

## Thermique des bâtiments – Généralités

Si initialement, l'étude du bilan thermique des bâtiments est effectuée afin d'économiser les combustibles de chauffage (fuel, gaz, charbon ou électricité), elle est aujourd'hui effectuée pour la recherche d'un confort thermique en thermique d'hiver.

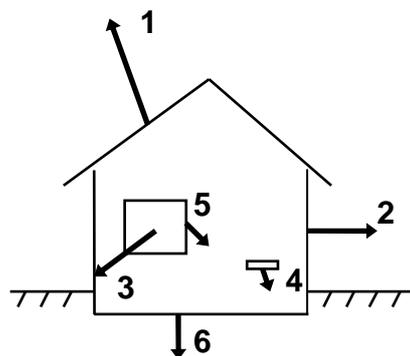
Aujourd'hui la prise en compte d'un confort thermique d'été associé au traitement de l'air des locaux est courants, particulièrement dans les régions chaudes.

### 1/ POURQUOI ISOLER LES CONSTRUCTION ?

A partir d'un bilan thermique d'hiver, on peut visualiser à l'aide d'une photographie infrarouge les "pertes de chaleur" au travers des différentes parois (fig 1).

- 20 % par la couverture (1).
- 16 % par les murs (2).
- 13 % par les vitrages (3) .
- 20 % par les ventilations (4).
- 5 % par les ponts thermiques (5).
- 16 % par le sol (6).

FIG : 1



- 100 % des pertes de chaleur.

#### NOTA :

En thermique d'été les échanges sont se définissent en terme d'apport énergétique au travers des parois des construction.

**L'isolation thermique consiste à limiter les déperditions thermiques (hiver) ou les apports thermique (été) par application de matériaux isolants.**

### 2/ ECHANGES THERMIQUES

#### 2/1 Notion de chaleur

La chaleur représente un niveau d'activité moléculaire de la matière. Plus l'activité est élevée, plus la matière est "chaude".

Simplement, la chaleur est une forme d'énergie se caractérisant par des variations de température.

#### 2/2 Température.

La température est le degré de "chaleur" ou de "froid" de l'atmosphère en un lieu, lié à la sensation éprouvée par le corps.

L'échelle de mesure de la température est le KELVIN (Unité du système international S.I .

Pratiquement, les températures sont exprimées en °C (degré Celsius).

Le point de changement d'état de l'eau en glace: - 0°C soit : 273 Kelvins,

Le point de changement d'état de l'eau en vapeur: - 100°C soit : 373 Kelvins.

Ainsi la variation de température  $\Delta T$  de 1°C = 1 Kelvin.

## 2/3 Transferts de chaleur

La chaleur (l'énergie calorifique) se transmet d'un milieu à un autre, d'un corps à un autre de trois façon différentes :

### Le rayonnement

Les corps chauds émettent un rayonnement qui, absorbé par un autre corps se transforme en chaleur. Le rayonnement émis est de même nature que le rayonnement lumineux.

Le soleil transmet sa chaleur par rayonnement (lumière = U.V, visible, Infrarouge...) jusqu'à la terre sans support matériel (espace).

### La conduction

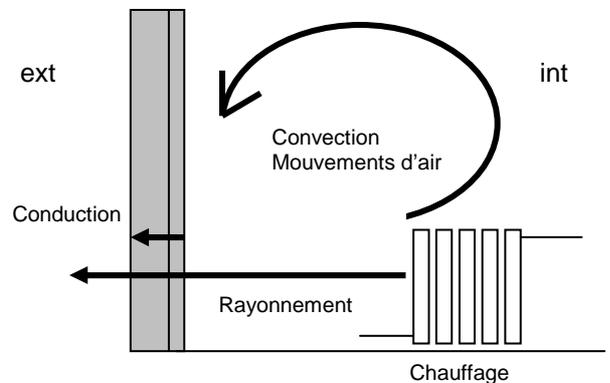
Le transfert de chaleur se fait directement entre solides, le support matériel est solide. Il s'agit par exemple du contact de la peau et du métal chaud.

