



Université Mohammed Premier
Ecole Nationale des Sciences Appliquées - Oujda



Cours de Thermique du Bâtiment

Présentation

Filière Génie Civil

Pr. Rachid MALEK

Introduction à la thermique du bâtiment

Pr. Rachid MALEK - ENSAO

Contexte et problématique de la thermique du bâtiment :

L'efficacité énergétique

Les bâtiments à énergie positive

Le confort de l'été et de l'hiver

Le respect de l'environnement

Etc...

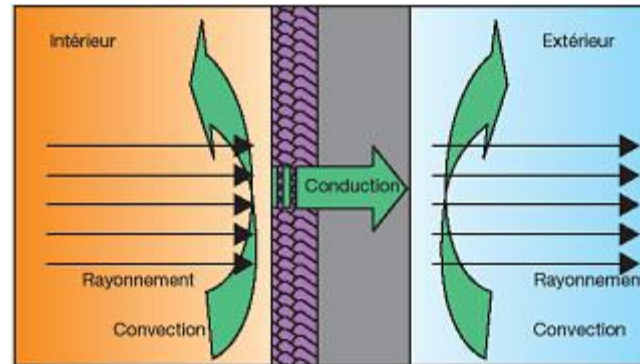
- * Nécessitent la connaissance des principes de base de la thermique du bâtiment.

- * Comprendre les valeurs thermiques qui caractérisent les matériaux est indispensable pour choisir judicieusement les produits nécessaires à la réalisation d'un point de vue technique et économique.

- * En fonction de la performance thermique désirée, on est amené à déterminer les parois d'ossature et non l'inverse.

- * Une condition de réussite réside dans la conception du bâtiment et dans la qualité de son enveloppe pour réduire le besoin de chauffage (problèmes de déperditions).

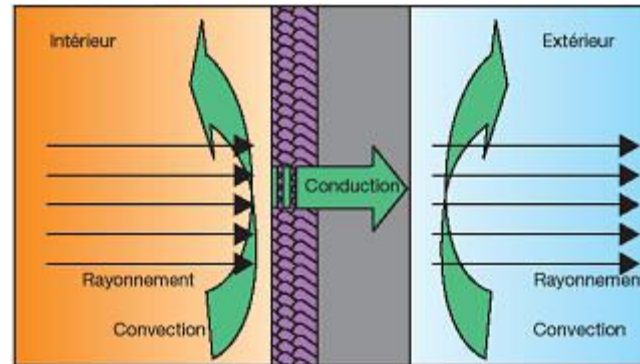
Différents modes de transfert d'énergie thermique :



La conduction : C'est la transmission d'énergie de proche en proche dans la partie solide d'un matériau. La chaleur se propage avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques (résistances thermiques...) et la géométrie du matériau.

Remarque : Plus le matériau est isolant moins il y a de conduction.

Différents modes de transfert d'énergie thermique :

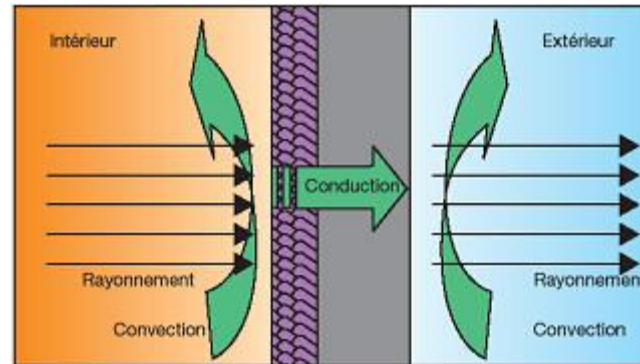


La convection : Ce mécanisme de transfert de chaleur est propre aux fluides (liquides ou gaz). Exemple : l'air.

Au contact d'un élément chaud, le fluide se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact duquel il perd sa chaleur créant ainsi un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les deux éléments.

Remarque : Plus l'air est immobile moins il y a de convection

Différents modes de transfert d'énergie thermique :

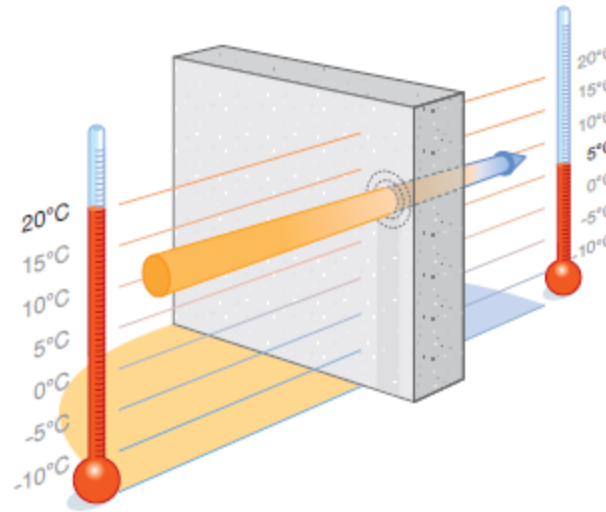


Le rayonnement : C'est le transfert de chaleur d'un élément à un autre par onde électromagnétique (EM) sans contact direct.

Ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel. Il peut se produire dans le vide.

Remarque : Plus l'émissivité du matériau est faible moins il y aura de transfert par rayonnement.

