



*Noria & Compagnie*

# “ Réhabilitation énergétique des bâtiments ”

*Jour 1 de 2*



**Samuel COURGEY**  
Référént technique – Formateur

## Sommaire.

- . **Thermique : rapides rappels**
- . **Posons le sujet**
- . **Le confort thermique**
- . **Une isolation performante**
- . **Focus “Inertie thermique”**
- . **Focus “Parois et humidité”**
- . **Ressources**
- . **Annexes**

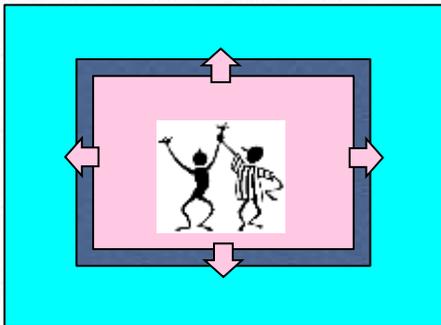


# Sommaire.

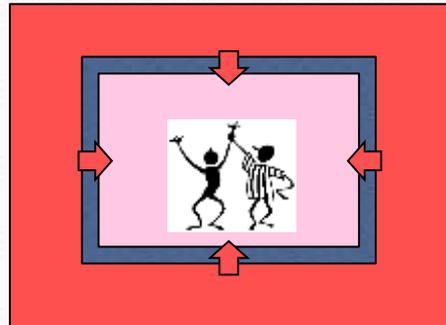
- . Thermique : rapides rappels
- . Posons le sujet
- . Le confort thermique
- . Une isolation performante
- . Focus "Inertie thermique"
- . Focus "Parois et humidité"
- . Ressources
- . Annexes



## Thermique. Rapides rappels



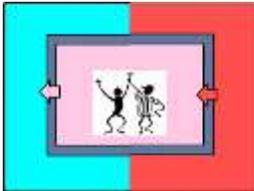
Hiver



Eté



## Thermique. Rapides rappels

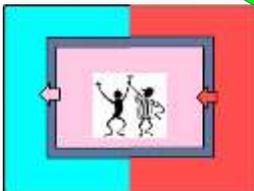


- Le flux (thermique) se fait du chaud au froid
- L'intensité du flux dépend des matériaux constituant la paroi et de la différence de température ( $\Delta t$ ), de part et d'autre de la paroi
- Ça « marche » dans les deux sens... et peu importe la saison
- La valeur qui exprime les déperditions d'une paroi est la **conductance** ou (coefficient de transmission thermique surfacique) **U**
- Pour calculer le U d'une paroi, il faut d'abord calculer son inverse R, ou résistance thermique

>5



## Thermique. Rapides rappels

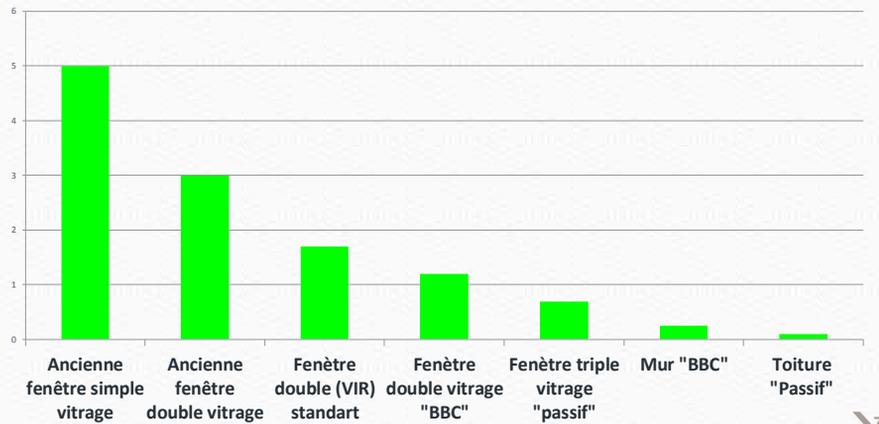


- Le flux (thermique) se fait du chaud au froid
- L'intensité du flux dépend des matériaux constituant la paroi et de la différence de température ( $\Delta t$ ), de part et d'autre de la paroi
- Ça « marche » dans les deux sens... et peu importe la saison
- La valeur qui exprime les déperditions d'une paroi est la **conductance** ou (coefficient de transmission thermique surfacique) **U**
- Pour calculer le U d'une paroi, il faut d'abord calculer son inverse R, ou résistance thermique

C'est le U qui nous intéresse

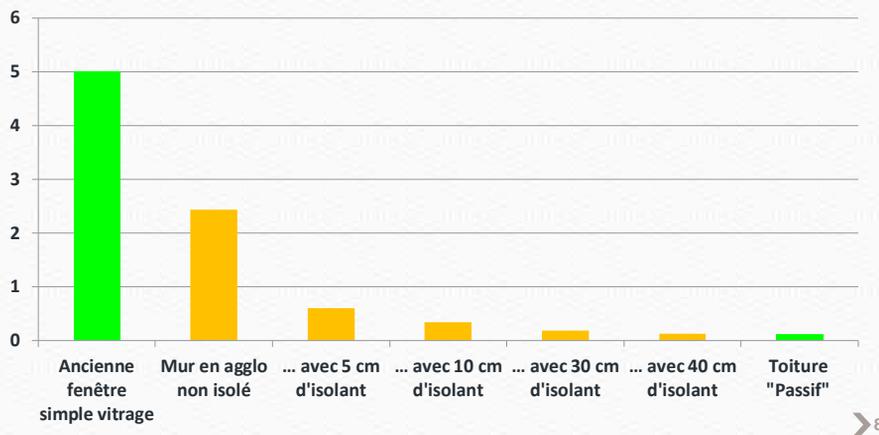
>6

## *Exemples de conductances - 1de2* (Valeur U, en W/m<sup>2</sup>K)



➤7

## *Exemples de conductances - 2de2* (Valeur U, en W/m<sup>2</sup>K)



➤8



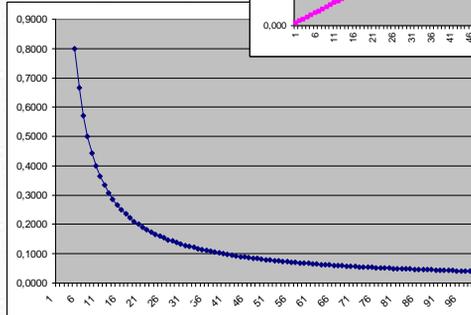
## Thermique : c'est le U qui nous intéresse !

Si la **résistance thermique** (R) d'un matériau est proportionnelle à son épaisseur, la quantité de calories qui le traverse (= déperditions), est renseignée par sa **conductance** (U).

**Courbe rose :**  
R, en m<sup>2</sup>K/W

**Courbe bleue :**  
U, en W/m<sup>2</sup>K

Calcul réalisé pour une paroi constituée d'un matériau homogène ayant un lambda de 0.04 W/mK



Abscisses :  
Épaisseur  
isolant en cm



## Sommaire.

- . Thermique : rapides rappels
- . **Posons le sujet**
- . Le confort thermique
- . Une isolation performante
- . Focus "Inertie thermique"
- . Focus "Parois et humidité"
- . Ressources
- . Annexes



## Les nouveaux enjeux du bâtiment sont environnementaux

- Changements climatiques
- Risque sur la santé humaine et sur la biodiversité
- Épuisement des ressources naturelles
  - ➔ fin de l'énergie bon marché
  - ➔ conflits engendrés par la localisation géographique des ressources...

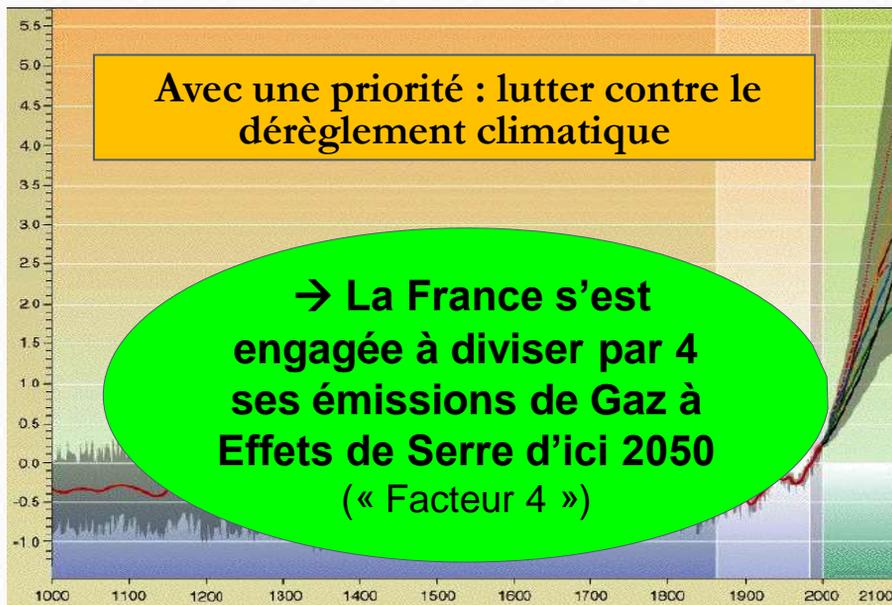
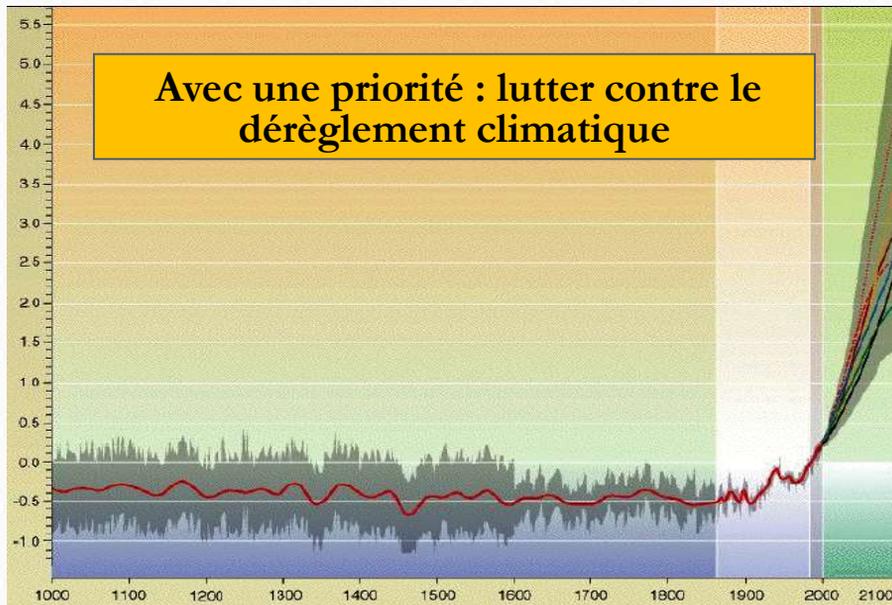
*Le bâtiment représente plus de 30% des émissions de GES...*

*Pluies acides, couche d'ozone...*

*Le bâtiment utilise 40% de l'énergie, plus de 50% des matières premières...*

## Les nouveaux enjeux du bâtiment sont environnementaux

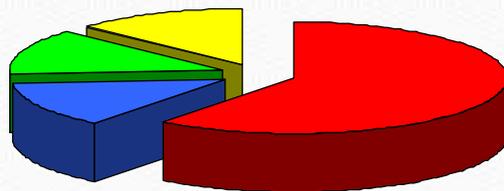
**Il nous faut produire le confort auquel la majorité aspire par des moyens radicalement plus performants d'un point de vue environnemental !**





- Pour y arriver, il faut entre autre :**
- **réhabiliter l'ensemble du parc au niveau BBC ;**
  - **ne construire que des bâtiments de type passif.**

## **Consommation énergétique d'un bâtiment sur sa vie entière**



- Chauffage (+ clim)
- Eau Chaude Sanitaire
- Construction (énergie grise)
- Electricité spécifique

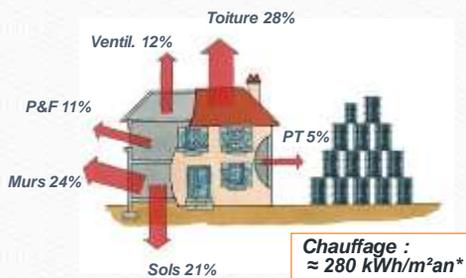
Répartition des consommations d'énergie. Maison existante moyenne / Climat français moyen

## Consommation énergétique d'un bâtiment sur sa vie entière

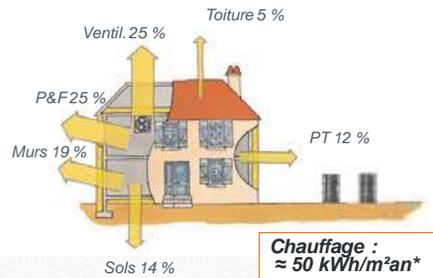
- **Sous nos climats, la priorité des priorités :**
- **limiter drastiquement les besoins de chauffage ;**
  - **tout faire pour se passer de système de rafraîchissement.**

## Plusieurs types de performances (exemple avec la maison individuelle)

**Maison non isolée années 60.**



**... La même « rénovée BBC ».**



\* Consommations de chauffage en kWh énergie primaire par m<sup>2</sup> Shon

## **Plusieurs types de performances**

*(exemple avec la maison individuelle)*

**L'action la plus facile et la plus efficace pour rendre un bâtiment thermiquement performant :**

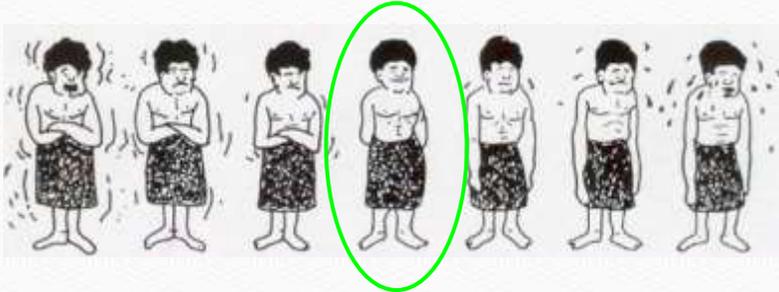
**→ Isoler ses parois !**

***Mais au fait,  
que recherche t'on ?***

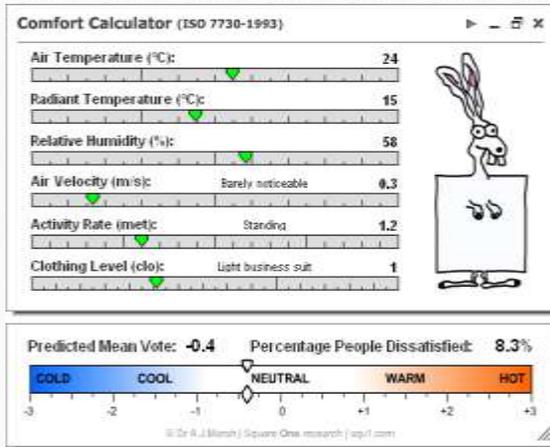
**Être bien !**



**... c'est à dire, entre autre, n'avoir  
ni trop chaud, ni trop froid !**



## Le confort thermique (normalisé..., soit simplifié)



Source image : <http://squ1.com>

La norme NF EN ISO 7730 donne un pourcentage de personnes statistiquement satisfaites/insatisfaites du confort thermique...

