

# CHAPITRE I : Thermique du bâtiment

## Phénomènes de transfert de chaleur dans le bâtiment

### 1. Introduction :

On appelle transfert de chaleur, le déplacement de la chaleur d'une région à une autre suite à une différence de température. Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud **cède** de la chaleur au système le plus froid.

Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur :

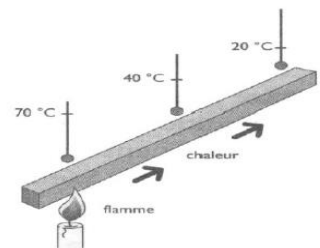
- Conduction : la chaleur passe d'un corps à un autre, par contact ;
- Convection : un corps qui se déplace emmène la chaleur qu'il contient ;
- Rayonnement : tous les corps émettent de la lumière, en fonction de leur température, et se font eux-mêmes chauffer par la lumière qu'ils reçoivent.

### 2. Transmission de chaleur par conduction :

C'est le transfert de chaleur des parties chaudes vers des parties plus froides, d'un même corps ou de deux corps en contact, sans déplacement de la matière.

La conduction thermique est le mode de propagation de l'énergie thermique à travers les matières provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière. Le déplacement de la chaleur par conduction peut avoir lieu dans les solides et les fluides.

Le barreau métallique, dont une extrémité est exposée à une flamme, s'échauffe progressivement. La chaleur chemine de proche en proche à l'intérieur du métal.



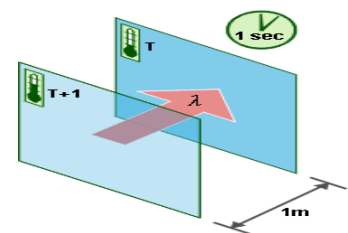
On caractérisera les matériaux par les coefficients suivants :

#### A. La conductivité thermique $\lambda$

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est une caractéristique propre à chaque matériau.

Elle indique la quantité de chaleur qui se propage :

- en 1 seconde,
- à travers 1 m<sup>2</sup> d'un matériau,
- épais d'un 1 m,
- lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (ou 1°C).



La conductivité thermique s'exprime en **W/m.K**

Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de la chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.

Voici des valeurs de la conductivité pour quelque matériau de construction.

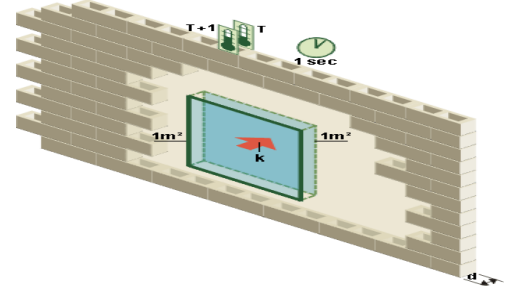
- béton de granulats plein ~ 1.75 W/m.K

- béton cellulaire ~ 0.16 à 0.33 W/m.K
- brique terre-cuite ~ 1.15 W/m.K
- pierre lourde ~ 3 W/m.K
- plâtre 0.35 W/m.K
- bois ~ 0.12 à 0.23 W/m.K
- acier ~ 52 W/m.K
- aluminium ~ 230 W/m.K

### B. Coefficient de transmission thermique K. (Conductance thermique d'un mur)

La conductance thermique (K) indique la quantité de chaleur qui se propage :

- en 1 seconde,
- à travers 1 m<sup>2</sup> d'une couche de matériau,
- d'une épaisseur déterminée,
- lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K (1 K = 1°C)



La conductance thermique s'exprime en **W/m²K**.

Plus la conductance thermique est élevée, plus la couche laisse passer la chaleur.

### C. La résistance thermique

La résistance thermique (R) est l'inverse de la conductance thermique.

$$R = \frac{1}{K}$$

Elle s'exprime en **m²K/W**

## 2.1. La loi de Fourier (loi fondamentale de la conduction)

Le transfert thermique par **conduction** s'effectue suivant **la loi de FOURIER**.

Soit un corps solide homogène ayant une section d'aire S à travers lequel passe un flux de chaleur suivant l'axe (ox). Les 2 faces de ce corps sont à des températures différentes. La première est à la température T<sub>1</sub> et la seconde à la température T<sub>2</sub> (avec T<sub>1</sub> > T<sub>2</sub>). (Voir la figure)

Le flux de chaleur par conduction traversant la section S, a pour expression :

$$q = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx}$$

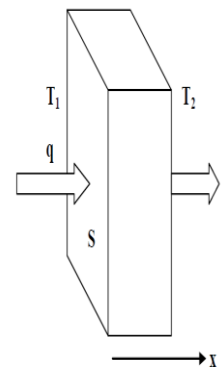
q : Le flux thermique en [W] ;

λ : La conductivité thermique [W/m°C] , [W/m°K] ;

S : La surface à travers laquelle s'écoule la chaleur [m²] ;

$\frac{dT}{dx}$  : Le gradient de température (la variation de la température par unité de longueur lorsqu'on se déplace dans la direction de propagation de la chaleur) [°C/m].