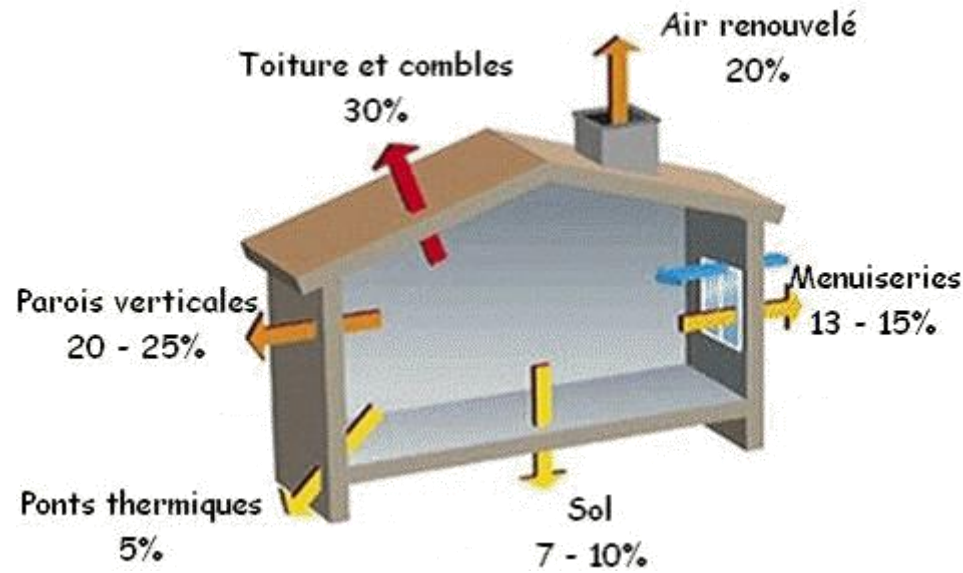
Le flux thermique ϕ :



Le flux thermique est la quantité d'énergie ou de chaleur passant à travers 1 m² de paroi pendant une seconde lorsqu'il existe un écart de température entre ses 2 faces.

$$\phi = \lambda \times \frac{\Delta T}{e} \quad \text{W/m}^2$$

Déperditions à travers l'enveloppe du bâtiment :



Les déperditions à travers l'enveloppe du bâtiment se situent à tous les niveaux. Il est donc important d'en tenir compte à chaque instant de la conception.

Autres grandeurs caractéristiques :

La chaleur massique d'un corps est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse d'un corps pour élever sa température de 1°C , **SANS changement d'état**.

Chaleur (SENSIBLE)		Masse	Chaleur MASSIQUE	Température
$Q \text{ (J)}$	$=$	$M \text{ (kg)}$	$C_m \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}$	$(T_2 - T_1) \text{ (}^\circ\text{C)}$
Puissance		Débit masse		
$Q/t = P$	$=$	M/t	C_m	$(T_2 - T_1)$

Quelques ordres de grandeurs de C_m

	J / kg K	kcal / kg K	kWh / m ³ K
eau	4180	1	1,163
air	1010	0,24	0,34
glace	2200	0,50	
vapeur	100°C 2200 0°C 1830	0,50 0,46	
verre	750		
laines	1000		
platre	1000		
béton	1000		
pierre	1000		
polyuréthane	1400		
polystyrene	1400		
bois	1600		

Quelques ordres de grandeur :

1 litre de fuel \leftrightarrow 10 kWh

1 m³ de gaz naturel \leftrightarrow 10 kWh

1 kg de bois sec \leftrightarrow 4,5 kWh

L'énergie se mesure en kWh

La puissance se mesure en kW

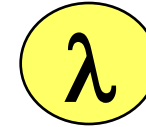
Exemple : Pour chauffer 10 (l/min) d'eau de 10 à 60°C, il faut une puissance de :

$$P = \rho \times q_v \times C_m \times \Delta\theta$$

$$P = 1000 \times \frac{10 \cdot 10^{-3}}{60} \times 4180 \times (60 - 10)$$

$$P = 35000 = 35 \text{ kW}$$

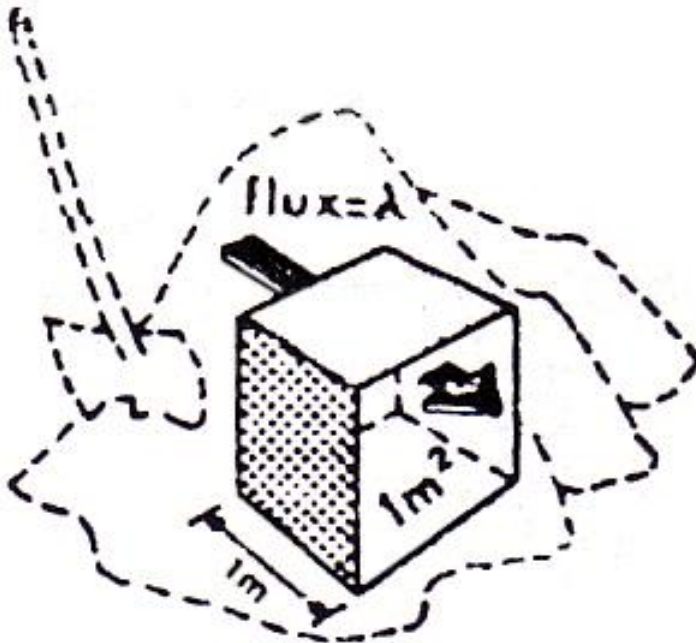
Le coefficient de conductivité



C'est la **conductivité thermique** qui indique dans quelle proportion le matériau conduit la chaleur.

Le coefficient de conductivité est le flux de chaleur par m^2 , traversant 1m d'épaisseur de matériau homogène pour une différence de température de 1°C entre ses deux faces parallèles.

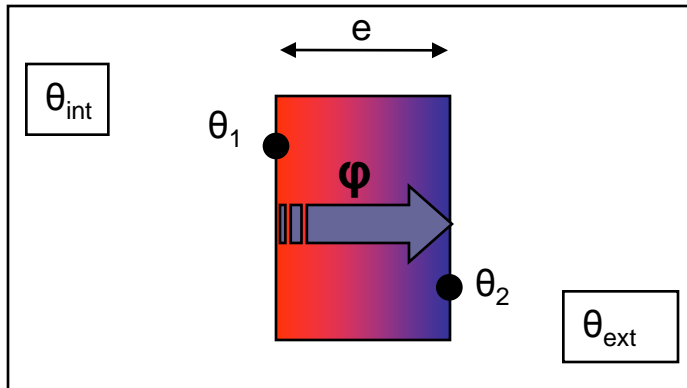
La conductivité thermique (λ) est exprimée en watts par mètre-kelvin :
 $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$



Le coefficient de conductivité



Flux surfacique (par m²)



$$\varphi = \frac{\lambda}{e} (\theta_1 - \theta_2)$$

$\frac{\lambda}{e} = \text{CONDUCTANCE}$
 $\frac{e}{\lambda} = \text{RESISTANCE}$

e : l'épaisseur de la paroi [m]
λ : la conductivité thermique de la paroi

$$\left[\frac{W}{mK} \right]$$

Déperditions surfaciques : φ [W/m²]

λ est grand pour les CONDUCTEURS

λ est faible pour les ISOLANTS

Le coefficient de conductivité λ

Quelques ordres de grandeur :

Solides	Liquides	Gaz
Métaux : Cuivre 390	Eau 0,6	Air 0,025
Alumium 200		Argon 0,017
Acier 50		Xenon 0,0054
Construction : Béton 1,5		Krypton 0,0091
Verre 1.35		
Bois 0.2		
Isolant 0,04		

λ caractérise le matériau : conducteurs et isolants.