### La convection

Le transfert de chaleur se fait par l'intermédiaire d'un fluide (gaz ou liquide). La convection est de la conduction avec comme support matériel un fluide.

En conclusion, pour une paroi qui sépare deux ambiances (intérieure et extérieure), l'échange de chaleur se fait de l'ambiance "chaude" vers l'ambiance "froide" suivant les trois modes de transfert connus.

FIG : 2



## 2/4 Quantité de chaleur.

La quantité de chaleur représente l'énergie totale que peut absorber un matériau soumis à un écart de température  $\Delta T$ .

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

avec Q la chaleur massique en Joules [J],  
m la masse de la paroi en [kg],  
c la chaleur massique du matériau en [J / kg.°C],  
 $\Delta T$  l'écart de température en [°C].

c de l'eau : 4185 [J/kg.°C]  
c du béton : 790 [J/kg.°C]

c du plâtre : 1080 [J/kg.°C]  
c de la laine de verre : 840 [J/kg.°C]

## 3/ CONDUCTION A TRAVERS UNE PAROI

En thermique de bâtiment, les transferts de chaleur sont généralement simplifiés à des échanges de conduction à travers les parois

### 3/1 Flux de chaleur total.

A travers une paroi, la puissance calorifique totale (flux de chaleur) qui la traverse vaut :

$$\Phi = S \cdot \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

avec :  $\Phi$  le flux de chaleur en [W],

$\Delta T$  la différence de température entre les 2 parois en [°C],  
R la résistance thermique de la paroi en [°C.m<sup>2</sup> / W],  
S la surface de la paroi en [m<sup>2</sup>].

### 3/2 Flux de chaleur surfacique.

A travers une paroi de 1 m<sup>2</sup>, la puissance calorifique par m<sup>2</sup> (flux de chaleur surfacique) qui la traverse vaut :

$$\phi = \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

avec :  $\phi$  le flux de chaleur en [W/m<sup>2</sup>],

$\Delta T$  la différence de température entre les 2 parois en [°C],

$R_{th}$  la résistance thermique de la paroi en [°C. m<sup>2</sup>/ W],

on obtient donc :

$$\Phi = S . \phi$$

**REMARQUE:** l'expression du flux de chaleur est analogue à l'expression de l'intensité électrique (loi d'Ohm).

THERMIQUE	ELECTRIQUE
$\Delta T = R_{th} . \phi$	$U = R . I$
où $\Delta T$ est la différence de température, $R_{th}$ la résistance thermique, $\phi$ le flux de chaleur.	où $U$ est la différence de potentiel, $R$ la résistance électrique, $I$ l'intensité électrique.

### 4/ RESISTANCE THERMIQUE D'UNE PAROI

Les résistances thermiques sont exprimées pour 1 m<sup>2</sup> de paroi.

#### 4/1 Résistance thermique d'une paroi homogène.

Lorsque la paroi est composée d'un unique élément homogène (1 résistance),  $R_{th}$  vaut :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda}$$

avec :  $R_{th}$  la résistance thermique en [m<sup>2</sup> . °C/W ],

$e$  l'épaisseur de la paroi en [m],

$\lambda$  la conductivité thermique du matériau constituant la paroi en [W / m . °C].

#### 4/2 Résistance thermique d'une paroi composite.

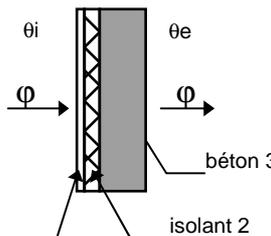
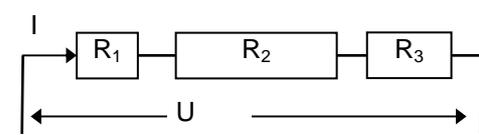
Lorsque la paroi est composée de plusieurs matériaux homogènes (plusieurs résistances), la résistance totale est la somme des résistances de chaque éléments de la paroi,  $R_{th}$  vaut :

$$R_{th} = \sum \frac{e_i}{\lambda_i}$$

avec :  $R_{th}$  la résistance thermique en [m<sup>2</sup> . °C / W],

$e_i$  l'épaisseur de l'élément  $i$  en [m],

$\lambda_i$  la conductivité thermique de l'élément  $i$  en [W / m . °C].