Le signe (-) est introduit, parce que le gradient de température suivant l'axe (ox)



est négatif.

### 2.1.1. Grandeurs physiques utilisées :

#### A. Flux de chaleur à travers une surface :

C'est la quantité de chaleur qui traverse la surface considérée pendant l'unité de temps. Le symbole utilisé est la lettre  $q$ . L'unité dans le système international est le Watt.

$$q = \frac{\delta \Phi}{dt}$$

#### B. Densité de flux de chaleur :

C'est la quantité de chaleur qui traverse l'unité de surface pendant l'unité de temps. C'est donc le flux de chaleur par unité de surface (ou densité de flux). On le notera  $\varphi$ . L'unité dans le système international est le Watt / m<sup>2</sup>.

$$\varphi = \frac{\delta \Phi}{s dt}$$

### 2.1.2. Conduction monodimensionnelle en régime permanent :

- Régime permanent veut dire que la température ne varie pas avec le temps (flux de chaleur constant)
- monodimensionnel : suivant une seule direction.

#### a) Mur simple

Pour le cas simple de l'écoulement de la chaleur à travers une paroi plane d'épaisseur ( $e$ ), et ses deux faces sont maintenues aux températures  $T_{p1}$  et  $T_{p2}$  on intègre l'équation de Fourier pour calculer la valeur du flux de chaleur transféré comme suit :

$$q = \frac{\lambda S}{e} (T_{p1} - T_{p2})$$

Les limites d'intégration peuvent être déterminées d'après la figure suivante, où la face gauche ( $x=0$ ) est maintenue à la température  $T_{p1}$  et la face droite ( $x=e$ ) à la température  $T_{p2}$ .

#### a.1. Application numérique :

Soit un mur d'épaisseur  $e=0.2m$ , de conductivité thermique  $\lambda=1.2W/m.K$  les deux faces de ce mur sont maintenues à les températures  $T_{intérieure}=40^{\circ}C$  et  $T_{extérieure}=30^{\circ}C$ .

Calculer le flux de chaleur transmis à travers une surface  $S=1m^2$ .

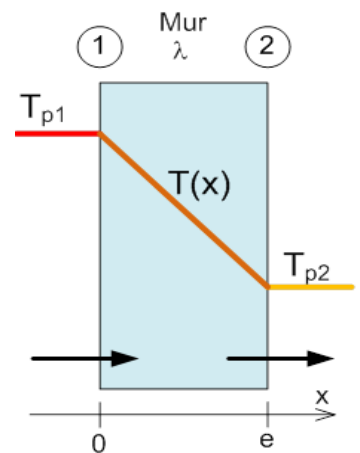
$$q = \frac{\lambda S}{e} (T_{intérieure} - T_{extérieure}) = \frac{1.2 \times 1}{0.2} (40 - 30) = 60W$$

#### a.2. Evolution de la température dans le mur :

La température varie selon une fonction linéaire dans une paroi homogène. Dans une position  $x$  donnée la température  $T(x)$  s'écrit :

$$T(x) = (T_2 - T_1) \times \frac{x}{e} + T_1$$

Pour trouver cette expression il faut juste intégrer la relation précédente entre 0 et  $x$  et  $T_1$  et  $T_x$ .



a.3. Analogie électrique :

Les problèmes d'électricité et de transfert de chaleur par conduction sont régis par des équations de même nature. Il est donc possible d'établir une analogie entre ces deux phénomènes physiques.

| Conduction                                          | Electricité                 |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------|
| Température (T)                                     | Potentiel électrique (U)    |
| Flux de chaleur (q)                                 | Intensité du courant (I)    |
| Résistance thermique (R)                            | Résistance électrique (R)   |
| $\frac{q}{S} = \frac{(T_1 - T_2) \cdot e}{\lambda}$ | $I = \frac{(U_1 - U_2)}{R}$ |
| $T_1 - T_2 = R \cdot \frac{q}{S}$                   | $U_1 - U_2 = R \cdot I$     |
| $R = \frac{e}{\lambda}$                             |                             |

b) Mur multicouche

➤ Couches en séries :

Pour un mur composé des éléments en série, On a conservation du flux thermique, c'est-à-dire :