Coefficients λ et résistances thermiques

Pour les matériaux homogènes

les valeurs de λ sont données par :

- * des certifications spécifiques (ACERMI)
- * par défaut dans la RT

Pour les matériaux types :

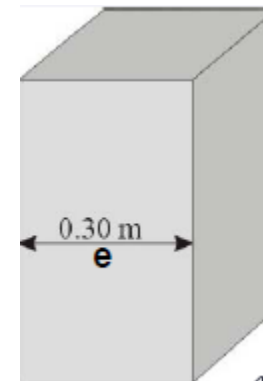
bloc creux, briques, entrevous, ... lames d'air,

On donne directement la résistance thermique $R = \frac{e}{\lambda}$

pour $\lambda = 1,15 \text{ W/m.K}$

$R = e/\lambda = 0,3/1,15 = 0,26 \text{ m}^2.\text{K/W}$

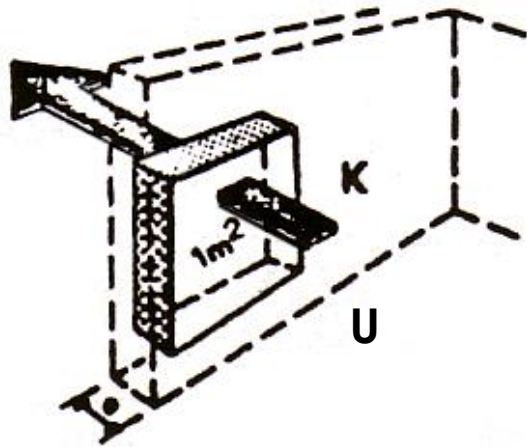
R exprime la résistance du matériau au passage de la chaleur.



UNE PAROI

Ce qui la caractérise

Le coefficient de transmission surfacique



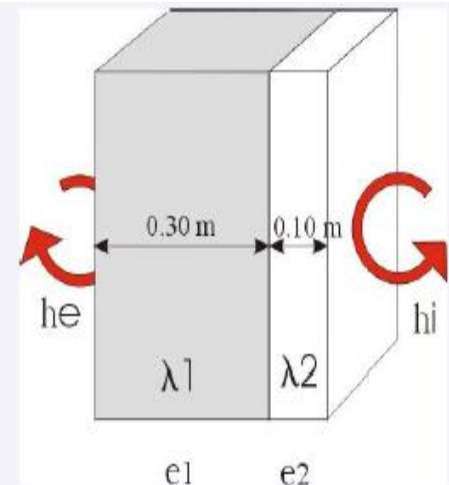
Le coefficient U indique l'importance de la transmission de chaleur par m^2 pour 1°C de différence entre les ambiances limitant les faces de la paroi dans les conditions normales.

U s'exprime en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

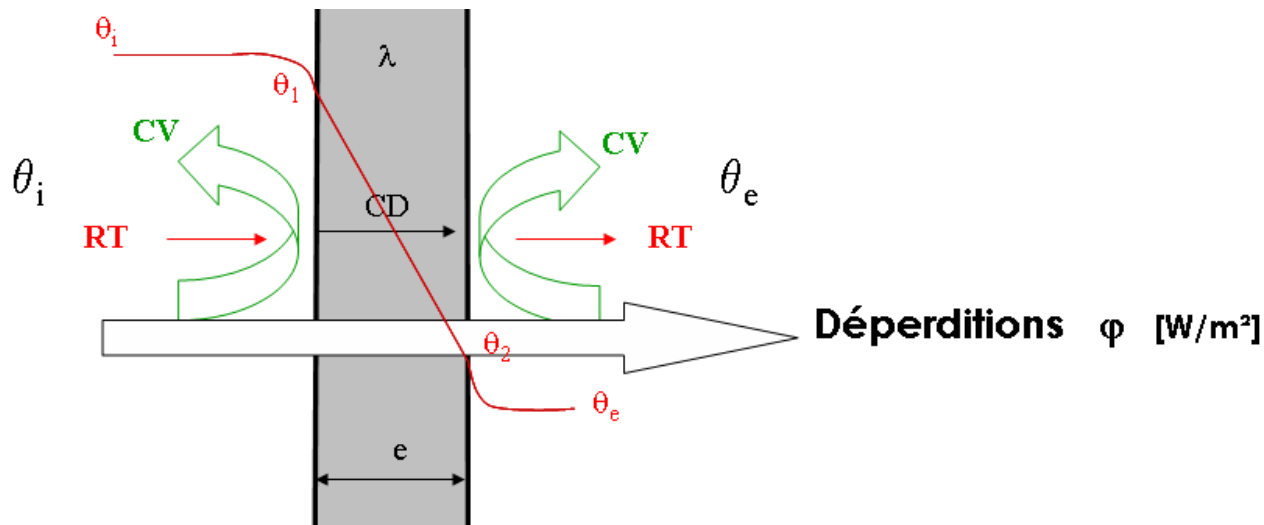
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{e}{\lambda} + \sum R$$