## Le confort thermique (normalisé..., soit simplifié)



. En plus de l'habillement et de l'activité physique, quatre critères interviennent dans le confort thermique :

- **la température de l'air**
- **la température des parois**
- **le mouvement de l'air**
- **l'humidité de l'air**

... Ce qui coûte le plus cher à produire, au porte-monnaie comme à l'environnement, c'est élever la température de l'air (selon le type de logement : 7 à 20% de chauffage en plus par degré supplémentaire).

## Le confort thermique (normalisé..., soit simplifié)



. En plus de l'habillement et de l'activité physique, quatre critères interviennent dans le confort thermique :

- ➔ la température de l'air
- ➔ la température des parois
- ➔ le mouvement de l'air
- ➔ l'humidité de l'air

**La priorité étant d'économiser l'énergie, nous interviendrons donc d'abord sur les points 2, 3 et 4 ! ...**

## Le confort thermique (normalisé..., soit simplifié)



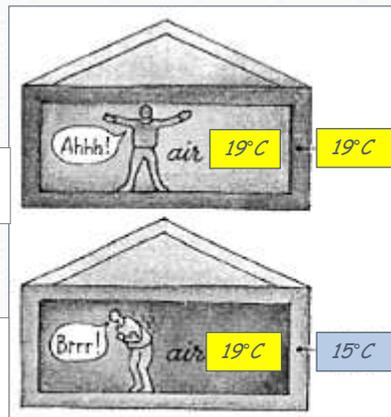
Avec une humidité relative moyenne (30 à 60%) et en l'absence de mouvement d'air :

**t° ressentie (ou opérative)**  
 $= \frac{1}{2} \times (t^\circ \text{ Air} + t^\circ \text{ Parois})$

*\* Ces conditions sont estimées respectées si l'installation de renouvellement d'air est effective, et si les espaces intérieurs ne souffrent d'aucune réelle inétanchéité à l'air.*

Température ressentie par les occupants = 19 °C

T° ressentie = 17 °C  
 ... soit une sensation d'inconfort



## Le confort thermique (normalisé..., soit simplifié)



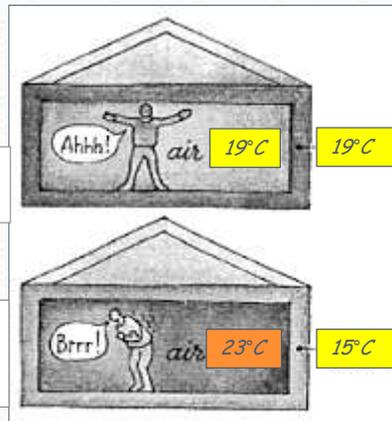
Avec une humidité relative moyenne (30 à 60%) et en l'absence de mouvement d'air :

**$t^{\circ}$  ressentie (ou opérative)**  
 **$= \frac{1}{2} \times (t^{\circ}\text{Air} + t^{\circ}\text{Parois})$**

*\* A partir du moment où la  $t^{\circ}$  des parois est inférieure d'env. 4°C à celle de l'air en hiver, une sensation d'inconfort intervient. On y remédie en augmentant encore la  $t^{\circ}$  de l'air.*

Température ressentie par les occupants = 19 °C

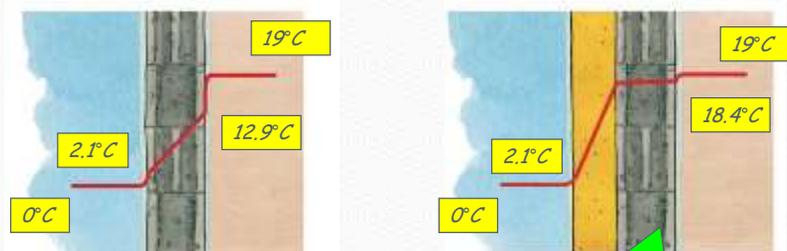
$T^{\circ}$  ressentie = 19 °C  
 ... mais une sensation d'inconfort\*



## Le confort thermique (normalisé..., soit simplifié)



→ Pour avoir des parois tempérées, il faut d'abord et avant tout les isoler !



A noter que le résultat serait identique avec une ITI

## → ISOLER POUR :

- ❖ Empêcher les calories de sortir en période froide, de rentrer en période chaude
- ❖ Avoir des parements tempérés
- ❖ Éviter les risques de condensations de surface
- ❖ Pouvoir composer efficacement avec l'inertie (pour optimiser le captage solaire, éviter les surchauffes estivales...)
- ❖ et lorsque ce peut être opportun, augmenter le déphasage du flux de chaleur et atténuer son amplitude



## **ISOLER !**

### ***Différents matériaux possibles***



*Quel matériau choisir ?  
Quels critères retenir ?*



# Sommaire.

- . Thermique : rapides rappels
- . Posons le sujet
- . Le confort thermique
- . **Une isolation performante**
- . Focus “Inertie thermique”
- . Focus “Parois et humidité”
- . Ressources
- . Annexes

## ***Une isolation performante ?***

***Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :***

- ***conséquente***
- ***généralant très peu de ponts thermiques***
- ***accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air***
- ***composant judicieusement avec l'inertie***
- ***pérenne***

## Une isolation performante ?

**Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :**

- **conséquente**
- **générant très peu de ponts thermiques**
- **accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air**
- **composant judicieusement avec l'inertie**
- **pérenne**

## . Une isolation conséquente

	MURS	U en W/(m².K)	Isolant (cm)
Hier	Non isolé		
Aujourd'hui	Isolé	0,40	10
Demain	<b>MURS :</b>	<b>≈ 0,25 à 0,15</b>	<b>15 à 30</b>
	TOITURE	U en W/(m².K)	Isolant (cm)
Hier	Non isolé		
Aujourd'hui	Isolé	< 0,20	20 à 30
Demain	<b>TOITURES :</b>	<b>≈ 0,15 à 0,08</b>	<b>30 à 50</b>
	SOLS	U en W/(m².K)	Isolant (cm)
Hier	Non isolé		
Aujourd'hui	Isolé	0,60	4 à 6
Demain	<b>SOLS :</b>	<b>≈ 0,30 à 0,15</b>	<b>10 à 25</b>

## **Une isolation performante ?**

**Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :**

- **conséquente**
- **généralant très peu de ponts thermiques**
- **accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air**
- **composant judicieusement avec l'inertie**
- **pérenne**

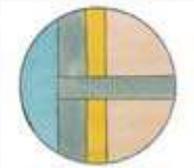
## **. Des parois sans pont thermique**

- **Pour limiter les déperditions thermiques**
- **Pour limiter les risques de condensations et de dégradations du bâti**
- **Pour ne pas générer de points froids (inconfort, risques de moisissures de surface...)**

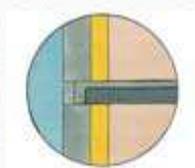
## Des parois sans pont thermique (de liaison)

L'importance du choix du système constructif. Exemples

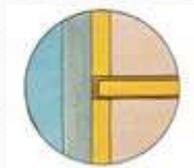
Déperditions par mètre de pourtour de dalle (et % des déperditions sur une hauteur d'étage\*)



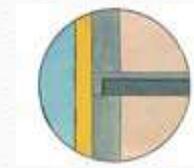
$\Psi = 0,99 \text{ W/m.K}$   
(63%)



$\Psi = 0,64 \text{ W/m.K}$   
(52%)



$\Psi = 0,16 \text{ W/m.K}$   
(21%)



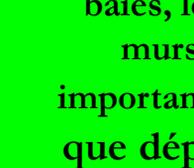
$\Psi = 0,06 \text{ W/m.K}$   
(3%)

\* Pour un mur isolé aux performances BBC moyennes (0,23 W/m.K), une hauteur d'étage de 2,50 m. Valeurs  $\psi$  (psy) des règles THC (réglementation thermique).

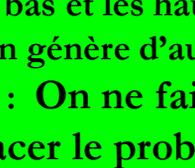
## Des parois sans pont thermique (de liaison)

L'importance du choix du système constructif. Exemples

Déperditions par mètre de pourtour de dalle (et % des déperditions sur une hauteur d'étage\*)



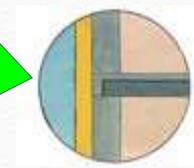
$\Psi = 0,06 \text{ W/m.K}$   
(3%)



$\Psi = 0,06 \text{ W/m.K}$   
(3%)



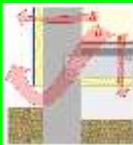
$\Psi = 0,06 \text{ W/m.K}$   
(3%)



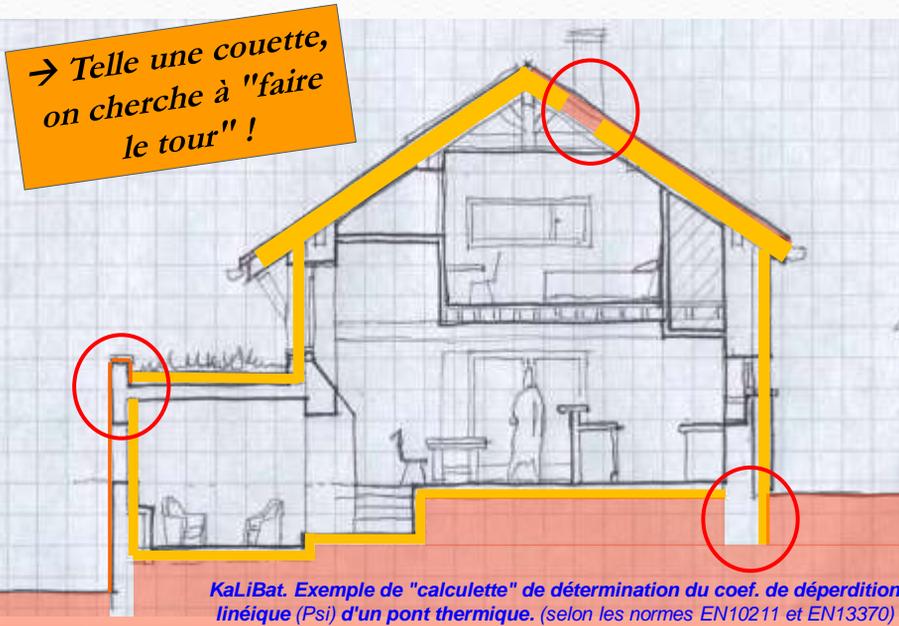
$\Psi = 0,06 \text{ W/m.K}$   
(3%)

\* Pour un mur isolé aux performances BBC moyennes (0,23 W/m.K), une hauteur d'étage de 2,50 m. Valeurs  $\psi$  (psy) des règles THC (réglementation thermique).

Mais attention, le bâtiment est un tout, et, si le pont thermique d'about de dalle disparaît avec l'ITE, oublier dans ce système de traiter finement les tours de baies, les bas et les hauts de murs en genre d'aussi importants : On ne fait alors que déplacer le problème !



## . Des parois sans pont thermique (de liaison)



43

## . Des parois sans pont thermique (intégré)

Épaisseur d'isolant ( $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ ) nécessaire pour un U de  $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$  en doublage d'un mur maçonné.

	16,0 cm
	17,6 cm
	20,5 cm
	32,2 cm



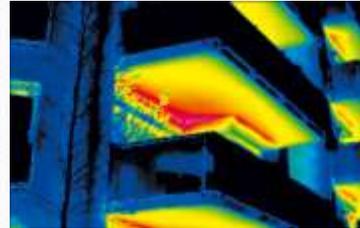
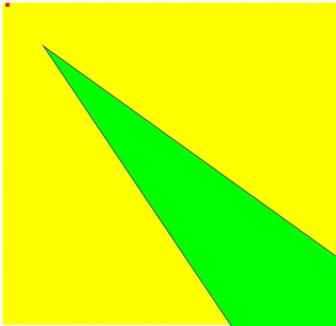
Source : Lignotrend

Avec ossature (rail ou poteau bois) tous les 60 cm

> 44

## . Des parois sans pont thermique

- **Réseaux** : veiller à limiter les traversées d'isolants.



- **Balcons** : véritables ailettes de refroidissement des bâtiments, ils devront être déposés ou intégrés à l'espace chauffé (devenant alors, serre solaire ou espace tampon).

Les déperditions thermiques d'un cm<sup>2</sup> de cuivre ( $\lambda = 380 \text{ W/m.K}$ ) sont identiques à celles d'un m<sup>2</sup> d'isolant ( $\lambda = 0,038 \text{ W/m.K}$ ) ! ... De plus nous n'estimons pas là les éventuelles faiblesses dues à une jonction cuivre/isolant non continue ou une étanchéité à l'air non irréprochable autour du cuivre !

## . Des parois sans pont thermique

Une enveloppe sans pont thermique sous entend :

- un diagnostic qui repère l'ensemble des potentiels points faibles
  - une conception qui propose les détails techniques de réalisation
  - une réalisation qui ne souffre d'aucun "à peu près"
- ... ceci sous-entend donc, entre autre : un budget qui permet d'apporter ce « soin » nécessaire.

## . Des parois sans pont thermique

**Bientôt de (nouvelles) obligations de résultats ?**

Quelques fois, nous n'avons pas besoin de caméra thermique !

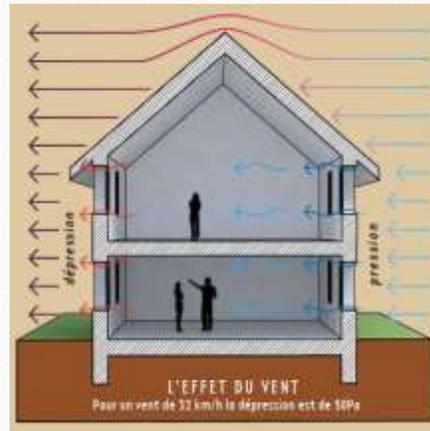
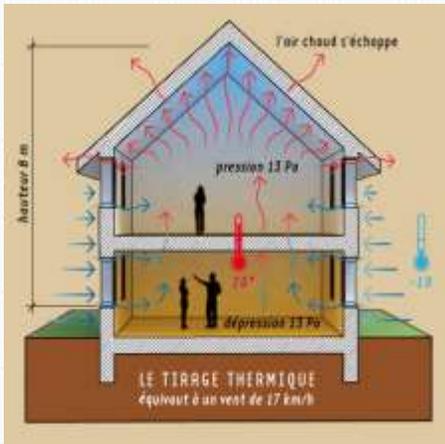


## **Une isolation performante ?**

**Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :**

- **conséquente**
- **générant très peu de ponts thermiques**
- **accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air**
- **composant judicieusement avec l'inertie**
- **pérenne**

## . Une enveloppe étanche à l'air



Convertisseur des vents : <http://www.cactus2000.de/fr/unit/masswsp.shtml>

> 49

## . Une enveloppe étanche à l'air

- . Pour limiter les déperditions thermiques
- . Pour limiter les risques de condensations et dégradations du bâti
- . Pour ne pas générer d'inconforts dus à des mouvements d'air
- . Pour ne pas dégrader la qualité de l'air intérieur
- . Pour permettre un bon fonctionnement de la ventilation

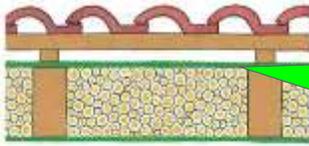
> 50

## . Une enveloppe étanche à l'air

### Fonctionnement des isolants

Le principe de base de l'isolation thermique repose sur la multiplication de petites poches d'air immobiles... Mais il ne faut également pas que de l'air circule entre ces « poches ».