1<sup>ère</sup> couche :

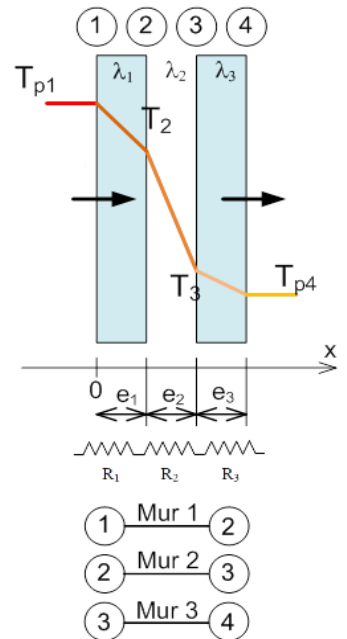
$$\frac{q_1}{S} = \frac{\lambda_1}{e_1} (T_{p1} - T_2) \Leftrightarrow T_{p1} - T_2 = \frac{e_1}{\lambda_1} \cdot \frac{q_1}{S}$$

2<sup>ème</sup> couche :

$$\frac{q_2}{S} = \frac{\lambda_2}{e_2} (T_2 - T_3) \Leftrightarrow T_2 - T_3 = \frac{e_2}{\lambda_2} \cdot \frac{q_2}{S}$$

3<sup>ème</sup> couche :

$$\begin{aligned} \frac{q_3}{S} &= \frac{\lambda_3}{e_3} (T_3 - T_4) \Leftrightarrow T_3 - T_{p4} = \frac{e_3}{\lambda_3} \cdot \frac{q_3}{S} \\ T_{p1} - T_{p4} &= \left[ \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} \right] \times \frac{q}{S} \\ \Rightarrow T_{p1} - T_{p4} &= [R_1 + R_2 + R_3] \times \frac{q}{S} \end{aligned}$$



Donc on a :

$$\frac{q}{S} = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3} \quad \text{par analogie avec la loi d'ohm } I = \frac{\Delta U}{R_{eq}}$$

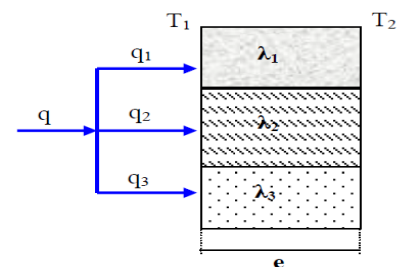
La résistance équivalente thermique pour des couches en série est égale à:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

➤ Couches en parallèles :

Pour un mur plan composé des éléments en parallèles on a :

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$



**1<sup>ère</sup> couche :**

$$\frac{q_1}{S_1} = \frac{\lambda_1}{e_1} (T_1 - T_2) \Leftrightarrow \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{\lambda_1}} = \frac{q_1}{S_1}$$

**2<sup>ème</sup> couche :**

$$\frac{q_2}{S_2} = \frac{\lambda_2}{e_2} (T_1 - T_2) \Leftrightarrow \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_2}{\lambda_2}} = \frac{q_2}{S_2}$$

**3<sup>ème</sup> couche :**

$$\frac{q_3}{S_3} = \frac{\lambda_3}{e_3} (T_1 - T_2) \Leftrightarrow \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_3}{\lambda_3}} = \frac{q_3}{S_3}$$

$$\begin{aligned} q/S &= q_1/S_1 + q_2/S_2 + q_3/S_3 = (T_1 - T_2) \left[ \frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1}} + \frac{1}{\frac{e_2}{\lambda_2}} + \frac{1}{\frac{e_3}{\lambda_3}} \right] \\ &= (T_1 - T_2) \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right] \end{aligned}$$

$q/S = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}$  Par analogie avec la loi d'Ohm  $I = \frac{\Delta U}{R_{eq}}$  on a donc l'expression de la résistance équivalente thermique pour des couches en parallèles:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

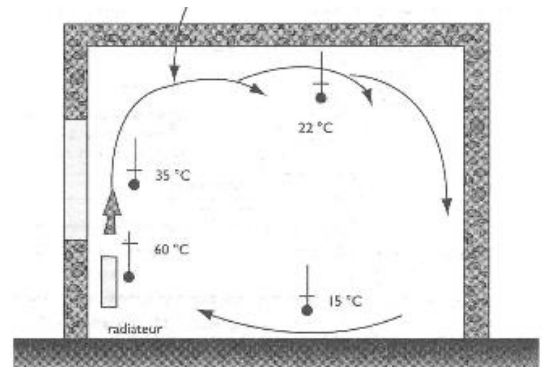
Qui est plus connue sous la forme :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

### 3. Transmission de chaleur par convection :

C'est le déplacement des particules du milieu fluide (gaz ou liquide) qui provoque le transfert de chaleur. On distingue la convection forcée pour laquelle c'est une action mécanique qui est à l'origine du mouvement, et la convection naturelle où la mise en mouvement est due à des différences de densité au sein même du fluide.