U est l'inverse de la résistance thermique

$$R = 1/h_i + 1/h_e + \sum e/\lambda$$



Le coefficient de transmission thermique U d'une paroi



Flux « entrant » par convection naturelle et rayonnement

$$\varphi = h_i \cdot (\theta_i - \theta_1)$$

$$h_i = h_{c_i} + h_{R_i}$$

h_i : coefficient d'échange superficiel intérieur par convection et rayonnement

Flux « traversant » par conduction

$$\varphi = (\lambda/e) \cdot (\theta_1 - \theta_2)$$

Flux « sortant » par convection naturelle et rayonnement


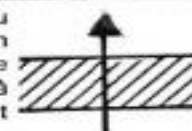
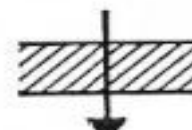
$$\varphi = h_e \cdot (\theta_2 - \theta_e)$$

$$h_e = h_{c_e} + h_{R_e}$$

h_e : coefficient d'échange superficiel extérieur par convection et rayonnement

Coefficients d'échanges superficiels typiques – Règles TH

On admet conventionnellement que les résistances thermiques d'échanges superficiels intérieurs ($1/h_i$) et extérieurs ($1/h_e$) ont les valeurs données dans le tableau ci-dessous, tableau où figure également la somme de ces résistances :

	Paroi en contact avec : — l'extérieur, — un passage ouvert, — un local ouvert.			Paroi en contact avec : — un autre local, chauffé ou non chauffé, — 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	0,17	0,11	0,11	0,22
Paroi horizontale ou faisant avec le plan horizontal un angle égal ou inférieur à 60°, flux ascendant (toiture) 	0,09	0,05	0,14	0,09	0,09	0,18
flux descendant (plancher bas) 	0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

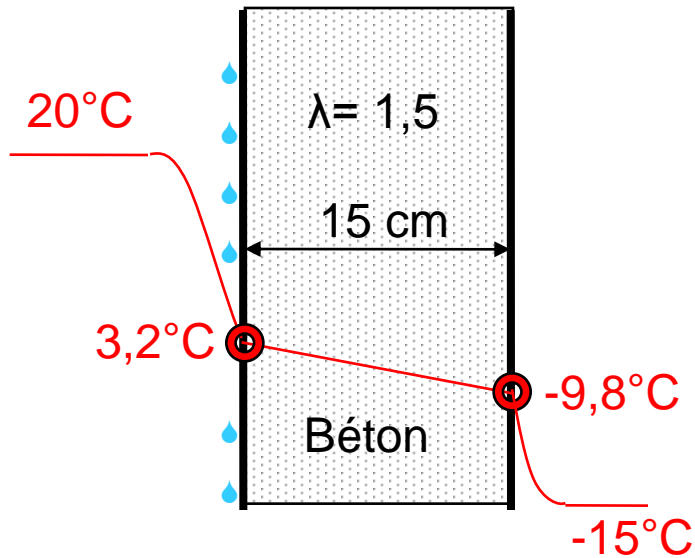
Un local est dit « ouvert » si le rapport de la surface totale de ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à 0,005 m²/m³. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.

R_{th} : Résistance thermique d'une paroi d'un matériau

Pour un paroi composite :

$$R_{th} = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + \sum R + R_{se}$$

Le coefficient de transmission thermique U [W/m².K] d'une paroi est calculé par l'inverse de la résistance thermique R_{th} de la paroi [m².K/W], somme de toutes les résistances thermiques des éléments qui composent la paroi, y compris les résistances superficielles (R_{si} et R_{se}).

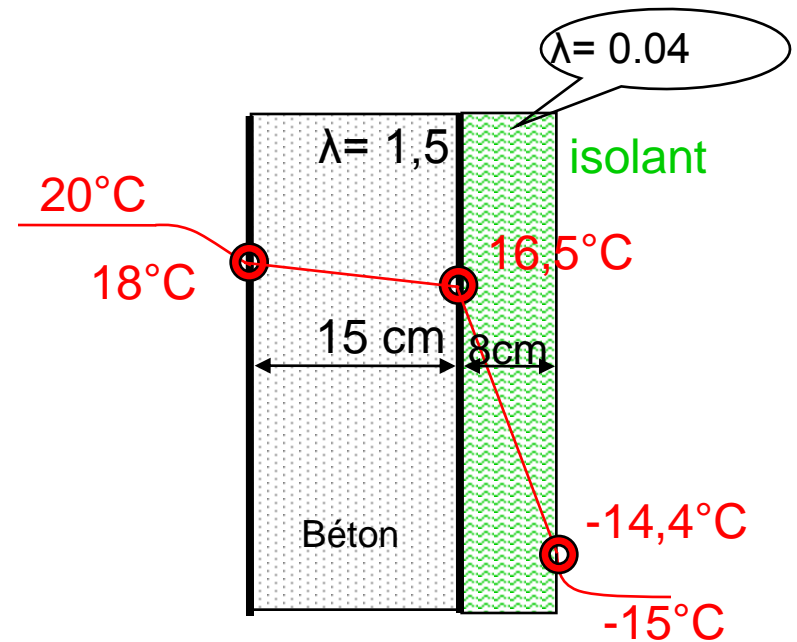


$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e}{\lambda}$$

$$\frac{1}{U} = 0,17 + \frac{0,15}{15}$$

$$\frac{1}{U} = 0,27 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}} \right]$$

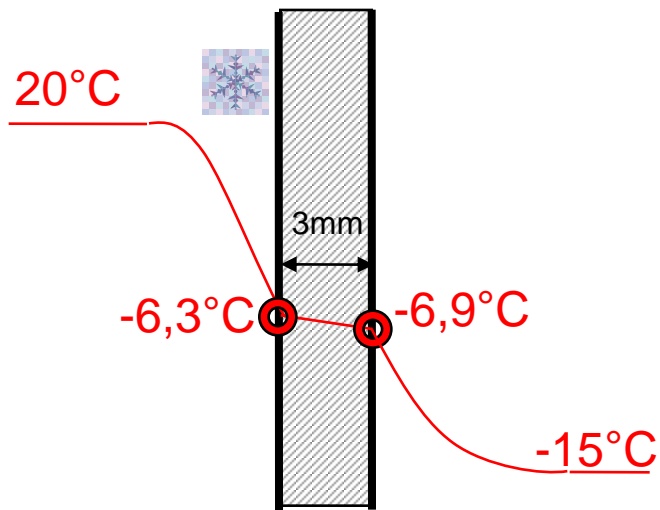
$$U = 3,7 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right] > 1$$