→ Pour isoler, il faut que l'isolant empêche ces mouvements, ou qu'il soit protégé de tout risque de traversée d'air.

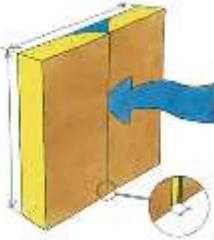
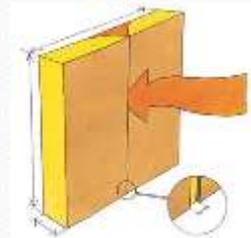


Une précaution peu développée en France : réaliser coté extérieur une réelle protection au vent (pare-pluie collés et/ou panneaux bouvetés)

## . Une enveloppe étanche à l'air

Quantification des pertes thermiques dues à un pare air non continu devant un isolant non étanche à l'air (ici laine minérale).

→ Avec une fente de 1mm pour 1m<sup>2</sup> d'isolant, la valeur U chute de 0.30 à 1.44, soit un pouvoir isolant divisé par 4.8.



Quantification des infiltrations de vapeur d'eau dues à un pare air non continu devant un isolant non étanche à l'air (ici laine minérale).

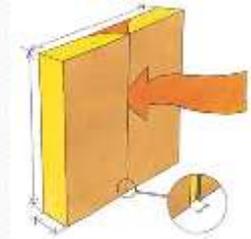
→ Avec une fente de 1mm pour 1m<sup>2</sup> d'isolant, la quantité de vapeur d'eau qui entre par jour dans le mur est de 800g contre quelques grammes avec un pare-vapeur ou un frein de vapeur continu

Source : Institut de physique du bâtiment- Stuttgart. Essai réalisé sur une laine minérale avec une différence de pression de 20 Pa.

## . Une enveloppe étanche à l'air

Quantification des pertes thermiques dues à un pare air non continu devant un isolant non étanche à l'air (ici laine minérale).

→ Avec une fente de 1mm pour 1m<sup>2</sup> d'isolant, la valeur U chute de 14, soit un pouvoir isolant divisé par 4.8.



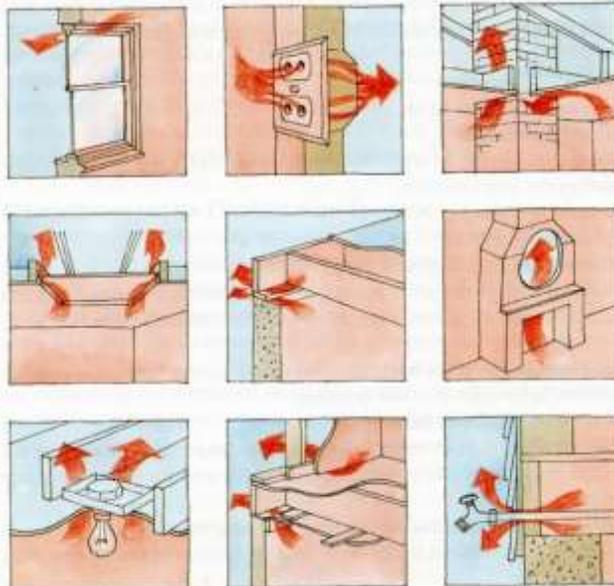
Cet essai fait avec de la laine minérale ne montre pas une fragilité de ce seul matériau, mais de l'ensemble des isolants en vrac, en nattes peu denses, et de certains bétons légers.

Quantification des infiltrations de vapeur d'eau dues à un pare air non continu devant un isolant non étanche à l'air (ici laine minérale).

Avec une fente de 1mm pour 1m<sup>2</sup> d'isolant, la quantité de vapeur d'eau qui entre par jour dans le mur est de 800g, soit quelques grammes avec un pare-vapeur ou un frein vapeur continu

Source : Institut de physique du bâtiment- Stuttgart. Essai réalisé sur une laine minérale avec une différence de pression de 20 Pa.

## . Une enveloppe étanche à l'air



## . Une enveloppe étanche à l'air



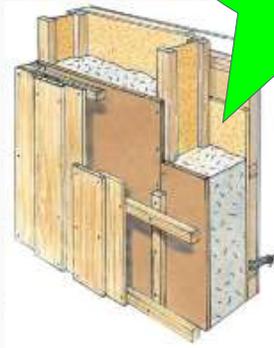
## . Une enveloppe étanche à l'air



## . Une enveloppe étanche à l'air



## . Une enveloppe étanche à l'air



**En éloignant le panneau (ou la membrane) du parement nous simplifions la pose des réseaux.. Et assurons une meilleure durabilité de l'étanchéité à l'air !**

## . Une enveloppe étanche à l'air

La réussite d'une étanchéité à l'air ne s'improvise pas. En plus de produits adaptés et pérennes, cela sous-entend :

- une définition très ajustée, dès la phase Projet, des détails de réalisation ;
- une gestion de chantier qui ne laisse aucun hasard, entre autre à l'interface entre les divers intervenants.

Carnet de détails intéressant ([MININFIL](http://www.cete-lyon.equipement.gouv.fr)) sur [www.cete-lyon.equipement.gouv.fr](http://www.cete-lyon.equipement.gouv.fr)

## . Une enveloppe étanche à l'air

Déjà des obligations de résultats !



Sources photos : Arcanne et CEBTP (chantier de Montholier FFB/ADEME)

	Maison individuelle		Logement collectif	
	Q4 (m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> )	n50 (vol/h)	Q4 (m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> )	n50 (vol/h)
RT 2012	0,6	2,3	1	2,2
Passivhaus	0,16	0,6	0,28	0,6
BBC-eff. existant.	0,8	3,1	1,3	2,8

## . Une enveloppe étanche à l'air



Quelques fois nous n'avons pas besoin de test d'étanchéité à l'air !

## Une isolation performante ????

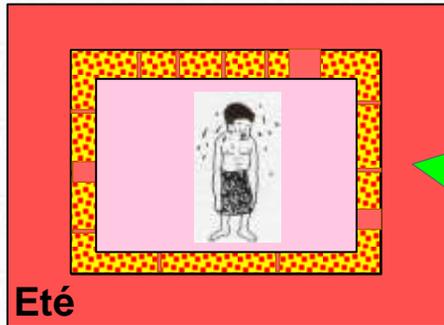


Hiver

Au final, l'isolation de l'enveloppe est souvent dégradée de :

- 30 à 75 % par les ponts thermiques de liaison
- 10 à 50% par les autres ponts thermiques (réseaux ou PT intégrés)
- 10 à 80% par les inétanchéités à l'air !

## Une isolation performante ????



Au final, l'isolation de l'enveloppe est souvent dégradée de :

- 30 à 75 % par les ponts thermiques de liaison
- 10 à 50% par les autres ponts thermiques (réseaux ou PT intégrés)
- 10 à 80% par les inétanchéités à l'air !

## Une isolation performante ?

**Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :**

- **conséquente**
- **générant très peu de ponts thermiques**
- **accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air**
- **composant judicieusement avec l'inertie**
- **pérenne**

## L'inertie thermique

Deux grandeurs pour comprendre/expliquer  
l'inertie thermique :

- l'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)
- l'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

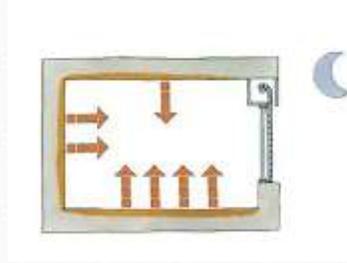
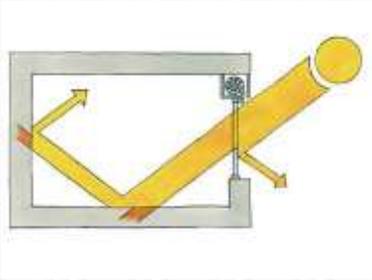
## L'inertie thermique

Deux grandeurs pour comprendre/expliquer  
l'inertie thermique :

- l'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)
- l'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

# L'inertie thermique

## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

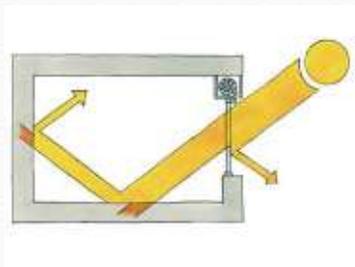


... mais attention, ce comportement n'est pas forcément toujours recherché. On se posera par exemple la question de la pertinence de l'inertie pour des bâtiments utilisés de manière discontinue, voire épisodique... et toutes les pièces ne voient pas le soleil !

> 68

# L'inertie thermique

## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)



... La pertinence remarquée ici ne vaut donc que si un rafraîchissement du bâtiment par surventilation nocturne est possible

> 69

# L'inertie thermique

## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

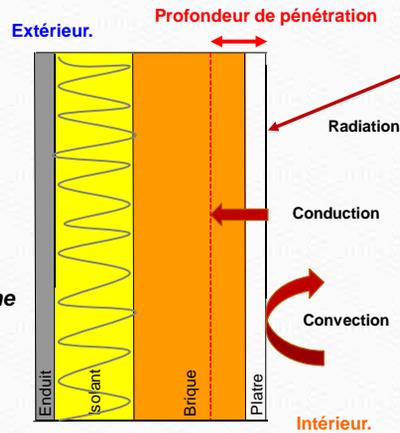
→ Fait référence à la quantité de chaleur pouvant interagir avec l'air intérieur sur une période donnée.

Elle dépend de la masse, de la chaleur spécifique et de la diffusivité des matériaux, ainsi que de l'état de surface des parements (couleur, rugosité...).

La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :

- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
- 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **séquentielle**

\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF EN ISO 13786



# L'inertie thermique

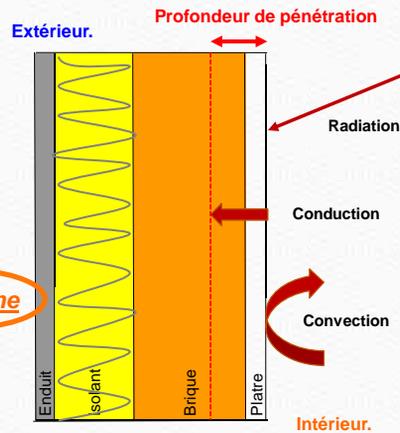
## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

→ Pour limiter les surchauffes en été\*  
 → Pour profiter des calories solaires l'hiver.  
 \* en complément d'une surventilation nocturne

La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :

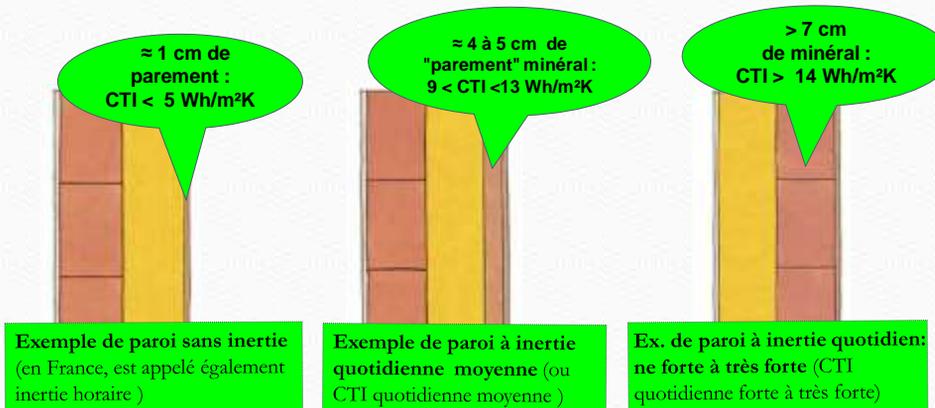
- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
- 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **séquentielle**

\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF EN ISO 13786



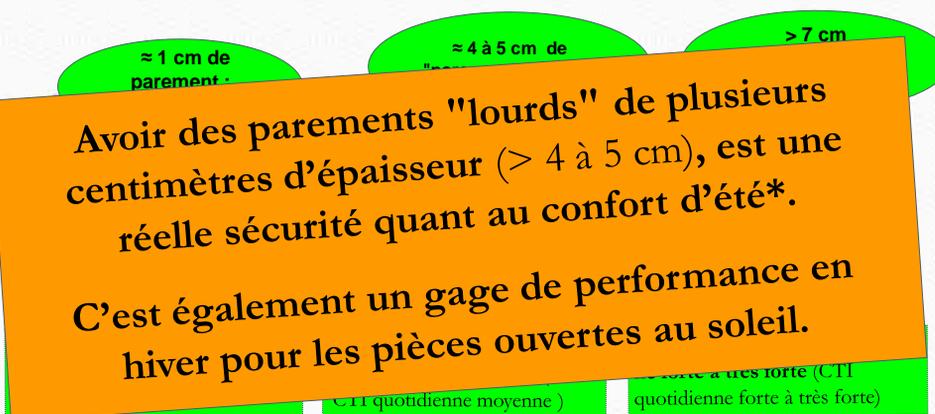
# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure quotidienne (ou CTI quotidienne)



# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure quotidienne (ou CTI quotidienne)



\* Dans le cas où un "rafraîchissement" du bâtiment est possible par surventilation nocturne. > 73



# L'inertie thermique

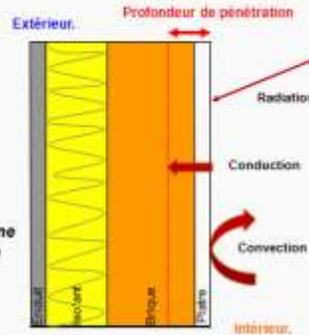
## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

→ Fait référence à la quantité de chaleur pouvant interagir avec l'air intérieur sur une période donnée.

Elle dépend de la masse, de la chaleur spécifique et de la diffusivité des matériaux, ainsi que de l'état de surface des parements (couleur, rugosité...).

- La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :
- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
  - 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **séquentielle**

\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF-EN ISO 13786.



> 50

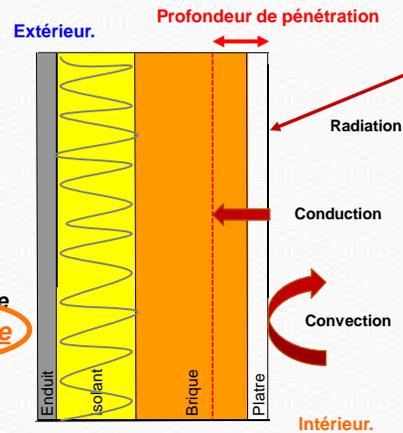
# L'inertie thermique

## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

→ Pour limiter les surchauffes d'été\* malgré qq. jours de canicule  
 → en hiver, pour retrouver un intérieur encore tempéré malgré qq. jours sans chauffage.