Le flux de chaleur transmis par convection à l'interface entre la paroi et le fluide est proportionnel à l'écart de température entre la surface de la paroi et le fluide.



C'est le cas par exemple d'une paroi de bâtiment qui est en contact avec l'air. Quand il y a transfert de chaleur par conduction au sein de la paroi, il y a aussi un échange de chaleur entre le fluide et la surface de la paroi. Cet échange est dû principalement au mouvement du fluide le long de la paroi. Il s'agit d'un échange convectif.

### 3.1. La loi de Newton (loi fondamentale de la convection)

C'est la loi de Newton qui détermine le flux de chaleur échangé par convection entre une paroi et un fluide.

$$q = h \cdot S \cdot (T_2 - T_1) \quad [W]$$

S : La surface de la paroi [m<sup>2</sup>]

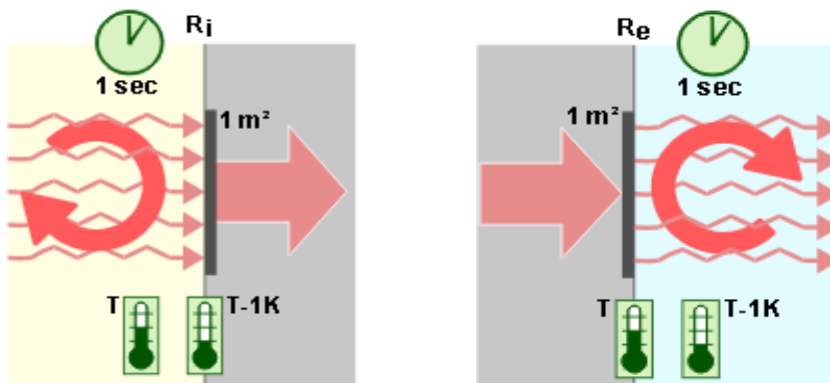
T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> : La différence de température entre la paroi et le fluide. [°C] [K]

h: Le coefficient de la convection thermique [W/m<sup>2</sup>°C],

Pour déterminer les flux de chaleur traversant les parois de bâtiment, on tient compte des échanges de chaleur par convection et rayonnement on définit les résistances (thermiques) superficielles. La résistance surfacique intérieure (R<sub>ci</sub>) vaut 1/h<sub>i</sub>, la résistance surfacique extérieure (R<sub>ce</sub>) vaut 1/h<sub>e</sub>.

- h<sub>i</sub> : Le coefficient d'échange superficiel intérieur.

- h<sub>e</sub> : Le coefficient d'échange superficiel extérieur.



La résistance d'échange thermique superficiel entre une ambiance et une paroi est l'inverse de la somme des quantités de chaleur transmise entre une ambiance et la face d'une paroi, par unité de temps, par unité de surface de la paroi, et pour un écart de 1 K entre la température de l'ambiance et la température de surface.

|                                                                |                 | Paroi en contact avec l'extérieur, un passage ouvert, un local ouvert |                |                                | Parois en contact avec une autre local, chauffé ou non, un vide sanitaire |                |                                |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|
|                                                                |                 | R <sub>i</sub>                                                        | R <sub>e</sub> | R <sub>i</sub> +R <sub>e</sub> | R <sub>i</sub>                                                            | R <sub>e</sub> | R <sub>i</sub> +R <sub>e</sub> |
| Paroi verticale ou faisant un avec le plan horizontale > à 60° |                 | 0.11                                                                  | 0.06           | 0.17                           | 0.11                                                                      | 0.11           | 0.22                           |
| Paroi horizontale ou avec le plan horizontal un angle <=à 60°  | Flux ascendant  | 0.09                                                                  | 0.05           | 0.14                           | 0.09                                                                      | 0.09           | 0.18                           |
|                                                                | Flux descendant | 0.17                                                                  | 0.05           | 0.22                           | 0.17                                                                      | 0.17           | 0.34                           |

### 3.2. La propagation de la chaleur à travers une paroi :

Une paroi séparant deux ambiances de températures différentes, constitue un obstacle plus ou moins efficace, au flux de chaleur qui va s'établir de la chaude vers la froide.

La chaleur va devoir

- Pénétrer dans la paroi,
- Traverser les différentes couches de matériaux constituant la paroi,
- Sortir de la paroi.