$$\frac{1}{U} = 0,27 + \frac{0,08}{0,04}$$

$$\frac{1}{U} = 2,27 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}} \right]$$

$$U = 0,44 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right] < 1$$



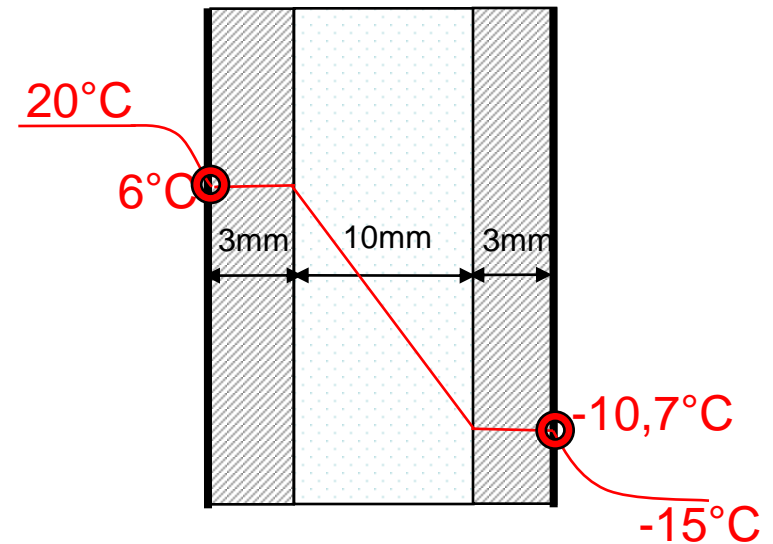
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e}{\lambda}$$

$$\frac{1}{U} = 0,17 + \frac{0,003}{1,15}$$

$$\frac{1}{U} = 0,173 \left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right]$$

$$U = 5,78 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

R. MALEK GC5 2013/2014



$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{2 \cdot e}{\lambda} + R_{la}$$

$$\frac{1}{U} = 0,17 + \frac{0,006}{1,15} + 0,15$$

$$\frac{1}{U} = 0,315 \left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right]$$

$$U = 3 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

EXEMPLE 2

Calcul du coefficient K d'une toiture-terrasse en béton d'agréats lourds, de masse volumique 2 300 kg/m³, isolé par 8 cm de polystyrène expansé, moulé de classe V

— Enduit plâtre (§ 3,61) :

$$\frac{e_1}{\lambda_1} = \frac{0,01}{0,35} = 0,03$$

— Béton lourd (§ 3,311) :

$$\frac{e_2 + e_3}{\lambda_2} = \frac{0,20}{1,75} = 0,11$$

— Polystyrène (§ 3,911) :

$$\frac{e_4}{\lambda_4} = \frac{0,08}{0,037} = 2,16$$

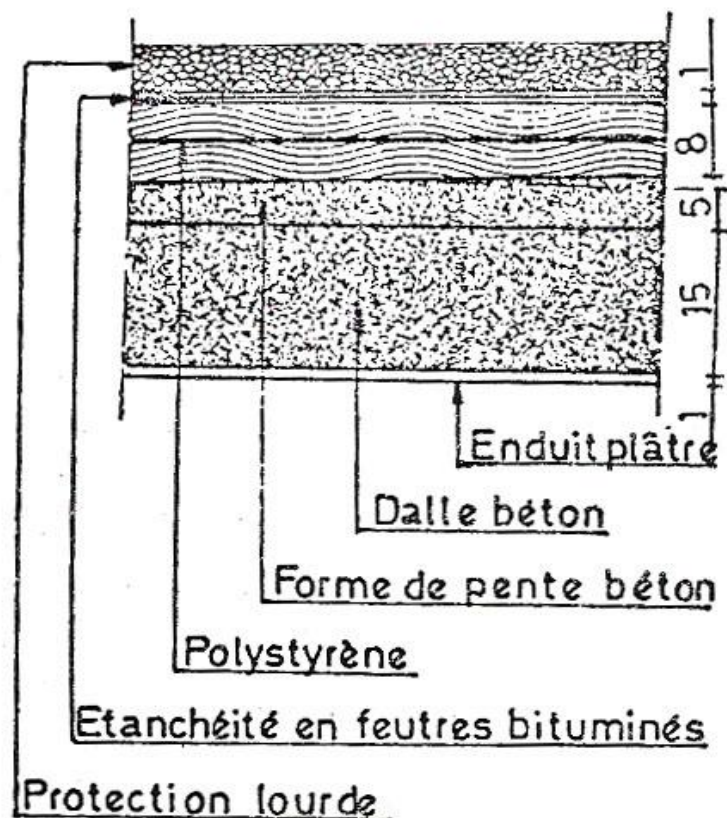
— Feutres bituminés (§ 3,(10)3)

$$\frac{e_5}{\lambda_5} = \frac{0,01}{0,23} = 0,04$$

— Résistances d'échanges superficiels :

$$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = 0,14$$

$$\frac{1}{K} = 2,48$$



$K = 0,403$, arrondi à **0,40** W/m². °C

EXEMPLE 3

Calcul du coefficient K d'un mur extérieur en blocs creux de terre cuite à rupture de joint, à 7 rangées d'alvéoles, enduit 2 faces