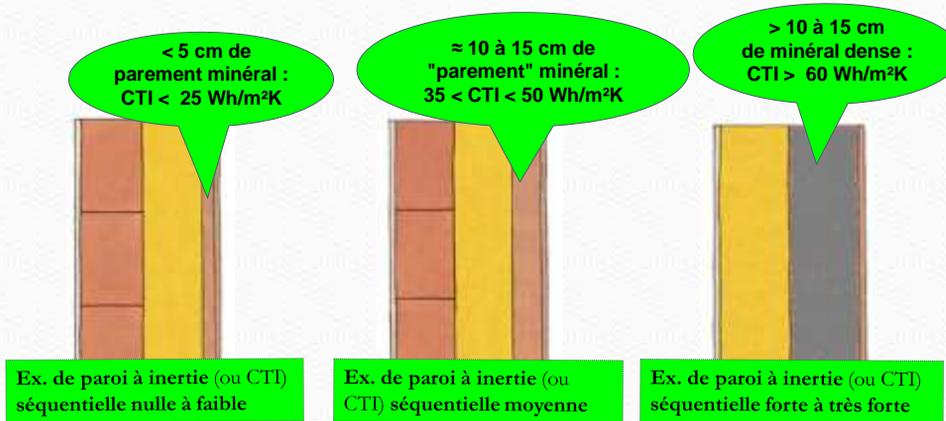
- La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :
- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
  - 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **séquentielle**

\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF-EN ISO 13786.



# L'inertie thermique

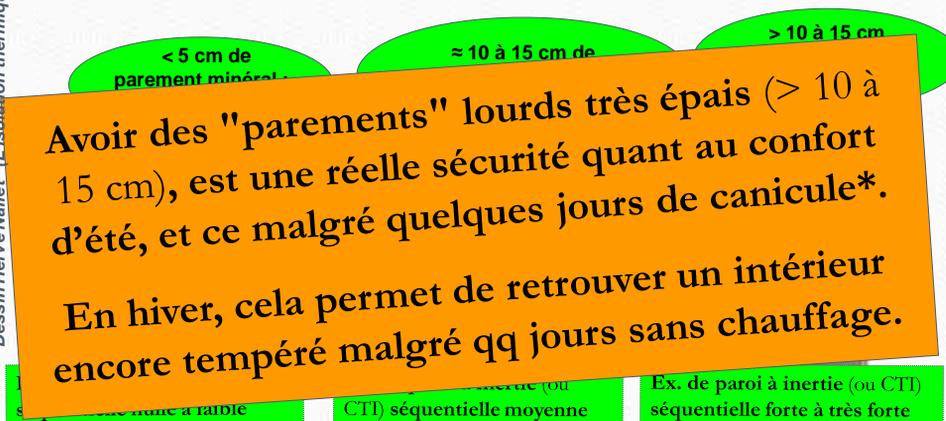
## 1.b. L'inertie intérieure séquentielle (ou CTI séquentielle)



Dessin Hervé Nallet (L'isolation thermique écologique)

# L'inertie thermique

## 1.b. L'inertie intérieure séquentielle (ou CTI séquentielle)

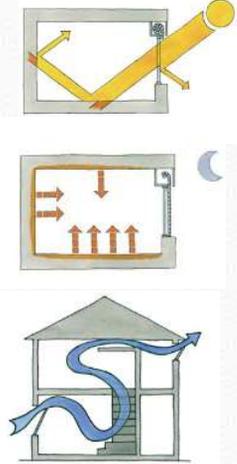


Avoir des "parements" lourds très épais (> 10 à 15 cm), est une réelle sécurité quant au confort d'été, et ce malgré quelques jours de canicule\*.

En hiver, cela permet de retrouver un intérieur encore tempéré malgré qq jours sans chauffage.

\* Dans le cas où un "rafraîchissement" du bâtiment est possible par surventilation nocturne. > 77

# L'inertie thermique



## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)

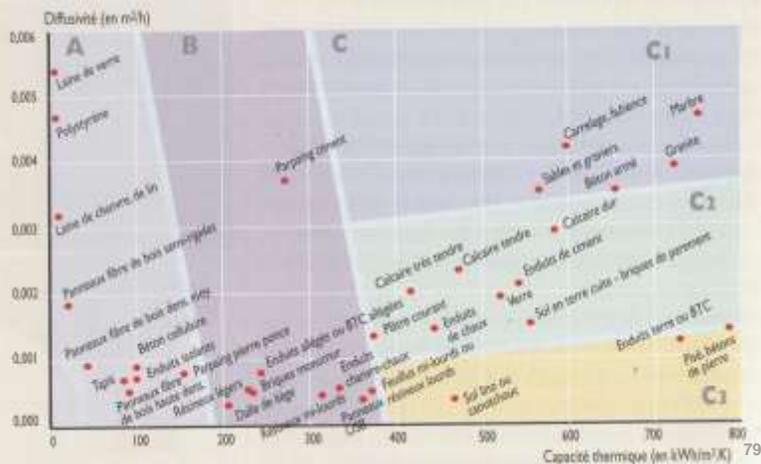
- Plus elle est répartie sur l'ensemble des parois, plus son incidence est réelle.
- Il lui faut être en priorité sur les surfaces recevant le soleil et/ou facilement léchées par la sur-ventilation nocturne.
- L'aspect sombre et rugueux des parements augmente les échanges thermiques.

. Pour calculer la CTI d'un m<sup>2</sup> de paroi : voir norme ISO 13786 et/ou parois type en annexe.  
 . Pour calculer la CTI d'une pièce : on multiplie la CTI de chaque paroi par sa surface, on additionne le résultat des différentes parois de la pièce, l'on divise par la surface de plancher. > 78

# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)

- Zone A :** Matériaux non adaptés à la création de masses inertielles.
- Zone B :** Matériaux pouvant apporter un peu d'inertie, surtout si leur surface est laissée rugueuse.
- Zone C :** Matériaux adaptés à la création de capacité thermique intérieure :
- quotidienne. Dans des épaisseurs allant de 3 (C3) à 6 cm (C1)
  - séquentielle. Dans des épaisseurs allant de 15 (C3) à 25 cm (C1)



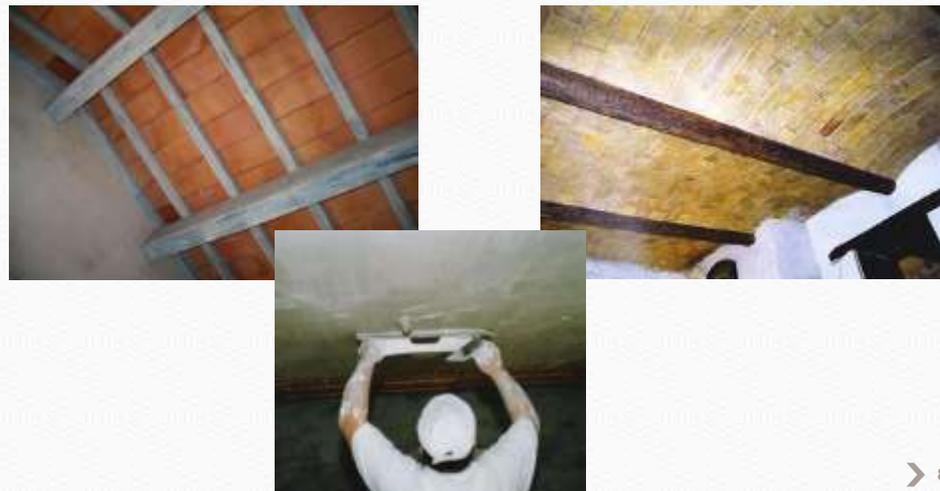
# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)



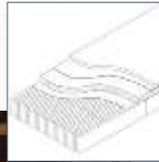
# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)



# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)



***... et bien entendu, lorsque l'on parle de confort d'été, la pertinence de l'inertie intérieure ne vaut que si l'on profite chaque nuit de la fraîcheur nocturne pour évacuer les calories accumulées en journée !***



# L'inertie thermique

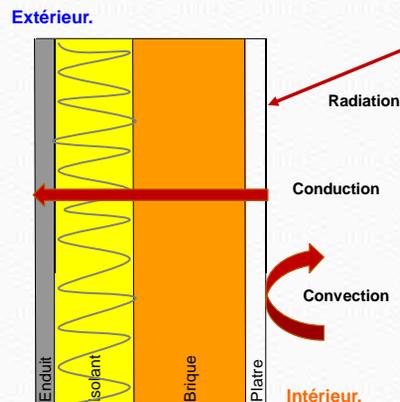
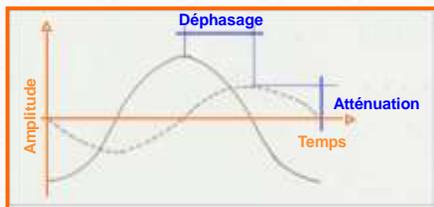
Deux grandeurs pour comprendre/expliquer l'inertie thermique :

- l'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)
- l'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

La capacité thermique totale, en wattheure par mètre carré kelvin ( $Wh/m^2.K$ ), permet de calculer le **déphasage** (heure) du flux de chaleur, et l'**atténuation de son amplitude** (%)



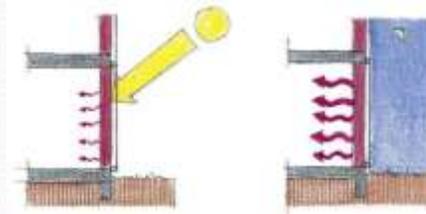
# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

Composer avec l'inertie de transmission (CTT) sert d'abord et avant tout à :

- optimiser les murs capteurs et fonds de serre ;
- comprendre le comportement des murs massifs\*.

Fonctionnement  
type d'un mur  
capteur →



\* C'est par ex. une des clefs permettant de comprendre pourquoi le patrimoine ancien n'est pas si déperditif que ce que nous en dit la thermique statique (calculs des RT, DPE...)

➤ 86

# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

*Quelques fois, les vendeurs d'isolants denses, généralement de matériaux bio-sourcés, parlent de déphasage, d'atténuation du flux de chaleur pour vanter leurs produits.*

*Ils seraient de fait particulièrement performants en été, contrairement aux isolants standards (polystyrène, laine minérale...)*

➤ 87

## L'inertie thermique

### 2. L'inertie de transmission *(ou capacité thermique totale)*

***S'il est exact que les isolants à "forte" capacité thermique déphasent plus le flux de chaleur, et atténuent plus son amplitude !***

- Cette participation des isolants est anecdotique sur une paroi lourde.
- Pour les parois légères, elle est secondaire vis-à-vis d'une forte isolation, d'une bonne étanchéité à l'air, de parements intérieurs lourds, et d'une sur-ventilation des parements exposés au soleil.

88

## L'inertie thermique

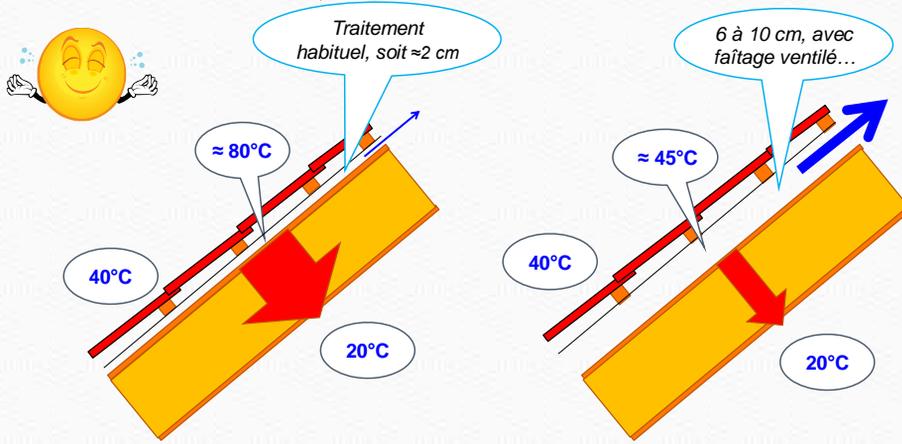
### 2. L'inertie de transmission *(ou capacité thermique totale)*

**Si l'utilisation d'isolants à "forte" capacité thermique peut être d'importance, c'est particulièrement dans les combles et MOB dans lesquelles il n'est pas possible de composer réellement avec les « principaux leviers »**

*(forte isolation + étanchéité à l'air réelle, quasi absence de ponts thermiques, parements intérieurs lourds, sur-ventilation des parements exposés au soleil...)*

89

## ... La pertinence d'avoir des parements ventilés... et de les surventiller !



Le flux de chaleur étant proportionnel à la différence de  $t^\circ$  de part et d'autre d'un corps, dans notre exemple, le complexe isolant de gauche laisse passer 2,5 fois plus de calories que celui, identique, de droite.

## Le "toit parasol" antillais





**... Et bien entendu, lorsque l'on parle de confort d'été, il faut également :**

- **ajuster/limiter la surface des baies vitrées ;**
- **éventuellement choisir des vitrages spéciaux ;**
- **aménager les abords** (végétalisation, plan d'eau... ) ;
- **et surtout : installer des protections solaires... et ce, si possible à l'extérieur du vitrage.** ("On n'attend pas que le loup soit dans la bergerie !")

## **Une isolation performante ?**

**Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :**

- **conséquente**
- **générant très peu de ponts thermiques**
- **accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air**
- **composant judicieusement avec l'inertie**
- **pérenne**

## . Une isolation pérenne

- ... *Sensibilité au vieillissement*
- ... *Sensibilité aux tassements*
- ... *Sensibilité aux insectes et aux rongeurs*
- ... *Sensibilité au feu*
- ... *Sensibilité à l'humidité ...*



Protection anti-termites



Mauvais vieillissement d'isolant



Essai au feu (CSTB 2009) pour paroi d'école en ossature bois isolés de paille

## . Une isolation pérenne

Sur ces sujets, si les caractéristiques propres au matériau comptent, c'est également :

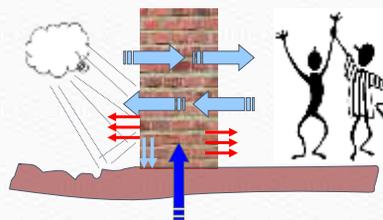
- la densité du produit mis en œuvre ;
- la possibilité de le fixer mécaniquement ;
- le type et la qualité des parements ;
- la qualité de mise en œuvre et l'entretien qui feront la différence.

# Sommaire.

- . Thermique : rapides rappels
- . Posons le sujet
- . Le confort thermique
- . Une isolation performante
- . Focus “Inertie thermique”
- . **Focus “Parois et humidité”**
- . Ressources
- . Annexes

Séquence adaptée aux bâtiments non climatisés, de classes d'hygrométrie 1 à 3 (Norme 13788), et pour les climats tempérés (France métropolitaine)

## PAROIS et HUMIDITE



Travail inspiré d'une collaboration avec Bruno JARNO (Arcanne/AJENA)

## Les dommages pouvant être dus à l'humidité ?

## Les dommages pouvant être dus à l'humidité sont d'ordre mécanique, chimique, bactériologique...



Sur les parements extérieurs



Sur les parements intérieurs



Dans les parois (matériaux structurels isolants...)