THERMIQUE	ELECTRIQUE
<p>La résistance totale <math>R_{th} = R_1 + R_2 + R_3</math></p> <p>soit <math>R_{th} = \sum \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}</math></p> 	<p>Il s'agit d'un montage en série :</p>  <p>La résistance totale <math>R = R_1 + R_2 + R_3</math>, soit <math>R = \sum R_i</math></p>

#### 4/3 Résistances thermiques superficielles d'une paroi.

En thermique du bâtiment les échanges thermiques à travers une paroi sont considérés comme des échanges conductifs.

En réalité, la température de surface d'une paroi intérieure n'est pas identique à la température de l'ambiance intérieure (si le local est à 18°C, la surface de la paroi est à  $\approx 16^\circ\text{C}$ ).

Ainsi il existe une "résistance" de la lame d'air en contact avec la paroi (cette résistance est due aux échanges de convection et de rayonnement en surface).

Ce phénomène a également lieu au niveau de la surface extérieure.

L'expression de la Résistance Thermique Superficielle est :

$$R_{\text{surf}} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$$

avec  $\frac{1}{h_i}$  la résistance de la surface intérieure en  $[\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}]$ ,  
 $\frac{1}{h_e}$  la résistance de la surface extérieure en  $[\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}]$ ,

Les valeurs des résistances surfaciques  $\frac{1}{h_i}$  et  $\frac{1}{h_e}$  dépendent de l'inclinaison de la paroi et du sens du flux thermique.

		Paroi en contact avec : - l'extérieur, - un passage couvert, - un local ouvert.			Paroi en contact avec : - un autre local chauffé ou non, - un comble, - un vide sanitaire.		
		$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_i'}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_i'}$
Paroi verticale ou faisant avec le plan horizontal un angle supérieur à 60°		0.11	0.06	<b>0.17</b>	0.11	0.11	<b>0.22</b>
Paroi horizontale ou faisant avec le plan horizontal un angle inférieur à 60° flux ascendant (toiture)		0.09	0.05	<b>0.14</b>	0.09	0.09	<b>0.18</b>
flux descendant (toiture)		0.17	0.05	<b>0.22</b>	0.17	0.17	<b>0.34</b>

#### 4/4 Conductivité thermique d'une paroi.

La conductivité  $\lambda$  caractérise le flux de chaleur qui traverse une paroi (matériau) homogène d'1 m d'épaisseur, de 1 m<sup>2</sup> de surface, pendant 1 heure et pour une différence de 1°C entre les deux faces.

$$\lambda \text{ est exprimé en } [\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}]$$

Quelques valeurs des  $\lambda$  des matériaux du génie civil en  $[\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}]$  :

- |                             |                           |             |        |
|-----------------------------|---------------------------|-------------|--------|
| - Laine de verre            | : 0.034 (selon densité)   | - Mortier   | : 1.15 |
| - Laine de roche            | : 0.038 (selon densité)   | - Béton     | : 1.75 |
| - Polystyrène expansé       | : 0.038 (selon densité)   | - Acier     | : 52   |
| - Bois                      | : 0.20                    | - Aluminium | : 230  |
| - Béton d'argile expansée   | : 0.44-                   | - Plâtre    | : 0.50 |
| - Brique creuse ((20x20x40) | : 0.50 ( $\lambda$ moyen) | - Verre     | : 1.1  |

#### 4/5 Exercice.

Une paroi verticale extérieure (1 m<sup>2</sup>) est composée de :  
- un enduit intérieur en plâtre de 1.5 cm,  
- une isolation en polystyrène de 8 cm,  
- un mur en béton de 20 cm.

La température intérieure de base est de + 25 °C, la température extérieure de base est de + 35 °C.