— Enduit plâtre (§ 3,61) :

$$\frac{e_1}{\lambda_1} = \frac{0,01}{0,35} = 0,03$$

— Briques creuses

à 7 rangées d'alvéoles

(§ 1,426.1) : $e_2 = 30 \text{ cm}$, $R_2 = 0,64$

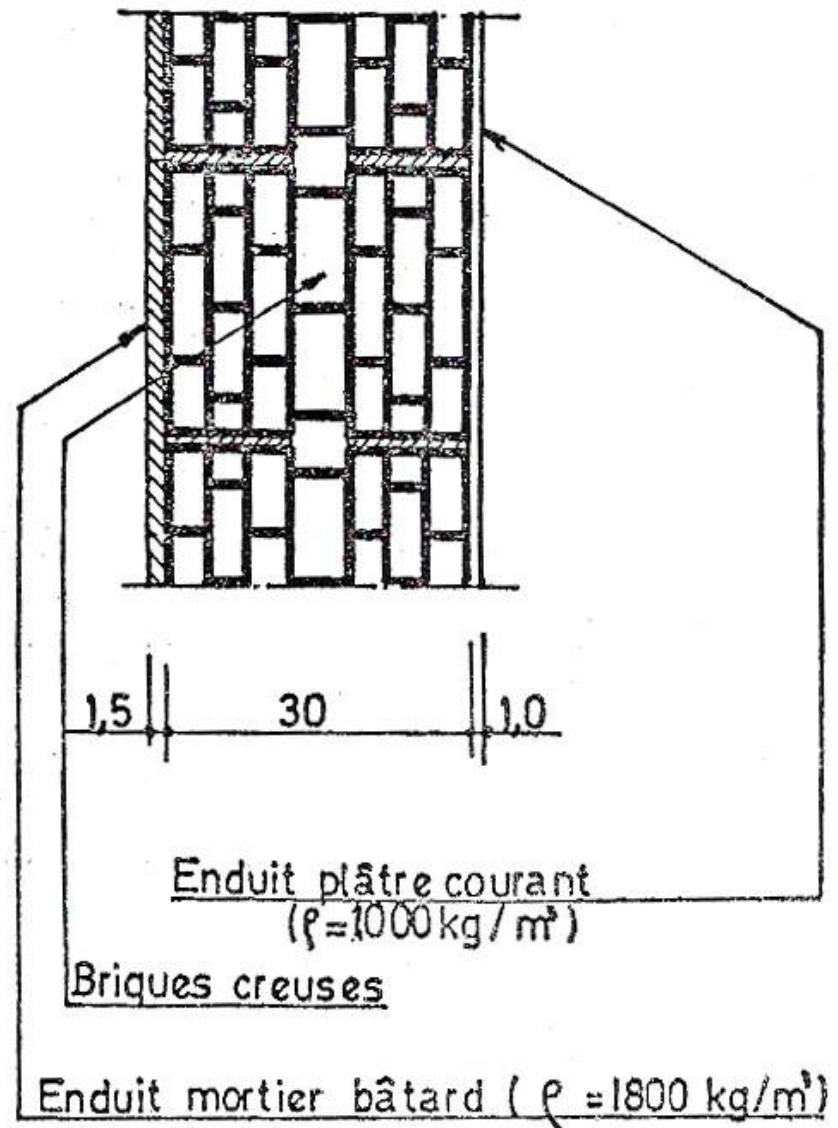
— Enduit mortier (§ 3,24) :

$$\frac{e_3}{\lambda_3} = \frac{0,015}{1,15} = 0,013$$

— Résistances d'échanges superficiels :

$$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = 0,17$$

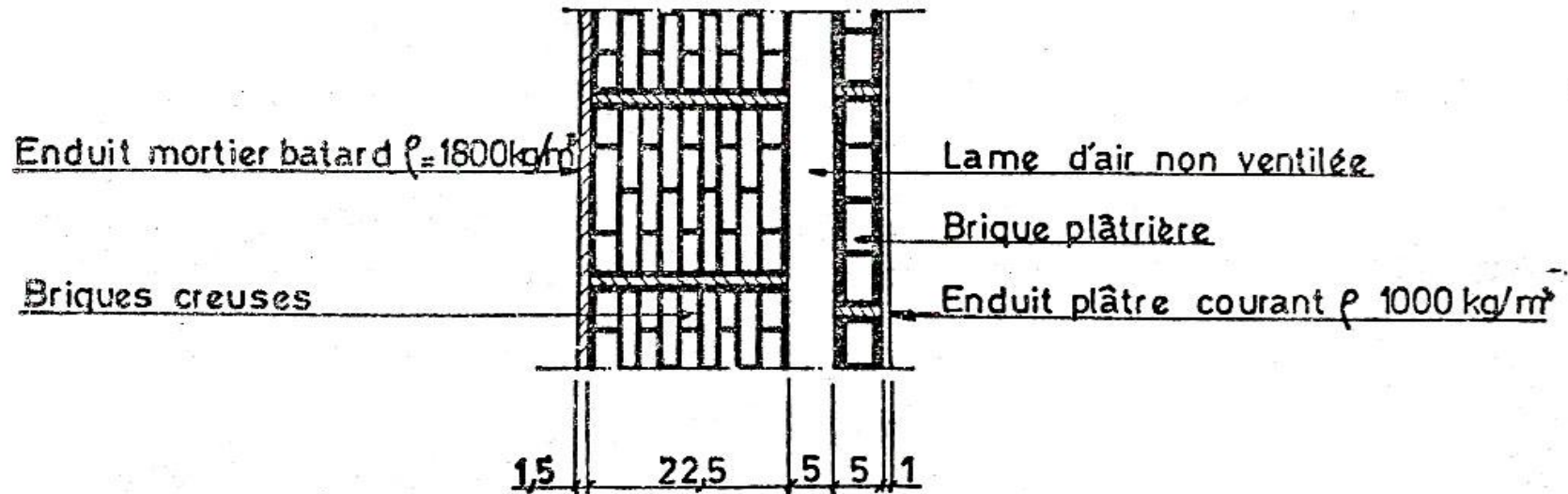
$$\frac{1}{K} = 0,853$$



$K = 1,172$, arrondi à **1,15** $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