**Les dommages pouvant être dus à l'humidité sont d'ordre mécanique, chimique, bactériologique...**

**Avec des incidences possibles sur :**

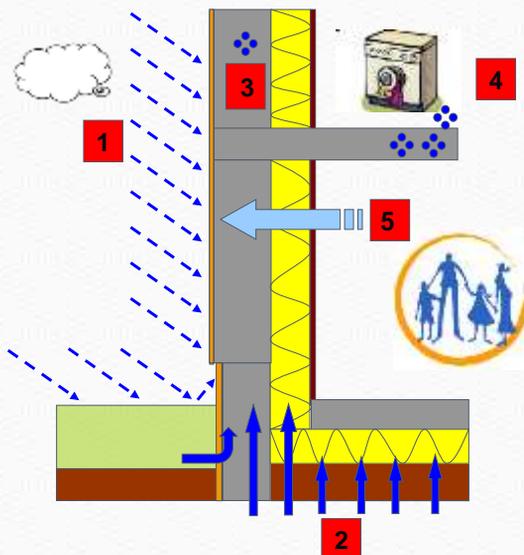
- la qualité de l'air intérieur
- la performance thermique
- la durabilité des performances
- la pérennité du bâti

Sur le  
e.

structures  
isolants...)

➤ 100

**Quelles sont les sources d'humidité ?**



1. Pluie
2. Remontées capillaires
3. Eau contenue dans les matériaux
4. Inondation & accidents domestiques
5. Vapeur d'eau

➤ 101

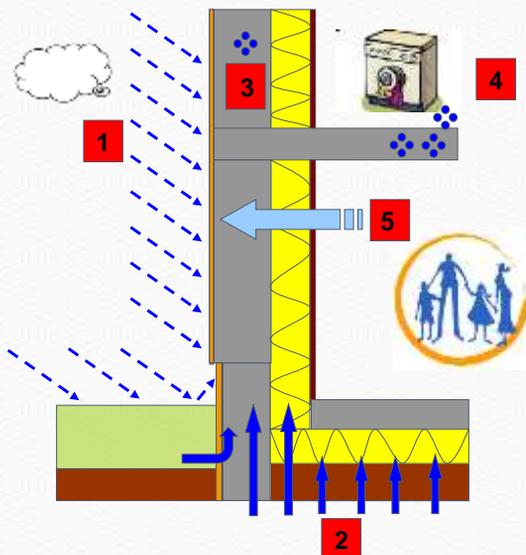
**Se protéger de l'humidité est une des bases des métiers du bâtiment.**

**Sur ce sujet les règles de l'art (DTU, normes, règles pro...) et avis d'experts (Avis techniques...) sont assez pertinents.**

**... Sauf sans doute sur le sujet "Gestion de la vapeur d'eau" où les questions restent encore assez nombreuses.**



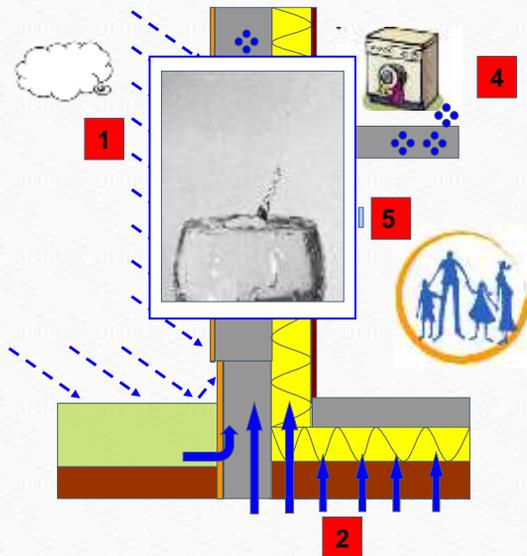
## Quelles sont les sources d'humidité ?



1. Pluie
2. Remontées capillaires
3. Eau contenue dans les matériaux
4. Inondation & accidents domestiques
5. Vapeur d'eau

5. Vapeur d'eau

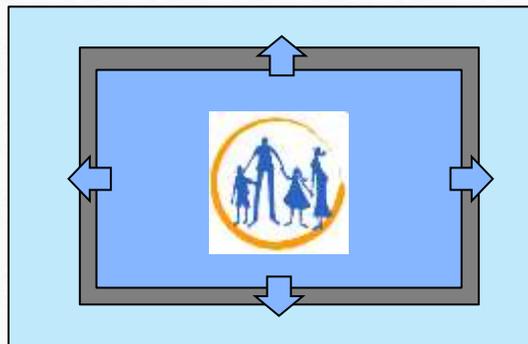
## Quelles sont les sources d'humidité ?



1. Pluie
2. Remontées capillaires
3. Eau contenue dans les matériaux
4. Inondation & accidents domestiques
5. Vapeur d'eau

## 5 . Gestion de la vapeur d'eau dans les parois

- . En hiver l'air extérieur est froid, et vu qu'un air froid ne peut contenir beaucoup de vapeur d'eau :  
→ L'hiver, l'air extérieur est peu chargé en vapeur d'eau.
- . En revanche, la vie à l'intérieur des bâtiment produit beaucoup de vapeur d'eau (environ 10 litres par jour pour une famille de 4 personnes).



L'hiver, une pression de vapeur d'eau s'exerce sur les parois du bâtiment, et ce, de l'intérieur à l'extérieur.

\*Source: Institut de physique du bâtiment- Stuttgart. Essai réalisé avec une différence de pression extint de 20 Pa et une laine minérale (le résultat serait similaire pour la majorité des isolants).

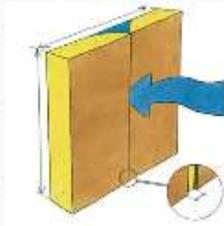
## 5 . Gestion de la vapeur d'eau dans les parois

### Risques moindres...

- si la ventilation des locaux est effective  
Ventilation permanente, au moins en période de chauffe

Quantification des infiltrations de vapeur d'eau dues à une membrane non continue devant un isolant en natte\*

→ Avec une fente de 1mm pour 1m<sup>2</sup> d'isolant, la quantité de vapeur d'eau qui entre par jour dans le mur est de 800g contre qq. grammes avec un pare-vapeur ou un frein de vapeur continu.



- et si l'étanchéité à l'air est effective (coté chaud de l'isolant)

## 5 . Gestion de la vapeur d'eau dans les parois

### Risques moindres...

- si la ventilation des locaux est effective  
Ventilation permanente, au moins en période de chauffe  
- si l'étanchéité à l'air est effective (coté chaud de l'isolant)

... Mais ça ne suffit pas !

La gestion de la vapeur d'eau dans les parois est plus complexe : dans certaines conditions elle se condense, ce qui peut générer des dommages.



# Sommaire

1. Posons le sujet
- 2. Prenons la loupe**
3. Dans les parois isolées
4. Bâti ancien / mur ancien
5. Conclusion / Ressources

## Humidité - Prenons la loupe



### La molécule d'eau... Différents états

La vapeur d'eau :



L'eau (liquide) :



Neige ou Glace :



## Humidité - Prenons la loupe



### La molécule d'eau... Différents états

La vapeur d'eau :



L'eau (liquide) :



→ Le système de déplacement de la molécule d'eau est différent selon si elle est « vapeur » ou « eau liquide »

> 110

## Humidité - Prenons la loupe



### La molécule d'eau... Différents états

La vapeur d'eau :



L'eau (liquide) :



→ La vapeur d'eau peut se condenser, l'eau redevenir vapeur...

> 111



## 1. Comportement des matériaux à la vapeur d'eau

## 2. Comportement des matériaux à l'eau

## 3. Point de rosée

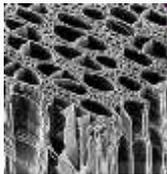
## Comportement des matériaux



### Structure des matériaux

La structure de la matière est organisée différemment selon les matériaux. Pour un même volume, le pourcentage de cavités d'air (porosité) est +/- important, la section de ces cavités +/- grande (porométrie)... De plus, elles sont isolées ou non entre elles...

→ Il en résulte différents comportements à l'humidité.



**Bois**

Porosité : 47 % à 73 %



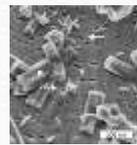
**Polystyrène**

Porosité : 95 %



**Laine minérale**

Porosité : 95 %



**Ciment**

Porosité : 25 %



**Aluminium**

Porosité : 0 %



# 1. Comportement des matériaux à la vapeur d'eau

## 2. Comportement des matériaux à l'eau

## 3. Point de rosée

# Comportement des matériaux



## 1. La vapeur d'eau



Gore-Tex

*Selon leur nature, leur structure..., les matériaux s'opposent plus ou moins à la diffusion de vapeur d'eau.*



K-Way

Résistance faible à la (diffusion de) vapeur d'eau.

Résistance forte à la (diffusion de) vapeur d'eau..

# Comportement des matériaux



## 1. La vapeur d'eau



Gore-Tex

Résistance faible à la (diffusion de) vapeur d'eau.

Attention !  
Pour un matériau de construction, on ne peut pas dire, de prime abord, qu'être ouvert ou fermé à la vapeur d'eau soit « bien », ou « mal » !



K-Way

Résistance forte à la (diffusion de) vapeur d'eau..

# Comportement des matériaux



## 1. La vapeur d'eau

. **Le coefficient  $\mu$  ( $\mu$ )** indique dans quelle mesure une matière s'oppose à la progression de la vapeur d'eau.

( $\mu$  : coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, sans unité)

Ex : Un matériau qui a un  $\mu$  de 10 résiste dix fois plus à la vapeur d'eau que l'air.

. **La valeur  $s_d$**  indique dans quelle mesure une couche de matériau s'oppose à la progression de la vapeur d'eau.

( $s_d$  : résistance à la migration de vapeur d'eau ou "épaisseur de lame d'air équivalente", en m)

$$s_d = \mu \times d \quad (d : \text{épaisseur matériau en mètre})$$

Ex : Un matériau qui a un  $s_d$  de 10 mètres résiste à la vapeur d'eau comme 10 m d'air

D'autres unités et valeurs, particulièrement utilisées par le monde scientifique ( $\pi$ , Wp, Rd...) : voir annexe

# 1. La vapeur d'eau



Matériaux	Épaisseur (m)	μ	Sd (m)	Sources
Air (référence)	1 m	1	1	NF EN 12524
Enduit plâtre	8 mm	6 à 10	0.05 à 0.08	NF EN 12524
Peinture - Emulsion			0,10	NF EN 12524
Film pare pluie*			< 0.18	DTU 31.1 et 2
Laine de verre	40 cm	1	0,40	NF EN 12524
Isolant manufacturé à base de fibres végétales	40 cm	1	0,40	NF EN 12524
Enduits à la chaux	2 cm	6 à 20	0.12 à 0,40	Divers
Enduits au ciment	2 cm	25 à 85	0.50 à 1.90	Divers
OSB (type III et IV)	0.9 cm	≈ 150 à 250	≈ 2	Divers
Papier mural vinyle			2	NF EN 12524
Brique	20 cm	10 à 16	2 à 3.2	NF EN 12524
Peinture - Vernis			3	NF EN 12524
Béton cellulaire	37 cm	6 à 10	2.2 à 3.7	NF EN 12524
Pierre calcaire tendre	40 cm	25 à 40	10 à 16	NF EN 12524
Pare-vapeur			> 18	DTU 31.1 et 2
Polystyrène expansé	15 cm	60	9	NF EN 12524
Polystyrène (produits courant)	15 cm	20 à 200	3 à 30	Divers
Béton plein armé	20 cm	80 à 130	16 à 26	NF EN 12524
Bitume	4mm	50000	200	NF EN 12524
Verre, métaux, faïence		+ ∞	+ ∞	NF EN 12524

# 1. La vapeur d'eau



Matériaux	Épaisseur (m)	μ	Sd (m)	Sources
Air (référence)	1 m	1	1	NF EN 12524
Enduit plâtre	8 mm	6 à 10	0.05 à 0.08	NF EN 12524
Peinture - Emulsion			0,10	NF EN 12524
Film pare pluie*			< 0.18	DTU 31.1 et 2
Laine de verre	40 cm	1	0,40	NF EN 12524
Isolant manufacturé à base de fibres végétales	40 cm	1	0,40	NF EN 12524
Enduits à la chaux	2 cm	6 à 20	0.12 à 0,40	Divers
Enduits au ciment	2 cm	25 à 85	0.50 à 1.90	Divers
OSB (type III et IV)	0.9 cm	≈ 150 à 250	≈ 2	Divers
Papier mural vinyle			2	NF EN 12524
Brique	20 cm	10 à 16	2 à 3.2	NF EN 12524
Peinture - Vernis			3	NF EN 12524
Béton cellulaire	37 cm	6 à 10	2.2 à 3.7	NF EN 12524
Pierre calcaire tendre	40 cm	25 à 40	10 à 16	NF EN 12524
Pare-vapeur			> 18	DTU 31.1 et 2
Polystyrène expansé	15 cm	60	9	NF EN 12524
Polystyrène (produits courant)	15 cm	20 à 200	3 à 30	Divers
Béton plein armé	20 cm	80 à 130	16 à 26	NF EN 12524
Bitume	4mm	50000	200	NF EN 12524
Verre, métaux, faïence		+ ∞	+ ∞	NF EN 12524

Une expression empreintée au langage médical parle de matériau "perspirant" pour signifier : très ouvert à la vapeur d'eau.



## Comportement des matériaux

### 1. La vapeur d'eau

• **Le coefficient  $\mu$  ( $m$ )** indique dans quelle mesure une matière s'oppose à la progression de la vapeur d'eau.

( $\mu$  : coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau, sans unité)

Ex: Un matériau qui a un  $\mu$  de 10 résiste dix fois plus à la vapeur d'eau que l'air.

• **La valeur  $s_d$**  indique dans quelle mesure une couche de matériau s'oppose à la progression de la vapeur d'eau.

( $s_d$  : résistance à la migration de vapeur d'eau ou "épaisseur de lame d'air équivalente", en m)

$$s_d = \mu \times d \quad (d : \text{épaisseur matériau en mètre})$$

Ex: Un matériau qui a un  $s_d$  de 10 mètres résiste à la vapeur d'eau comme 10 m d'air.

D'autres unités et valeurs, particulièrement utilisées par le monde scientifique (n, Wp, Rd...): voir annexe



## 1. Comportement des matériaux à la vapeur d'eau

## 2. Comportement des matériaux à l'eau

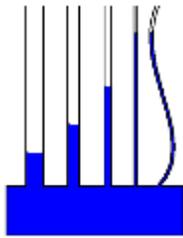
## 3. Point de rosée

## Comportement des matériaux



### 2. L'eau

→ L'eau (liquide) contenue dans les matériaux cherche à rejoindre les parements et les endroits plus secs.



Plus la structure des matériaux se rapproche de tubes fins et continus, plus l'eau s'y déplace facilement. On parle de transport capillaire, ou « capillarité » (loi de Jurin)

Les matériaux sont plus ou moins capillaires. Quelques-uns sont non-capillaires.

