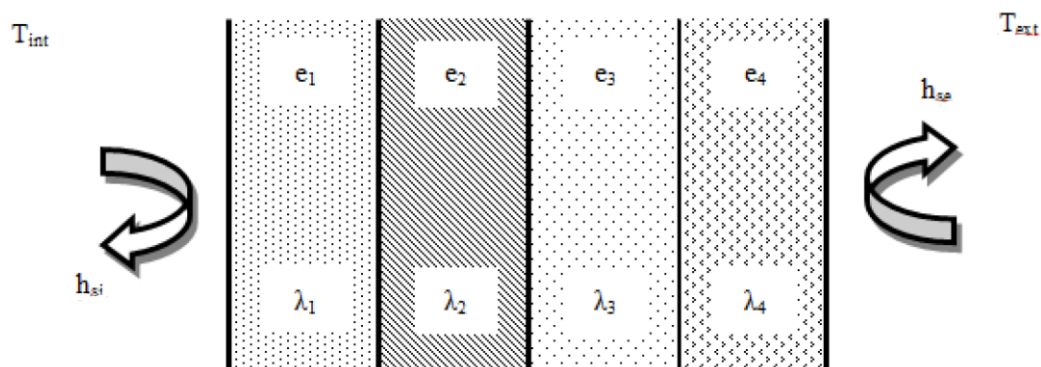
Sans réaliser la démonstration, nous avons :

$$\triangleright \Phi_t = \frac{1}{R_{Theq}} \times S \times (Ti - Te)$$

$$\triangleright R_{Theq} = R_{SI} + R_{SE} + R_{CD}$$

On retrouve la loi d'Ohm de l'équivalence électrique.

b) Cas d'une paroi multicouche



On a :

$$\triangleright R_{Theq} = R_{SI} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{SE}$$

$$R_{Theq} = \frac{1}{h_{SI}} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_{SE}}$$

$$U_g = \frac{1}{R_{Theq}}$$

$$Ti - Te = R_{Theq} \times \Phi$$

$$\triangleright \Phi = \frac{Ti - Te}{R_{Theq}}$$