EXEMPLE 4

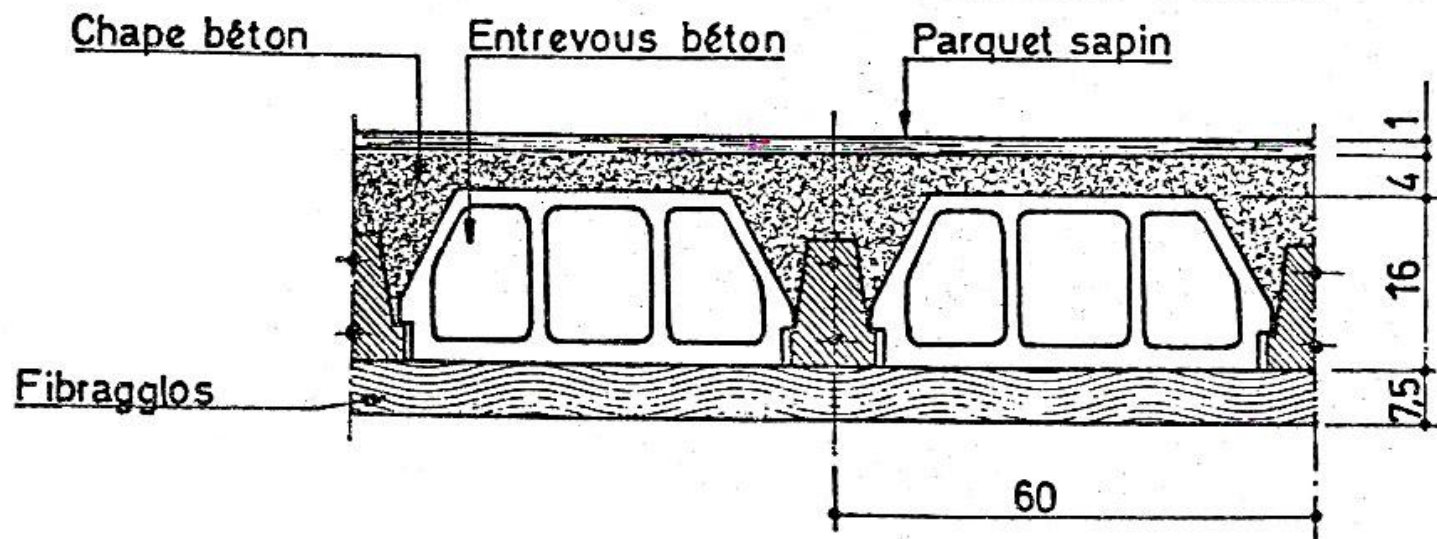
Calcul du coefficient K d'un mur extérieur composé d'un doublage en briques plâtrières, d'une lame d'air non ventilée et d'une paroi en briques creuses de 22,5 cm d'épaisseur à 9 rangées d'alvéoles et quinconçage 3-2, enduit deux faces



— Enduit plâtre (§ 3,61)	$\frac{e_1}{\lambda_1} = \frac{0,01}{0,35} = 0,03$
— Brique plâtrière $e_2 = 5 \text{ cm}$ (§ 4,126.1)	$R_2 = 0,10$
— Lame d'air $e_3 = 5 \text{ cm}$ (§ 4,711)	$R_3 = 0,16$
— Briques creuses à 9 rangées d'alvéoles, quinconçage 3-2 $e_4 = 22,5 \text{ cm}$ (§ 4,126.2)	$R_4 = 0,70$
— Enduit mortier (§ 3,4)	$\frac{e_5}{\lambda_5} = \frac{0,015}{1,15} = 0,013$
— Résistances d'échanges superficiels	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = 0,17$
	$\frac{1}{K} = 1,173$

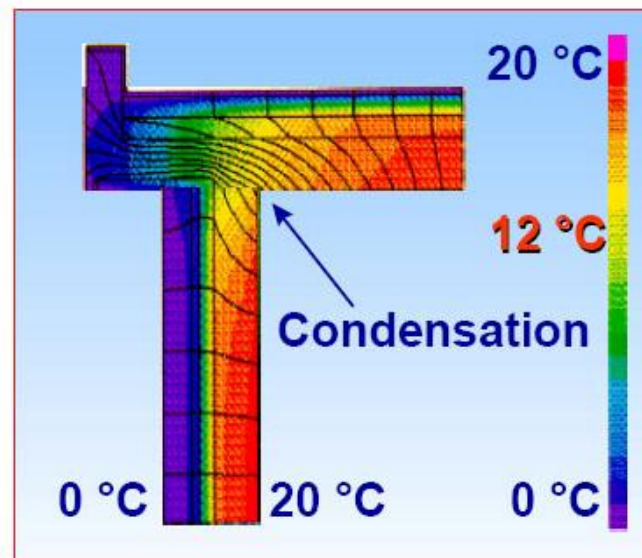
$$K = 0,853, \text{ arrondi à } \mathbf{0,85 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

EXEMPLE 5 Calcul du coefficient K du plancher sur cave représenté ci-dessous



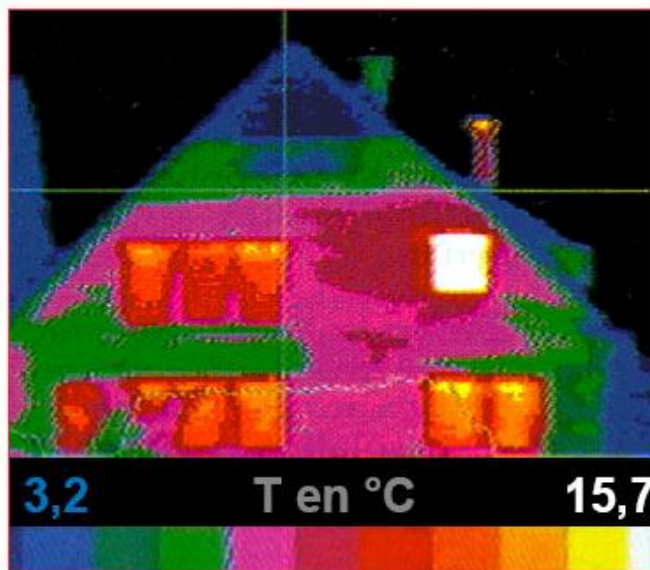
- Parquet sapin (§ 3,82) $\frac{e_1}{\lambda_1} = \frac{0,01}{0,12} = 0,083$
 - Plancher à entrevous en béton de 16 cm
(y compris la chape en béton de 4 cm) $E = 60$ cm (§ 4,312) $R_2 = 0,13$
 - Fibragglos de 7,5 cm (§ 4,43) $R_3 = 0,75$
 - Résistances d'échanges superficiels (paroi horizontale en
contact avec un local non chauffé flux descendant) $\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} = 0,34$
- $\frac{1}{K} = 1,303$
- $K = 0,767$, arrondi à **0,75** W/m². °C.