La conductance thermique d'un mur est l'inverse de la résistance thermique unitaire (par unité de surface), compris les échanges superficiels.

$$K = \frac{1}{R} [W/m^2\text{°C}]$$

Pour un mur monocouche en contact avec deux fluides :

$$R = \frac{1}{h_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

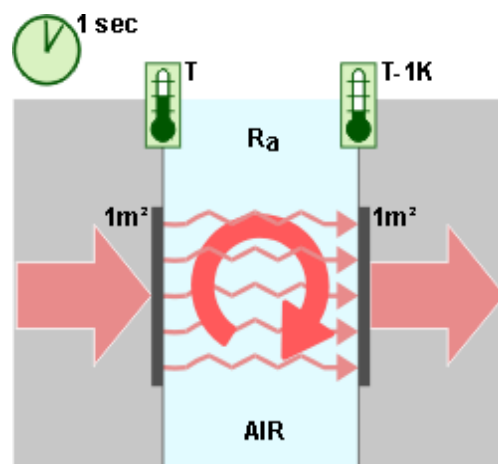
Pour un mur multicouche :

$$R = \frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2} \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}}$$

### 3.4. La résistance thermique des couches d'air la lame d'air ( $R_a$ ) :

$R_a$ , la résistance thermique d'une couche d'air plane est l'inverse de la quantité de chaleur qui est transmise en régime permanent de la face chaude de la couche d'air vers la face froide, par [conduction](#), [convection](#) et [rayonnement](#), par unité de temps, par unité de surface et pour un écart de 1 K entre les températures des faces chaudes et froides.

$R_a$  s'exprime en  $m^2K/W$ .



| Épaisseur de la couche d'air [mm] | Couche d'air verticale [m²K/W] | Couche d'air horizontale Flux de chaleur vers le haut [m²K/W] | Couche d'air horizontale Flux de chaleur vers le bas [m²K/W] |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 0<d<5                             | 0.00                           | 0.00                                                          | 0.00                                                         |
| 5≤d<7                             | 0.11                           | 0.11                                                          | 0.11                                                         |
| 7≤d<10                            | 0.13                           | 0.13                                                          | 0.13                                                         |
| 10≤d<15                           | 0.15                           | 0.15                                                          | 0.15                                                         |
| 15≤d<25                           | 0.17                           | 0.16                                                          | 0.17                                                         |
| 25≤d<50                           | 0.18                           | 0.16                                                          | 0.19                                                         |
| 50≤d<100                          | 0.18                           | 0.16                                                          | 0.21                                                         |
| 100≤d<300                         | 0.18                           | 0.16                                                          | 0.22                                                         |
| 300                               | 0.18                           | 0.16                                                          | 0.23                                                         |

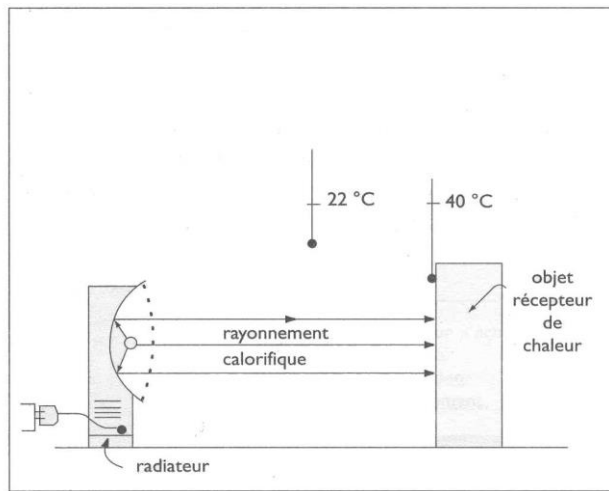
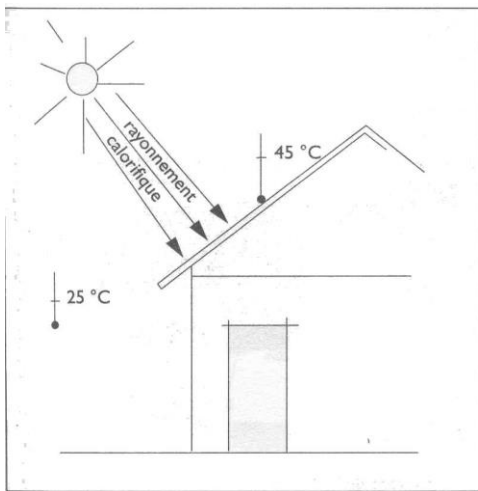
#### 4. Transmission de chaleur par rayonnement :

Le rayonnement thermique est la quantité d'énergie thermique échangée dans un système sous forme d'ondes électromagnétiques.