## Comportement des matériaux



### 2. L'eau

. Le coefficient d'absorption d'eau  $A^*$  indique dans quelle mesure un matériau peut absorber de l'eau par capillarité (en  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$  ou  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ )

Activité capillaire	A ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ )	Dww* ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Exemples de matériaux (source : DELPHIN 5)
Nulle à extrêmement faible	< 0,01	< $10^{-11}$	Plastiques, polystyrènes, métaux, verre, verre cellulaire, laines minérales, enduits d'étanchéité...
Très faible à faible	0,005 à 0,1	$10^{-8}$ à $10^{-12}$	Bois (perpendiculaire aux fibres), liège expansé, majorité des pierres, bétons et enduits à base de ciments...
Significative à forte	0,05 à 0,2	$10^{-6}$ à $10^{-9}$	Bois (sens des fibres), pierres calcaires tendres, majorité des enduits chaux ou terre, pisés, briques...
Très forte	> 0,1	> $10^{-9}$	Plâtre, perlite, ouate de cellulose, qq. briques...

\* Quelques fois exprimé en classes (W0, 1 ou 2 dans NF EN 1015-18...). De plus, pour exprimer finement la capillarité, "A" doit être accompagné du coefficient de transport d'eau liquide par redistribution (Dww), voire également du coef. de transport d'eau liquide par succion (Dws).

# Comportement des matériaux



## 2. L'eau

**Le coefficient d'absorption d'eau A\*** indique dans quelle mesure un matériau peut absorber de l'eau par capillarité ( $kg/m^2.h^{1/2}$ )

Activité capillaire	A ( $kg/m^2.s^{1/2}$ )	Dww* ( $m^2/s$ )	
Nulle à extrême : très faible	< 0,01	< $10^{-11}$	
Très faible à faible	0,005 à 0,1	$10^{-8}$ $10^{-12}$	
Significative à forte	0,05 à 0,2	$10^{-6}$ à $10^{-9}$	
Très forte	> 0,1	> $10^{-9}$	Pla...

Un des problèmes en France est que, excepté où il est plutôt contraignant (remontée capillaires...), on a oublié l'importance de l'aspect capillaire.

De fait de nombreux matériaux ne sont pas renseignés, ou alors avec des termes connotés : "hydrophile" ou "non hydrophile".

\* Quelques fois exprimé en classes (W0, 1 ou 2 dans NF... la capillarité, "A" doit être accompagné du coefficient de transport (Dww), voire également du coef. de transport d'eau liquide par succion (Dws).

# Comportement des matériaux



## 2. L'eau

**Matériaux putrescibles.** Ils ont la capacité de se décomposer dans certaines conditions d'humidité prolongée (selon leur sensibilité, ils seront + ou - putrescibles).

**Matériaux imputrescibles mais altérables.** Ils sont (+ ou -) endommagés en présence (+ ou - prolongée) d'eau.



# Comportement des matériaux



## 2. L'eau

### Hygro-vulnérabilité Exemples de comportements

Type d'hygro-vulnérabilité	Exemples de matériaux
Matériaux (moyennement à fortement) putrescibles	Paille, majorité des végétaux non traités...
Matériaux (faiblement à moyennement) putrescibles	Majorité des isolants à base de végétaux, bois traité, essences de bois "naturellement durables"...
Matériaux non putrescibles mais (moyen.t à fortement) altérables	Majorité des enduits à base de ciment, chaux, terre ou plâtre. Plaques de plâtre, majorité des laines minérales...
Matériaux non putrescibles mais (faiblement à moyen.t) altérables	Béton, polystyrène, polyuréthane, liège expansé...
Matériaux non hygro-vulnérables	Verre, verre cellulaire + qq métaux

# Comportement des matériaux



## 2. L'eau

### Hygro-vulnérabilité Exemples

Type d'hygro-vulnérabilité	Exemples de matériaux
Matériaux (moyennement à fortement) putrescibles	Paille
Matériaux (faiblement à moyennement) putrescibles	Majorité des isolants à base de végétaux, bois traité, essences de bois "naturellement durables"...
Matériaux non putrescibles mais (moyen.t à fortement) altérables	Majorité des enduits à base de ciment, chaux, terre ou plâtre. Plaques de plâtre, majorité des laines minérales...
Matériaux non putrescibles mais (faiblement à moyen.t) altérables	Béton, polystyrène, polyuréthane, liège expansé...
Matériaux non hygro-vulnérables	Verre, verre cellulaire + qq métaux

**Ce type de tableau est à prendre avec précautions tant :**

- la sensibilité à l'humidité dépend de nombreux facteurs ;
- des différences notables sont possibles au sein d'une même famille de matériaux (selon traitements, type de production... ) ;
- il manque des valeurs (ou un indicateur unique) permettant de synthétiser le comportement général.



## 1. Comportement des matériaux à la vapeur d'eau

## 2. Comportement des matériaux à l'eau

## 3. Point de rosée

## Point de rosée ??



### Condensation par saturation de vapeur d'eau :

L'air contient de nombreux éléments, dont de la vapeur d'eau

Plus l'air est chaud, plus il peut contenir de la vapeur d'eau.

14,7 g/kg à 20°, 5,5 à 5°...  
si l'on charge encore ces airs en vapeur d'eau : le surplus se condense.

→ C'est "le point de rosée".

A 20°C un air peut contenir 14,7 g de vapeur d'eau /kg d'air sec

A 5°C un air peut contenir 5,5 g<sub>VE</sub> /kg<sub>AS</sub>.



# Point de rosée ??

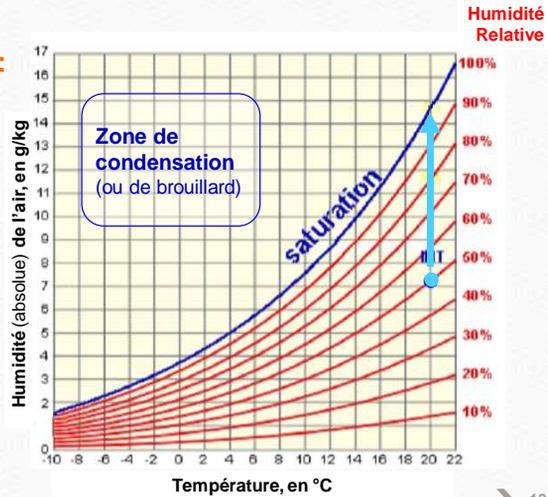


## Condensation par saturation de vapeur d'eau :

**Diagramme de l'air humide :**  
(ou diagramme de Mollier )

Lorsqu'un air se charge en vapeur d'eau, il arrive tôt ou tard à saturation (100% d'humidité relative). S'il on le charge plus, la partie supplémentaire se condense.

→ C'est "le point de rosée".



# Point de rosée ??

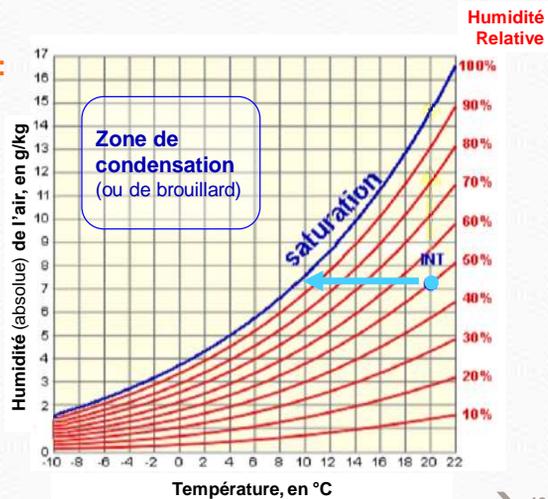


## Condensation par saturation de vapeur d'eau :

**Diagramme de l'air humide :**  
(ou diagramme de Mollier )

Lorsqu'un air humide refroidit, il arrive tôt ou tard à saturation de vapeur d'eau. Lorsqu'il refroidit encore, une partie de sa vapeur d'eau se condense.

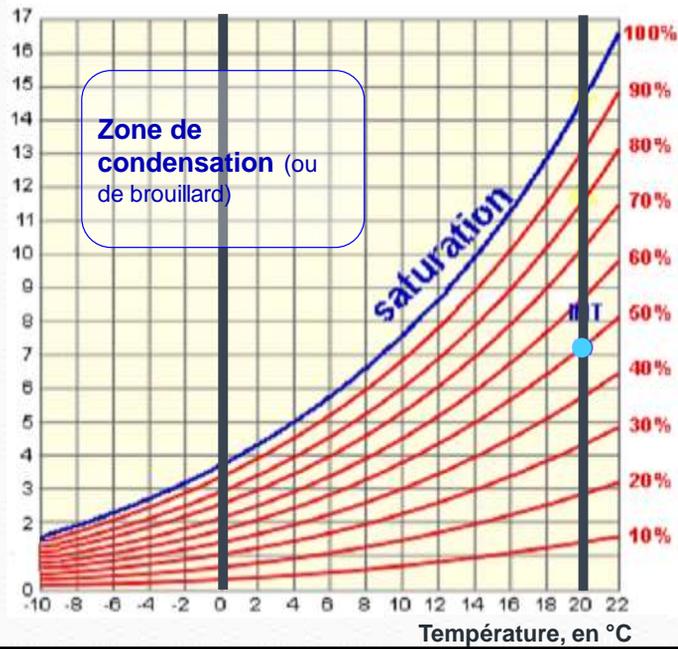
→ C'est "le point de rosée".



### Diagramme de l'air humide. (ou diagramme de Mollier)



Humidité (absolue) de l'air, en g/kg

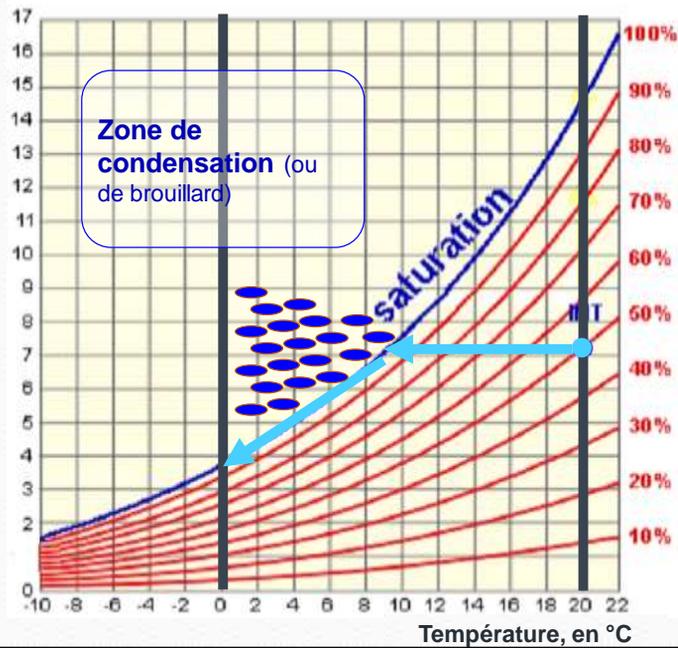


Humidité Relative

### Diagramme de l'air humide. (ou diagramme de Mollier)

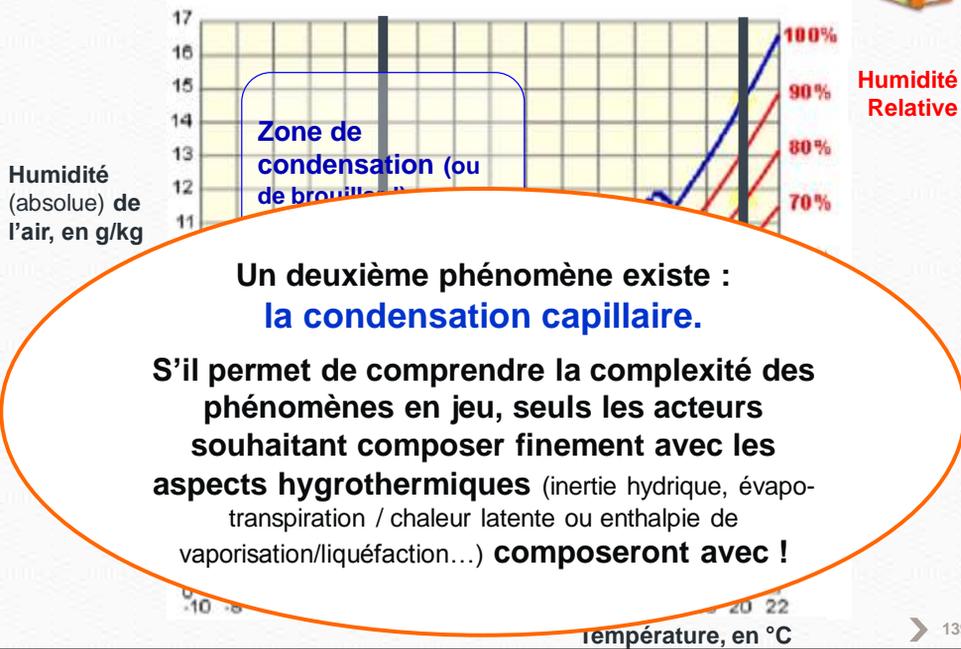


Humidité (absolue) de l'air, en g/kg



Humidité Relative

## Diagramme de l'air humide. (ou diagramme de Mollier)



***Avant d'aller plus loin :***

***où en est-on dans la compréhension du sujet « humidité dans les parois » ?***

## . Gestion de la vapeur d'eau dans les parois

L'hiver, un flux de vapeur d'eau cherche à traverser les parois d'enveloppe des bâtiments

Ce flux est quasiment toujours orienté de l'intérieur à l'extérieur.

Un air intérieur trop humide augmente fortement l'intensité de ce flux.  
→ Besoin d'un renouvellem.<sup>t</sup> régulier de l'air

Les inétanchéités à l'air sont comparables à de véritables "autoroutes" à vapeur d'eau.



Les clefs pour comprendre (1de2)

## . Gestion de la vapeur d'eau dans les parois

Un air humide condense lorsqu'il croise des couches froides. (point de rosée)

Les différentes couches de matériaux se laissent +/- traverser par la vapeur d'eau. (sd)

Les matériaux permettent +/- à l'eau de se déplacer en leur sein. (capillarité, coef A)

Les matériaux ne sont pas dégradés par la vapeur, mais peuvent l'être par l'eau. (hygro-vulnérabilité)



Les clefs pour comprendre (2de2)

## Sommaire

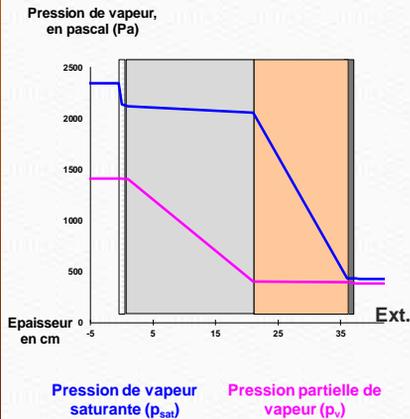
1. Posons le sujet
2. Prenons la loupe
- 3. Dans les parois isolées**
4. Bâti ancien / mur ancien
5. Conclusion / Ressources

*... Dans les parois isolées, que se passe t'il vraiment ?*

- 1. Exemple de l'ITE ???**

## Et concrètement, dans les parois ? . ITE

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### La méthode de GLASER

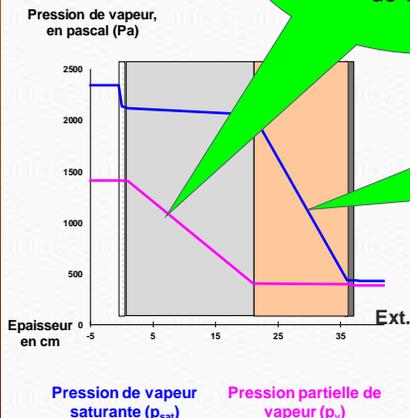
Méthode simplifiée\* cherchant à repérer les zones de condensation de la vapeur d'eau dans une paroi.