Les ponts thermiques sont des défauts dans l'enveloppe isolante, responsables de problèmes d'inconfort, de consommations supplémentaires et de dégradations dans le bâtiment.



Analyse du risque de condensation dans un détail de raccord de toiture.

La thermographie à infrarouge est un outil de diagnostic qui permet de visualiser les températures de surface de l'enveloppe d'un bâtiment et d'en connaître les points faibles.



Vue en fausses couleurs d'une maison très mal isolée.

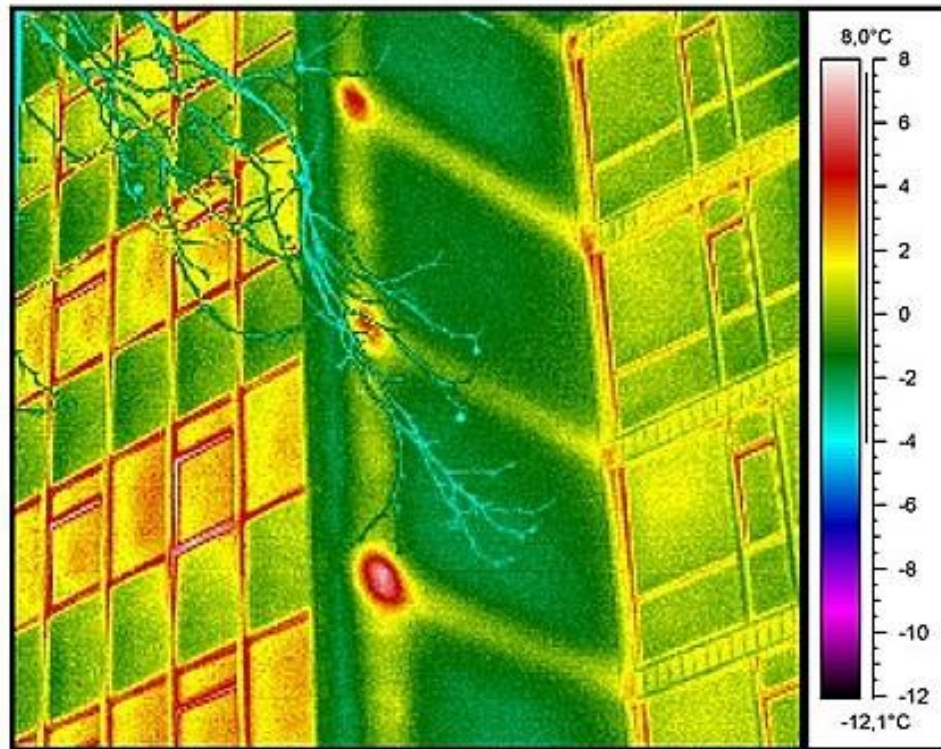
Bases de la thermographie

Une caméra de thermographie infrarouge est donc un appareil qui capte un rayonnement invisible et le restitue sous forme d'une image visible colorisée.



Pont thermique ?

Pont thermique = discontinuité isolation



Ponts thermiques

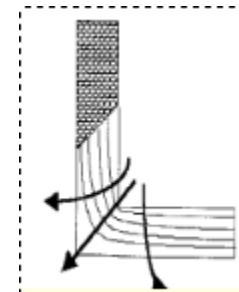
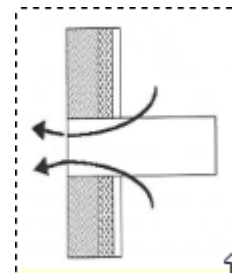
On distingue deux types de ponts thermiques :

- **Les ponts thermiques dus aux matériaux** qui résultent de la présence en certains points du bâtiment de matériaux ayant une grande conductivité thermique λ .
- **Les ponts thermiques dus à la géométrie**, rencontrés par exemple dans les angles, les coins et autres discontinuités qui présentent une résistance thermique inférieure à celle des autres parties faites du même matériau.

Le flux de chaleur dû au pont thermique est donné par :

$$\phi = k.l.(T_i - T_e)$$

Où l représente la longueur de la jonction et k exprimé en W/mK



Humidité et phénomènes de condensation

Changement d'état : On ne considère ici que les changements d'états liés aux transitions de phase.

Les transitions de phases font références au passage d'un état physique d'un corps pur à un autre de ces états. Les plus connus sont :

- Fusion : passage l'état solide à l'état liquide
Solidification (ou congélation)
- Vaporisation : passage l'état liquide à l'état gazeux
Condensation (ou liquéfaction)
- Sublimation : passage l'état solide à l'état gazeux

La quantité de chaleur consommée pour réaliser ces transitions est :

$$Q = mL$$

Où L est la chaleur latente (J/kg ou kcal/kg)

Remarque : Ces transitions se font de façon isotherme (càd à température constante)

Humidité et phénomènes de condensation

L'humidité de l'air constitue un facteur de confort pour l'occupant et la source De nombreux problèmes pathologiques dans le bâtiment à cause de la condensation qu'elle engendre.

L'eau de la condensation provoque une diminution des performances de l'enveloppe :

- dégradation des matériaux
- augmentation de la conductivité thermique
- gel
- etc...

Remarques :

- Il n'existe pas de solution unique pour l'ensemble de ces problèmes.
- Le point de rosée correspond à la température à partir de laquelle l'air ambiant se condense.

Humidité et phénomènes de condensation

Propriétés de l'air humide :

- L'humidité absolue W : dénote la teneur en eau de l'air humide

$$W = 0.622 \frac{P_s}{P_t - P_s}$$

W est exprimée en kg d'eau par kg d'air sec

P_s = pression de saturation

P_t = pression totale de l'air humide

- L'humidité relative HR : en général, l'air n'est pas saturé de vapeur d'eau

HR (%) exprime donc l'humidité relative de l'air

$$HR = 100 \frac{P_{eff}}{P_s}$$

P_{eff} = pression effective
ou partielle