- 1/ Calculer la résistance thermique de la paroi.
- 2/ Calculer le flux thermique la traversant.

### 5/ COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE D'UNE PAROI

L'expression du flux thermique  $\varphi = \frac{\Delta T}{R_{th}}$ , peut également s'écrire  $\varphi = K \cdot \Delta T$ ,  
où K est l'inverse de la résistance thermique R<sub>th</sub>.

#### 5/1 Coefficient de transmission thermique surfacique

$$K = \frac{1}{R_{th}}$$

avec K en [W/m<sup>2</sup>.°C],  
R<sub>th</sub> en [m<sup>2</sup>.°C/W].

#### NOTA :

Plus la résistance R<sub>th</sub> est grande, plus la paroi est isolante.  
Plus K est petit, plus la paroi est isolante.

#### 5/2 Coefficient de transmission thermique linéique

La transmission de chaleur d'une ambiance intérieure vers une ambiance extérieure se fait principalement par les parois (75 %). Or, une partie des échanges se font par les ponts thermiques.

Les ponts thermiques sont des zones de liaisons entre parois (horizontales ou verticales), entre ouvertures et parois, où la longueur de la liaison est caractéristique de l'échange thermique.

Le coefficient de transmission linéique est noté:

k en [W/m.°C]

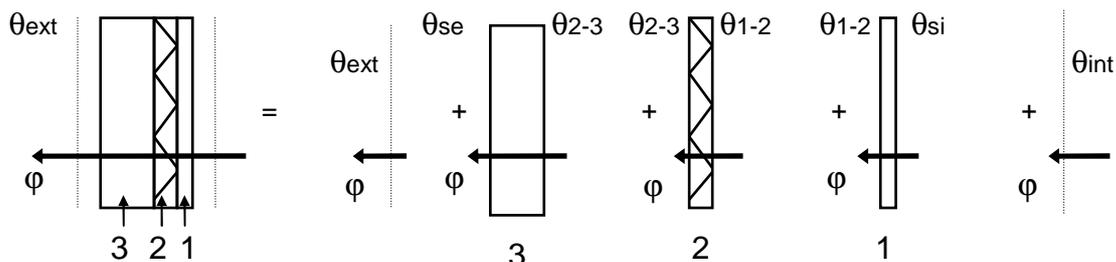
Les valeurs de k sont issues des règlements thermiques

### 6/ REPARTITION DES TEMPERATURES DANS UNE PAROI

Lors de l'étude du bilan thermique d'une paroi, la connaissance des températures dans chaque constituant de la paroi est indispensable à l'identification des risques de condensation (point de rosée) de la paroi.

#### 6/1 Equation de répartition des températures

L'étude est menée à partir de la paroi en 4/5.



Le flux est égal à :  $\varphi = \frac{\Delta T}{R_{th}}$ , identique à la traversée de chaque composants

Avec  $\varphi = \frac{\theta_{int}-\theta_{ext}}{R_{th}}$ , ou  $\varphi = \frac{\theta_{int}-\theta_{si}}{\frac{1}{h_i}}$ , ou  $\varphi = \frac{\theta_{si}-\theta_{1-2}}{R_1}$ ,  $\varphi = \frac{\theta_{1-2}-\theta_{2-3}}{R_2}$ ,  $\varphi = \frac{\theta_{2-3}-\theta_{se}}{R_3}$ ,  $\varphi = \frac{\theta_{se}-\theta_{ext}}{\frac{1}{h_e}}$