Une onde électromagnétique est un phénomène ondulatoire caractérisé par sa période T et sa longueur d'onde.

L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

- *émission* : il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie élec-tromagnétique
- *transmission* : la transmission de cette énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé ;
- *réception* : à la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption).



##### 4.1. La puissance rayonnée : (émission)

Pour les matériaux courants de construction (béton, bois, terre, peinture, métaux non polis, etc...), la puissance rayonnée est donnée par la relation :

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

$\varepsilon$ : Émissivité de la surface. Elle est comprise entre 0 et 1.

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [\text{W/m}^2\text{K}^4]$$

| Matériaux          | $\epsilon$ |
|--------------------|------------|
| béton              | 0.95       |
| Bois               | 0.75-0.95  |
| Marbre             | 0.95       |
| Brique ordinaire   | 0.93       |
| Brique réfractaire | 0.6        |
| Verre ordinaire    | 0.94       |
| Peinture à l'huile | 0.90       |
| Pierre             | 0.93       |
| Argile             | 0.94       |

Exemple : On considère une plaque chauffante de forme circulaire en cuivre poli ( $\epsilon = 0.05$ ) chauffée à la température  $100^\circ\text{C}$ . Comment calculer le flux thermique émis par rayonnement par la surface de la plaque de diamètre  $D = 50\text{cm}$

$$M = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = 0,05 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times (100 + 273)^4 = 10,77 \text{ W}$$

4.2. **La puissance reçue (éclairage):** C'est le flux reçu par unité de surface. Dans le cas général, le flux incident se répartit en

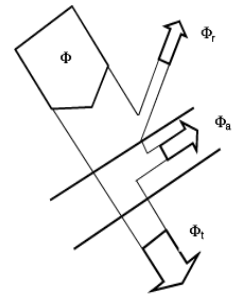
- Flux absorbé.
- Flux transmis.
- Flux réfléchis.

$$\text{Coefficient d'absorption : } \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi}$$

$$\text{Coefficient de transmission : } \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi}$$

$$\text{Coefficient de réflexion : } \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi}$$

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$



Quelques cas particuliers

Corps opaque  $\tau = 0$

Corps transparent  $\tau = 1$

| Matériaux                   | $\alpha$ |
|-----------------------------|----------|
| Noir mat                    | 1        |
| Peinture blanche            | 0.5      |
| Peinture claire             | 0.6      |
| Peinture sombre             | 0.9      |
| Peinture d'aluminium        | 0.6      |
| Brique rouge, béton         | 0.8/0.9  |
| Sable, eau, tôle galvanisée | 0.7      |
| tuile                       | 0.8      |

### 4.3. Échange de chaleur par rayonnement entre deux surfaces

#### 4.3.1. Corps noir :

Un corps noir est défini comme étant une surface idéale qui absorbe tout le rayonnement qu'elle reçoit. Le soleil peut être considéré comme un corps noir dont la température de surface est proche de 5 800 K.

Le facteur d'émission pour un corps noir  $\varepsilon = 1$ .

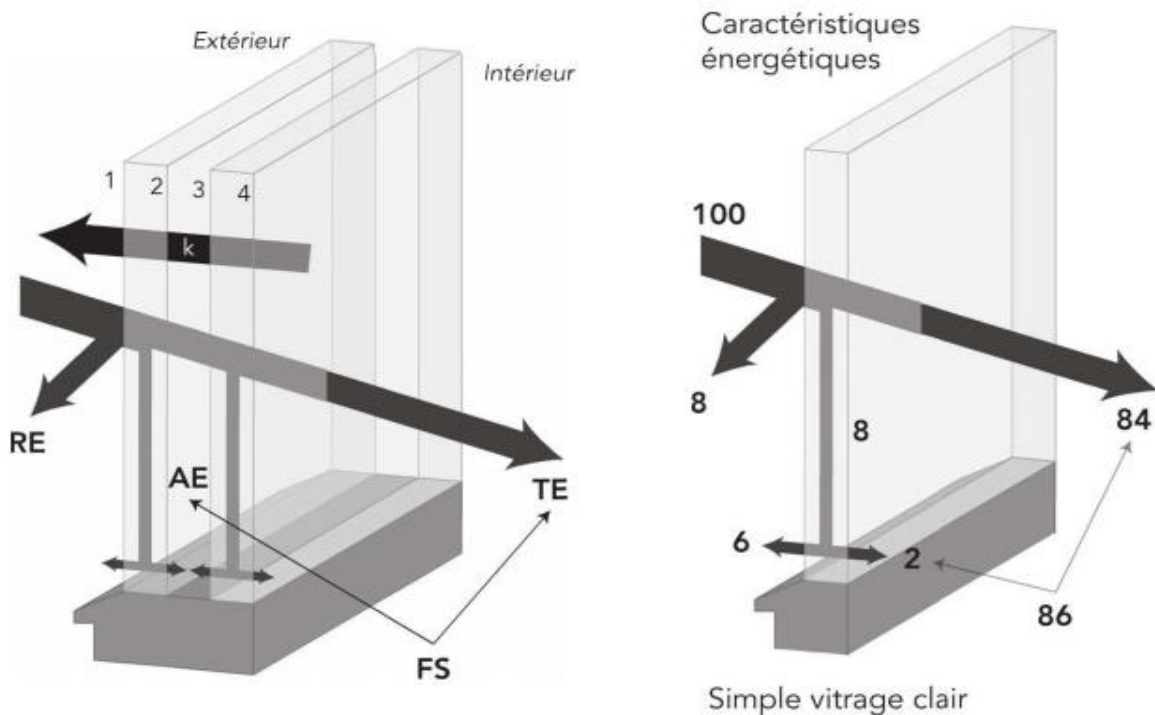
#### 4.3.2. Corps réel ou gris :