Cette approche se fait sur une année avec un pas de temps mensuel (Norme NF EN ISO 13788). Si les phénomènes de condensation se répètent au delà de certaines limites, elle estime, selon les matériaux en jeu, qu'il peut y avoir un risque.

\* Cette méthode n'intègre pas le comportement capillaire, l'incidence du vent, de la pluie, du soleil... mais elle date de 1949

## Et concrètement, dans les parois ? . ITE

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### La méthode de GLASER

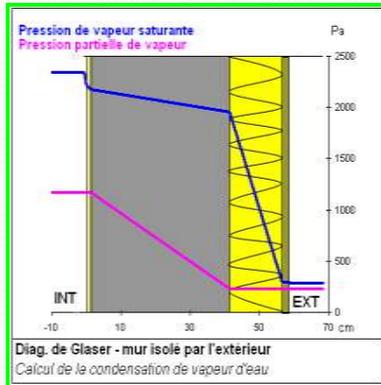
Méthode simplifiée\* cherchant à repérer les zones de condensation de la vapeur d'eau dans une paroi.

Cette approche se fait sur une année avec un pas de temps mensuel (Norme NF EN ISO 13788). Si les phénomènes de condensation se répètent au delà de certaines limites, elle estime, selon les matériaux en jeu, qu'il peut y avoir un risque.

\* Cette méthode n'intègre pas le comportement capillaire, l'incidence du vent, de la pluie, du soleil... mais elle date de 1949

## Et concrètement, dans les parois ? . ITE

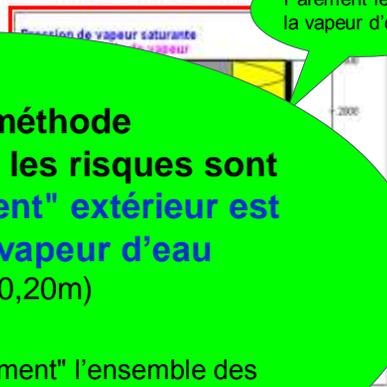
### . Gestion de la vapeur d'eau



En posant l'isolant côté extérieur, on réchauffe toutes les couches de la paroi : la vapeur d'eau ne peut condenser que vers le parement extérieur.

## Et concrètement, dans les parois ? . ITE

### . Gestion de la vapeur d'eau



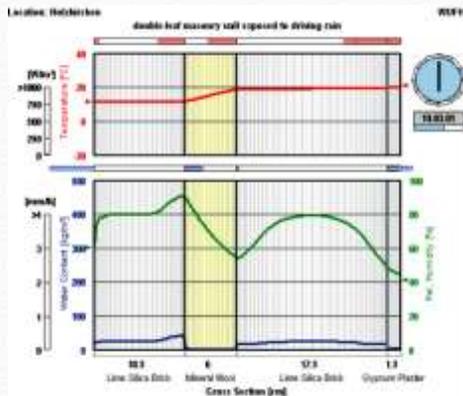
**En ITE, la méthode Glaser nous dit que les risques sont faibles si le "parement" extérieur est très ouvert à la vapeur d'eau (sd < env. 0,20m)**

**Note:** est appelé ici "parement" l'ensemble des matériaux se trouvant entre l'isolant et l'air (int. ou ext.)

En posant l'isolant côté extérieur, on réchauffe toutes les couches de la paroi : la vapeur d'eau ne peut condenser que vers le parement extérieur.

## Et concrètement, dans les parois ? . ITE

### . Gestion de la vapeur d'eau



Logiciel WUFI ([www.wufi.de](http://www.wufi.de)), d'après norme NF EN 15026

#### De nouveaux outils de simulation

Ils prennent en compte l'ensemble des :

- **comportements des matériaux** (Sd, hygroscopicité, capillarité...);
- **variations climatiques intérieures** (t°, humidité, remontées capillaires...)
- **variations climatiques extérieures** (t°, humidité, ensoleillement, vent, pluie...).

Simulant les parois sur plusieurs années, ils permettent de voir si elles encourent des risques dus à l'humidité.

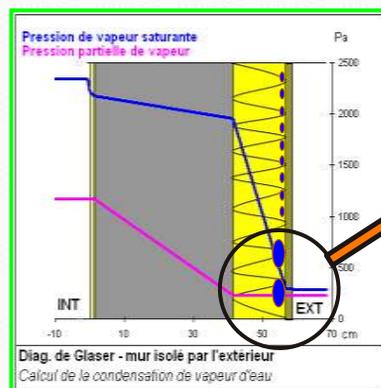
## Et concrètement, dans les parois ? . ITE

### . Gestion de la vapeur d'eau

Un logiciel type WUFI analyse entre autre :

- le comportement de l'eau condensée ;
- le comportement en cas d'infiltration accidentelle d'eau.

De plus il peut travailler avec un pas de temps très court.



## Et concrètement, dans les parois ? . ITE

### . Gestion de la vapeur d'eau

. Un I

En ITE, une simulation de type WUFI valide la conclusion de Glaser :

→ nécessité d'un parement extérieur très ouvert à la vapeur d'eau

Mais elle précise que si c'est un enduit :

→ il lui faut être également capillaire.

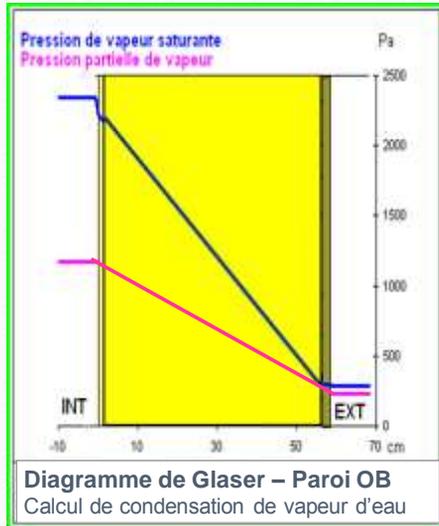
*... Dans les parois isolées, que se passe t'il vraiment ?*

*1. Exemple de l'ITE*

*2. Exemple de l'ossature bois*

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### Approche simplifiée\* avec la méthode de GLASER

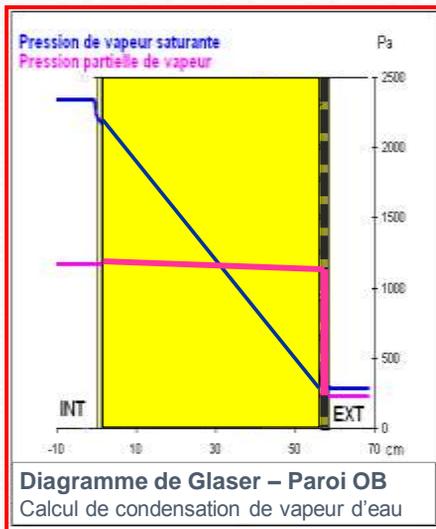
Exemple d'une paroi bois avec des matériaux ayant tous un comportement similaire à la (diffusion de) vapeur d'eau.

*\* Contrairement à ce que nous faisons, soit une seule simulation à un instant (défavorable) donné, la méthode de Glaser impose de faire une simulation pour chaque mois de l'année. (Voir norme NF EN ISO 13788)*

➤ 154

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### Approche simplifiée\* avec la méthode de GLASER

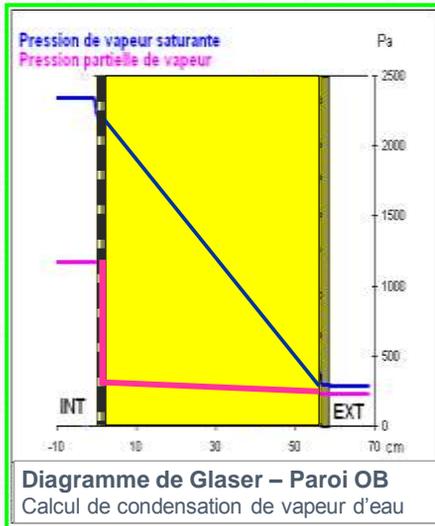
Exemple d'une paroi bois avec un "parement" extérieur comme seul matériau "fermé" à la (diffusion de) vapeur d'eau.

*\* Contrairement à ce que nous faisons, soit une seule simulation à un instant (défavorable) donné, la méthode de Glaser impose de faire une simulation pour chaque mois de l'année. (Voir norme NF EN ISO 13788)*

➤ 156

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### Approche simplifiée\* avec la méthode de GLASER

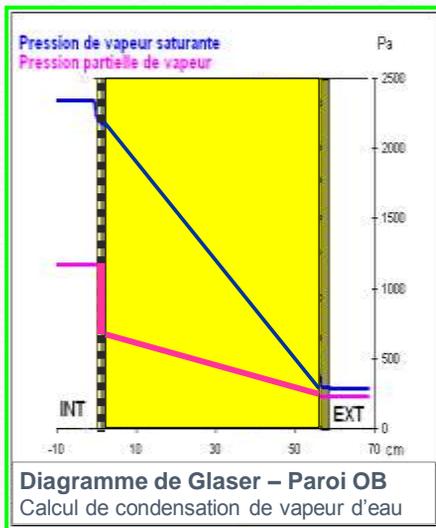
Exemple d'une paroi bois avec un "parement" intérieur comme seul matériau "fermé" à la (diffusion de) vapeur d'eau.

*\* Contrairement à ce que nous faisons, soit une seule simulation à un instant (défavorable) donné, la méthode de Glaser impose de faire une simulation pour chaque mois de l'année. (Voir norme NF EN ISO 13788)*

➤ 158

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### Approche simplifiée\* avec la méthode de GLASER

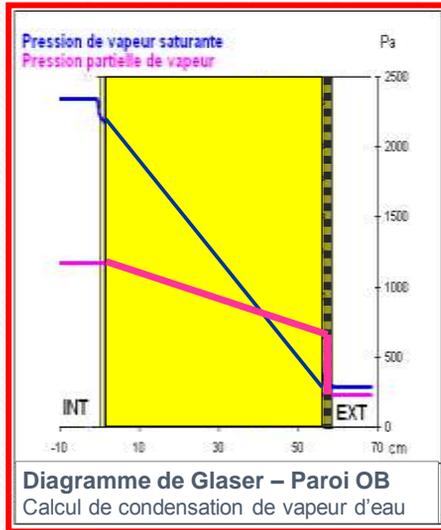
Ex. avec un "parement" int. moyennement fermé à la vapeur ( $1m \geq s_d \geq 2m$ ). Les autres matériaux étant "ouverts" à la vapeur d'eau.

*\* Contrairement à ce que nous faisons, soit une seule simulation à un instant (défavorable) donné, la méthode de Glaser impose de faire une simulation pour chaque mois de l'année. (Voir norme NF EN ISO 13788)*

➤ 160

## Et concrètement, dans les parois ? **.OB**

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### Approche simplifiée\* avec la méthode de GLASER

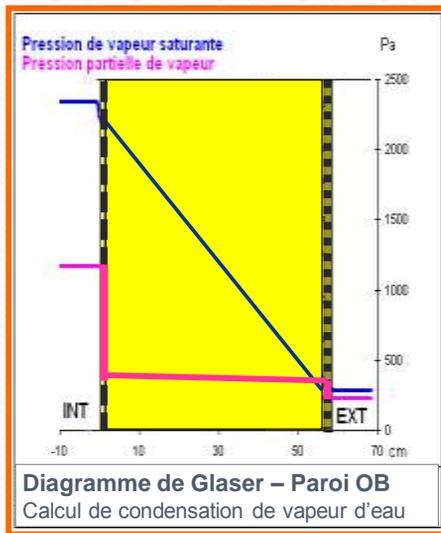
Exemple avec un panneau extérieur type OSB ( $s_d \approx 2$  m). Les autres matériaux étant "ouverts" à la vapeur d'eau.

*\* Contrairement à ce que nous faisons, soit une seule simulation à un instant (défavorable) donné, la méthode de Glaser impose de faire une simulation pour chaque mois de l'année. (Voir norme NF EN ISO 13788)*

➤ 162

## Et concrètement, dans les parois ? **.OB**

### . Gestion de la vapeur d'eau



#### Approche simplifiée\* avec la méthode de GLASER

Exemple avec un panneau extérieur type OSB 3 ( $s_d \approx 2$  m), et coté intérieur un parement "fermé" à la vapeur (pare-vapeur  $s_d \geq 18$  m)

*\* Contrairement à ce que nous faisons, soit une seule simulation à un instant (défavorable) donné, la méthode de Glaser impose de faire une simulation pour chaque mois de l'année. (Voir norme NF EN ISO 13788)*

➤ 164

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau

**Pour les parois bois, Glaser nous invite à avoir :**

→ un "parement" extérieur très ouvert à la (diffusion de) vapeur d'eau ;

**Sachant qu'un "parement" intérieur limitant l'entrée de vapeur d'eau limite les risques.**

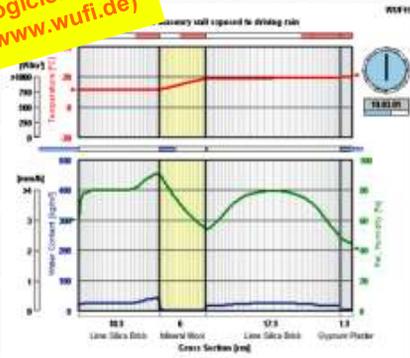
Note: est appelé ici "parement" l'ensemble des matériaux se trouvant entre l'isolant et l'air (int. ou ext.)

165

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau

Logiciel WUFI+  
(www.wufi.de)



**Qu'en est-il avec un logiciel type WUFI, soit une simulation pouvant prendre en compte les :**

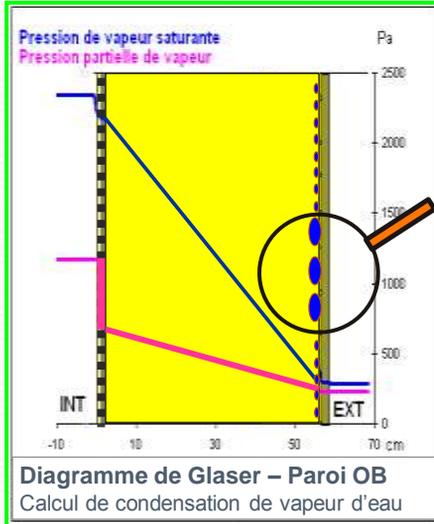
- **comportements des matériaux** (Sd, hygroscopicité, capillarité...)
- **variations climatiques intérieures** (t°, humidité, remontées capillaires...)
- **variations climatiques extérieures** (t°, humidité, ensoleillement, vents, pluies...).

Simulant les parois sur plusieurs années, ils permettent de voir si elles encourent des risques dus à l'humidité.

**\* D'après norme NF EN 15026**

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau



. Un logiciel type WUFI analyse entre autre le comportement de l'eau condensée.