De façon générale on exprime la température dans un interface :

$$\theta_i = \theta_{int} - \varphi \times [\sum R_{int \text{ à } i}]$$

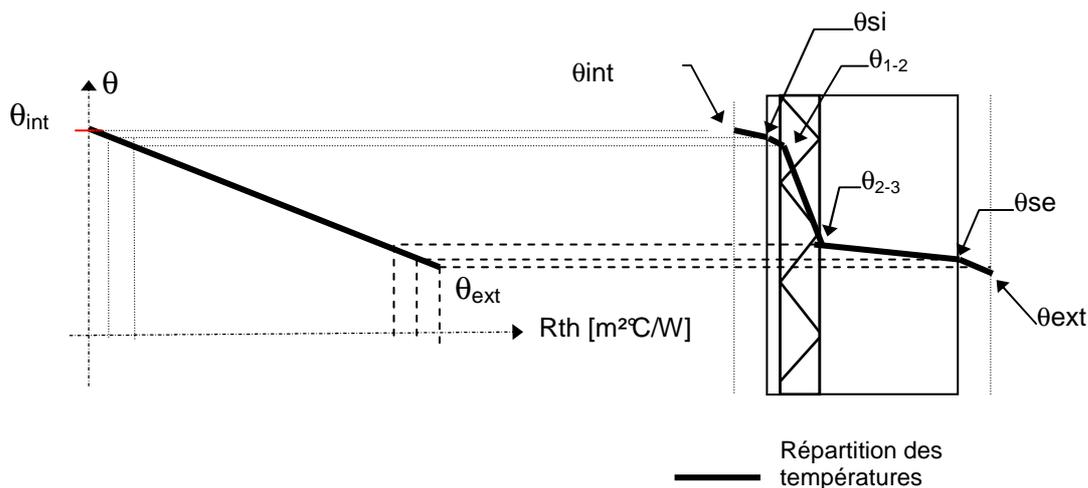
avec  $\varphi$  le flux total en [W/m<sup>2</sup>],

$\sum R_{int \text{ à } i}$  somme des résistances thermique comprises entre l'intérieur et l'interface de calcul  $i$  en [m<sup>2</sup>.°C/W],  
 $\theta_{int}$  la température intérieure en [°C],  
 $\theta_i$  la température calculée à l'interface  $i$  en [°C],

$$\theta_i = \varphi \times [\sum R_{ext \text{ à } i}] + \theta_{ext}$$

## 6/2 Graphique de répartition des températures – droite de fonctionnement

$\theta_i = -\varphi \times [\sum R_{i+1}] + \theta_{int}$  qui est du type  $y(x) = a.x + b$  (où  $b = \theta_{int}$  et  $a = -\varphi$ ).



## 7/ ISOLATION DES LOCAUX

### 7/1 Les matériaux isolants

Les matériaux isolants sont des matériaux extrêmement poreux. Les isolants renferment donc une multitude de trous (alvéoles d'air), sortes de "micro-résistances" s'opposant aux échanges thermiques.

On peut classer les matériaux isolants en deux catégories :

#### Les isolants de synthèse :

Ce sont des matériaux dérivés du pétrole tels

- les polystyrènes,  $\lambda = 0.033$  à  $0.047$  [S.I]
- les polyuréthanes,  $\lambda = 0.030$  [S.I]
- les mousses PVC,  $\lambda = 0.031$  [S.I]

#### Les isolants minéraux :

Ce sont des matériaux dérivés de l'industrie du verre ou du traitement de roches

- les laines de verre,  $\lambda = 0.034$  à  $0.047$  [S.I]
- les laines de roche,  $\lambda = 0.038$  à  $0.047$  [S.I]

### Lame d'air :

L'air est considéré comme un "bon" isolant. La conception de résistance thermique par lame d'air est particulièrement efficace lorsque celui-ci est sec et immobile.

La conductivité de l'air (sec et immobile) vaut  $\lambda = 0.024$  [W/m<sup>2</sup>.°C

On donne généralement des valeurs de résistance thermique de lames d'air (double vitrages).

### NOTA :

La plupart des isolants thermiques sont également des isolants phoniques, leur mise en oeuvre est souvent étudiée pour permettre d'assurer les fonctions thermique et acoustique.

### 7/2 La certification ACERMI

Les matériaux isolants ont une certification propre (conforme à la norme NF P 75-701) délivrée par l'ACERMI (Association de CERTification des Matériaux Isolants) qui permet de choisir les isolants pour une utilisation donnée.