L'émission d'un corps réel ou gris est toujours inférieure à celle du corps noir.

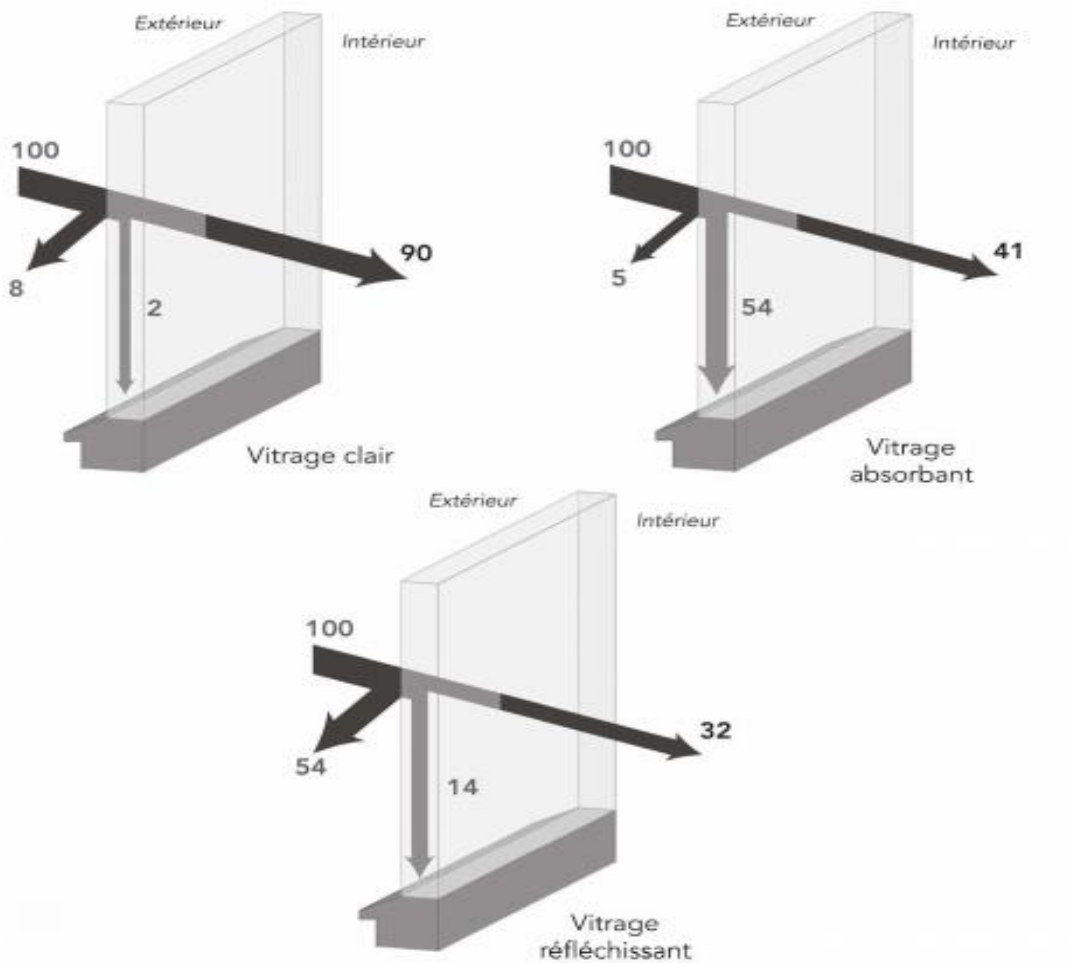
### 4.4. Le rayonnement solaire à travers un vitrage :

#### 4.4.1. Facteur solaire d'un vitrage

Le facteur solaire FS d'un vitrage permet de caractériser les performances solaires d'une fenêtre et sa capacité à contrôler le passage du rayonnement solaire au travers du vitrage.



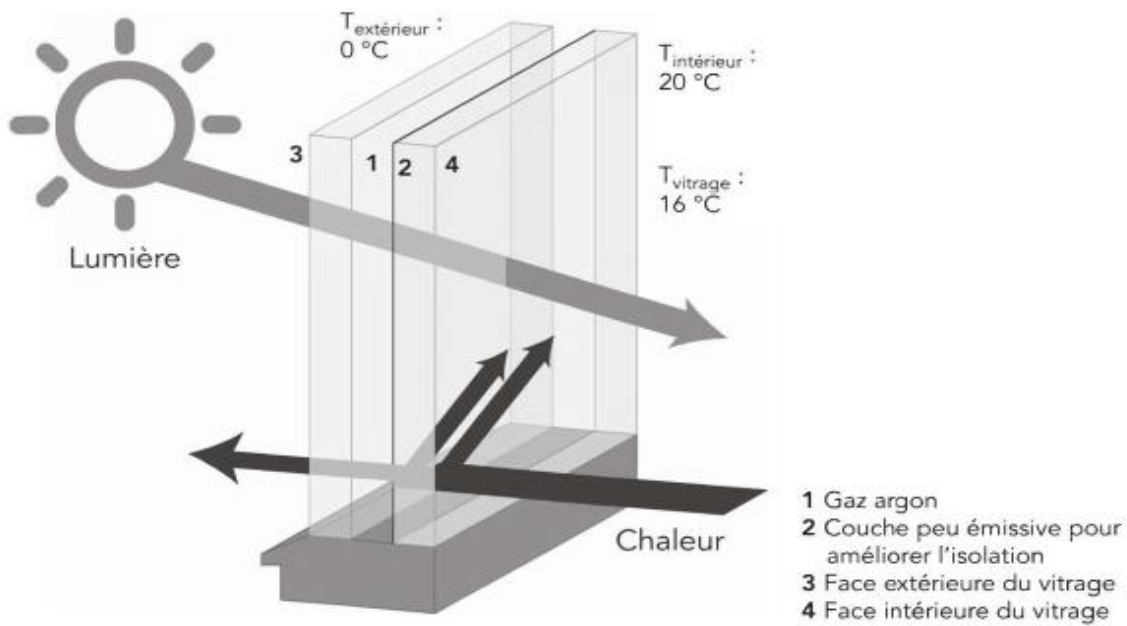
Quand un rayonnement solaire frappe un vitrage, une partie de celui-ci est réfléchi, une partie est transmise directement au travers du vitrage et une partie est absorbée par le vitrage. La partie absorbée par le vitrage est ensuite partagée en une partie qui est réémise par le vitrage vers l'intérieur et une partie réémise vers l'extérieur. Le facteur solaire du vitrage est défini par la fraction du rayonnement solaire qui rentre à l'intérieur du bâtiment au travers de la fenêtre sur le rayonnement incident.



#### 4.4.2. **Vitrage à basse émissivité :**

Une couche faiblement émissive déposée sur une des faces internes d'un double vitrage permet d'arrêter l'énergie dans les longueurs d'ondes situées dans l'infrarouge tout en laissant passer celles du spectre visible.

Cette couche, de métal noble déposée au moment de la fabrication du verre, abaisse fortement l'émissivité de la surface de verre.



### Conclusion :

L'étude des phénomènes de transfert de chaleur dans le bâtiment constitue une étape essentielle pour comprendre le comportement thermique de l'enveloppe architecturale et optimiser les performances énergétiques des espaces construits. Les trois modes fondamentaux de transfert : **la conduction, la convection et le rayonnement** interviennent simultanément et déterminent la manière dont la chaleur circule entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

Pour l'architecte, la maîtrise de ces mécanismes ne relève pas uniquement d'un savoir scientifique, mais constitue également un **outil de conception**. En effet, le choix des matériaux, l'épaisseur des parois, l'orientation des façades et la nature des vitrages influencent directement les échanges thermiques et, par conséquent, le confort des occupants ainsi que la consommation énergétique du bâtiment.