Cette certification repose sur un classement des isolants : le classement I.S.O.L.E.

- I : Propriétés mécaniques de compression (1 à 5),
- S : Comportement aux mouvements différentiels (1 à 4),
- O : Comportement à l'eau (1 à 3),
- L : Propriétés mécaniques de flexion et cohésion (1 à 4),
- E : Comportement à la vapeur d'eau (1 à 4)

Plus le produit est performant, plus le chiffre est grand.

## **8/ HYGROMETRIE – POINT DE ROSEE**

L'étude hygrométrique permet d'identifier les températures de transformation de la vapeur d'eau en eau liquide, à travers une paroi. La condensation des parois est source de nombreux désordres des constructions.

### 8/1 Notions élémentaires

#### **Vapeur d'eau.**

Les ambiances intérieures et extérieures sont composées d'air et d'eau (à l'état gazeux).

$$\text{Air} = \text{Air sec} + \text{vapeur d'eau}$$

Cette quantité de vapeur ne représente que quelques grammes d'eau par m<sup>3</sup> d'air sec.

#### **Humidité absolue W.**

Il s'agit de la quantité (masse) d'eau W contenue dans l'air. Pour une température et une pression donnée, la masse de vapeur d'eau est limitée à une valeur maximum W<sub>s</sub> correspondant à la saturation (la vapeur se condense en eau).

Quand la température augmente, W<sub>s</sub> augmente.

#### **Humidité relative HR.**

C'est le rapport de la masse d'eau contenue dans l'air à la masse maximum d'eau (saturation) pouvant exister (pour une température et une pression donnée).

$$HR = 100 \times \frac{W}{W_s}$$

La saturation (condensation) correspond à HR = 100 %

## 8/2 Point de rosée

Lorsqu'il existe une différence d'hygrométrie entre des ambiances intérieures et extérieures, la vapeur d'eau tend à traverser les parois (généralement de l'intérieur vers l'extérieur en thermique d'hiver).

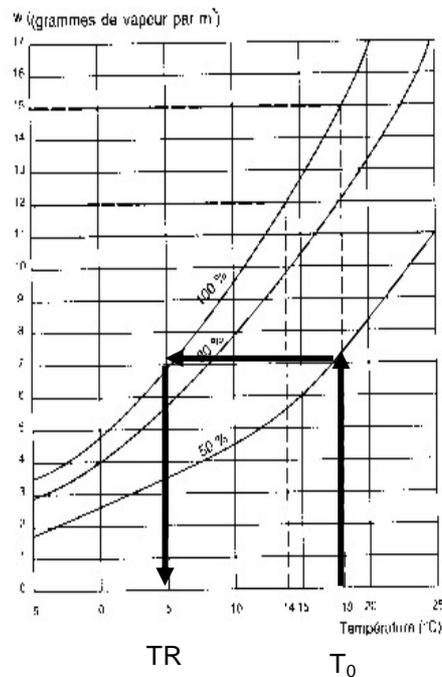
Cette vapeur d'eau au contact d'une paroi "froide" risque de se condenser. La température de condensation est appelée température de Rosée, Point de Rosée.

Cette température est obtenue à partir d'une lecture du diagramme de l'air humide  
- Diagramme de MOLLIER -

A partir de la température initiale  $T_0$  d'une masse d'air à HR connu (50% pour l'exemple),

on trace alors une ligne horizontale ( $W$  est constante) jusqu'à la courbe de saturation HR = 100 %.

On détermine alors la température de Rosée de cette masse d'air (5°C).



Le point de rosée se situe généralement dans l'isolant (chute de température importante), il faut que la vapeur d'eau ne puisse se transformer en eau liquide (ce qui dénaturerait l'isolant).

**Pour cela on place  systématiquement  un PARE-VAPEUR du  côté chaud de l'isolant**

Le pare-vapeur peut être :

- une peinture (salle d'eau),
- un papier Kraft (associé à l'isolation),
- une feuille d'aluminium,
- un produit bitumineux (toitures terrasses).