Il peut également approcher le comportement en cas d'infiltration accidentelle d'eau.

> 167

## Et concrètement, dans les parois ? .OB

### . Gestion de la vapeur d'eau

Pour les parois bois, une étude type WUFI valide les conclusions de Glaser, mais précise également que **si le parement extérieur est un enduit sur isolant** :

1. Il lui faut être également capillaire.
2. Si l'isolant est sensible à l'eau (paille...) : il ne sera pas forcément pérenne sur les façades à la pluie battante, particulièrement dans les régions "humides" (Bretagne, Normandie, vallée de montagne...), ou si la façade à la pluie est la façade nord.

> 168

*... Dans les parois isolées, que se passe t'il vraiment ?*

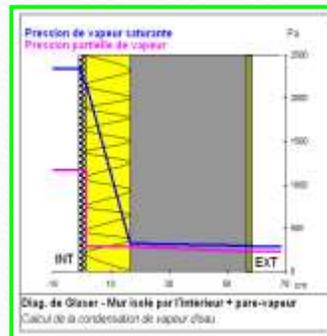
*1. Exemple de l'ITE*

*2. Ossature bois*

*3. Exemple de l'ITI ???*

**Et concrètement dans les parois ? . ITI**

**. Gestion de la vapeur d'eau**



**EN ITI, la t° en aval de l'isolant est trop basse. De la vapeur d'eau va condenser, majoritairement à l'interface entre le mur et l'isolant.**

**→ La méthode Glaser dit : les risques ne disparaissent que si l'on empêche la vapeur de rentrer dans le mur... d'où un pare vapeur très fermé. (ici de 500 m)**

## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau

#### En théorie !

... car c'est oublier qu'une enveloppe totalement hermétique à l'air, à l'eau, et surtout à la vapeur d'eau est quasiment impossible à réaliser.

> 171

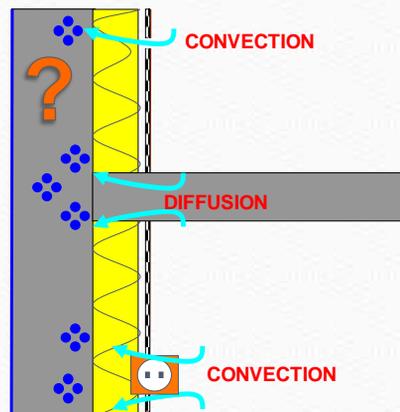
## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau

Avec un pare vapeur, le passage de la vapeur d'eau étant « impossible », elle privilégie **les points faibles de l'enveloppe**.

Une fois dans la paroi elle **s'additionne à l'eau déjà contenue dans les matériaux**.

En fonction de l'orientation du mur, des matériaux qui le composent, **cette eau stagnera plus ou moins longuement dans le mur**... Mais généralement, excepté en façade sud : au moins jusqu'au printemps.



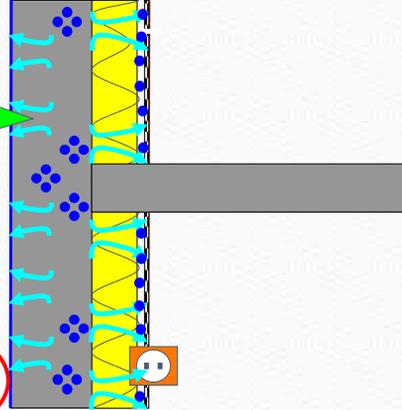
> 172

## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau

→ Au printemps et en été, alors que l'humidité cherche à s'échapper cotés intérieur et extérieur, **la paroi n'a pas la possibilité de sécher coté intérieur.** (l'humidité est piégée derrière le pare-vapeur)

→ C'est principalement avec l'isolation par l'intérieur que la méthode de Glaser montre ses limites.



## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau

#### Que disent les documents de référence\* ?

Selon le type de mur support, d'isolant, de zone climatique... il est par ex. demandé, dans le DTU 20.1 (Ouvrage en maçonnerie de petits élém.<sup>ts</sup>) :

- au parement intérieur d'avoir un  $s_d > 1,5$  ou 6 m, ou :
- de laisser une lame d'air entre l'isolant et le mur, ou ;
- de réaliser une étude spécifique...

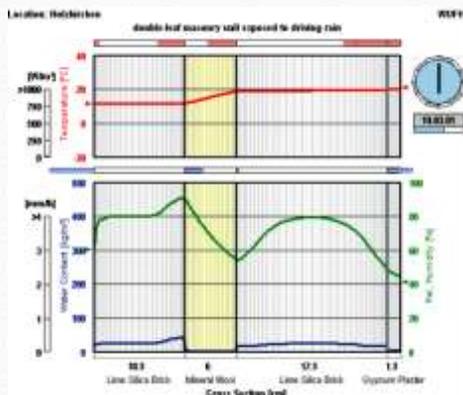


← La norme NF DTU 20.1 P4 en principale référence pour renseigner l'attitude à avoir sur les murs maçonnés autre que béton armé.

\* Nous marquons ici la différence entre "Règles de l'Art", (Σ des savoir faire incluant entre autre les textes ou documents de référence : normes, DTU, CPT...) et les seuls documents de référence.

## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau



Logiciel WUFI ([www.wufi.de](http://www.wufi.de)), d'après norme NF EN 15026

Qu'en est-il avec un logiciel type WUFI, soit une simulation pouvant prendre en compte les :

- comportements des matériaux (Sd, hygroscopicité, capillarité...)
- variations climatiques intérieures (t°, humidité, remontées capillaires...)
- variations climatiques extérieures (t°, humidité, ensoleillement, vents, pluies...).

Simulant les parois sur plusieurs années, ils permettent de voir si elles encourent des risques dus à l'humidité.

## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau

Une étude type "WUFI" invite à entrevoir l'ITI avec prudence, le mur support se chargeant souvent d'eau.

Et si l'idée d'une ITI est maintenue, elle nous invite, en plus d'un **enduit extérieur perspirant et capillaire**, à étudier la piste :

- des matériaux moyennement fermés à la vapeur d'eau (isolants perspirants, "freins de vapeur", membranes à diffusion variable...).

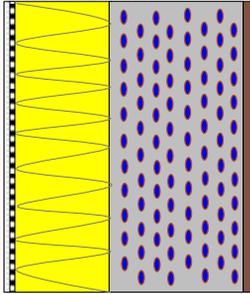
Logiciel WUFI ([www.wufi.de](http://www.wufi.de)), d'après norme NF EN 15026

## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau

**Sachant que :**

- La zone de condensation commence généralement à l'interface isolant/mur support, ménageant ainsi l'isolant.
- Les techniques "béton" et "terre cuite" actuelles sont peu contrariées par cette présence d'eau condensée.



**Mais attention !**

- Les "risques" sont décuplés si les locaux sont trop humides, et si les parements ext. sont insuffisamment imperméables à la pluie.
- Une attention est à porter avec les isolants capillaires, surtout s'ils sont putrescibles.

➤ 177

## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau



## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### . Gestion de la vapeur d'eau

#### Que disent les documents de référence\* ?

Selon le type de mur support, d'isolant, de zone climatique... il est par ex. demandé, dans le DTU 20.1 (Ouvrage en maçonnerie de petits éléments) :

- au parement intérieur d'avoir un  $e_s > 1,5$  ou 6 m, ou ;
- de laisser une lame d'air entre l'isolant et le mur, ou ;
- de réaliser une étude spécifique...



\* La norme NF DTU 20.1 F4 est principale référence pour renseigner l'aptitude à avoir sur les murs maçonnés autre que béton armé.

\* Mais toujours de la différence entre "Règles de l'ITI" (ensemble des savoir faire incluant entre autre les documents de référence : normes, DTU, CPT...) et les seuls documents de référence. ➤



**L'avis technique pour renseigner de l'aptitude d'un produit à être utilisé dans un emploi donné.**

➤ 178

## Et concrètement dans les parois ? . ITI

### Gestion de la vapeur d'eau

Les textes actuels sont plus sur des (Sd) pare-vapeurs de de 18 à 57 m minimum (au lieu de 1,5 et 6m) .

*Aurions nous en qq. années oublié la préoccupation de laisser le mur sécher également coté intérieur ???*



*L'avis technique pour renseigner de l'aptitude d'un produit à être utilisé dans un emploi donné.*

*... en attendant que les textes s'harmonisent au niveau européen... ou au moins que les textes français intègrent les connaissances acquises ces dernières années.*

**Humidité :**  
**En guise de 1<sup>ère</sup> conclusion**

**. En guise de 1<sup>ère</sup> conclusion... (version simplifiée)**

**Pour limiter les risques :**

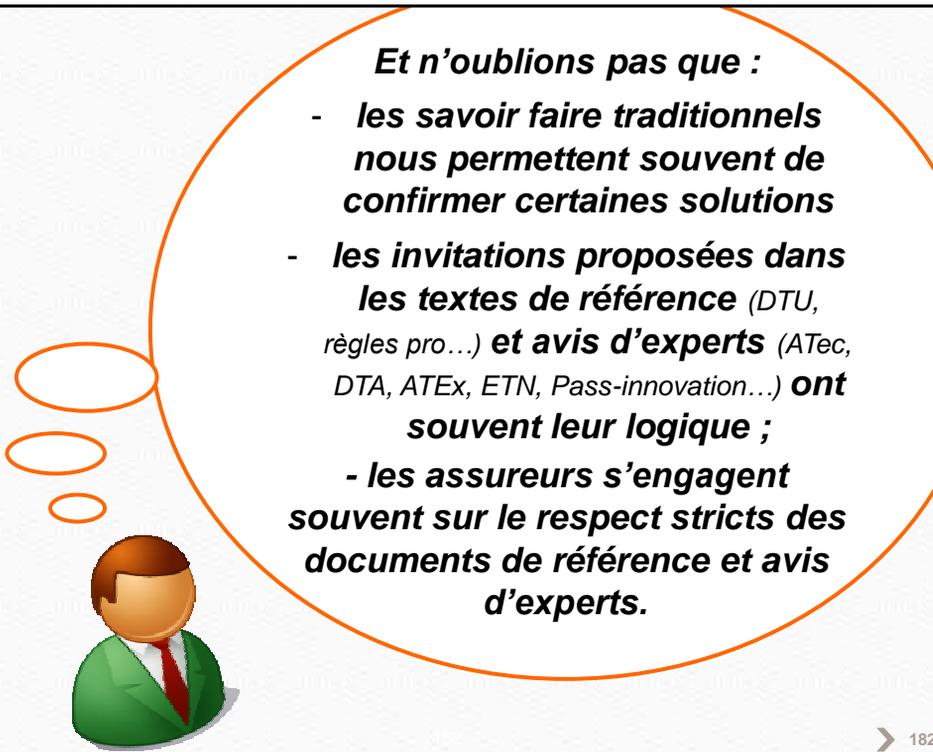
. Paroi extérieure imperméable à la pluie + Réalisation d'une très bonne étanchéité à l'air coté chaud de l'isolant + Pose d'un système de renouvellement de l'air intérieur.

. **Côté extérieur** : choix de parements très ouverts à la vapeur d'eau. Si ce sont des enduits : les choisir capillaires.

. **Côté intérieur** : choix de matériaux limitant plutôt l'entrée de la vapeur d'eau dans la paroi, mais dans certains cas, permettant également son évacuation lorsque les conditions intérieures le permettent. (matériaux "frein de vapeur", membrane hygrovariable...)

**Note** : est appelé "parement" le ou les matériaux séparant la paroi de l'air (int. ou ext.)

➤ 181



**Et n'oublions pas que :**

- **les savoir faire traditionnels nous permettent souvent de confirmer certaines solutions**
- **les invitations proposées dans les textes de référence (DTU, règles pro...) et avis d'experts (ATec, DTA, ATEEx, ETN, Pass-innovation...) ont souvent leur logique ;**
- **les assureurs s'engagent souvent sur le respect stricts des documents de référence et avis d'experts.**

➤ 182

## Humidité - Définitions : Pare vapeur, Frein de vapeur...

### Pare vapeur et frein de vapeur

- . Pare-vapeur\* : (matériau ou comportement)  $\approx s_d > 5$  à  $10$  m
- . Frein de vapeur\* : (matériau ou comportement)  $\approx 1,5 < s_d < 5$  m



\* Il n'existe pas encore de définitions "officielles" permettant de différencier ces 2 termes. De fait, beaucoup ne parlent que de pare-vapeur (+ou-) ouverts à la diffusion de vapeur.

## Membrane à diffusion variable\*

Leur résistance à la vapeur d'eau varie :

- elle est élevée en hiver pour limiter l'entrée de la vapeur d'eau dans la paroi ;
- elle est faible en été pour permettre le séchage de la paroi vers l'intérieur.



Vario® (ISOVER®).  
Sd = 0,2 à 3 m

Produits sous ATec

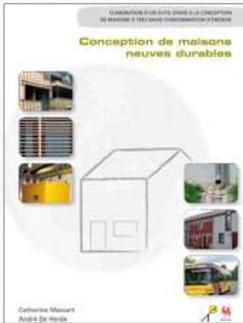


Intello® (PRO CLIMA®). Sd = 0,25 à 10 m

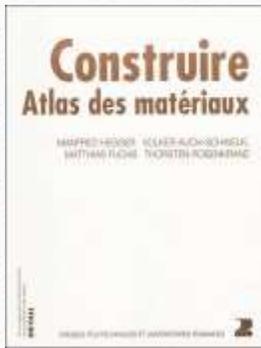
\* Il n'existe pas encore de définition explicite. Certains parleront de pare-vapeur (ou membrane) hygro-variable, de frein de vapeur évolutif...

## Sommaire.

- . Thermique : rapides rappels
- . Posons le sujet
- . Le confort thermique
- . Une isolation performante
- . Focus "Inertie thermique"
- . Focus "Parois et humidité"
- . Ressources
- . Annexes



## Quelques ouvrages en référence :



**Logiciels :** [www.bourgogne-batiment-durable.fr](http://www.bourgogne-batiment-durable.fr) & [apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/)

➤ 187

## Ressources sur le sujet humidité



**Logiciels\*/sites :** Glaser, Usai, Flixo, Trisco, U.wert, WUFI, Delphin 5...

**Normes :** NF EN ISO 13788, NF EN 15026, NF EN 12524, SIA 180, SIA 380, DIN 4108,...

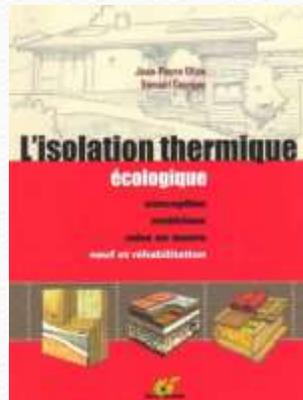
**Structures :** Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Architecture & Climat (Belgique), Agence qualité Construction (AQC), BET Enertech, CETE de l'Est, CSTB, Conseil National des Recherches Canada (CNRC), Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (IBO), Passivhaus Institut, WTA – International Association for Science and Technology of Building Maintenance and Monuments Preservation...

*... Sachant que sur le sujet, les ouvrages de référence sont en allemand ou anglais !!!*

**\*Repères pour des logiciels (de th°, STD, QEB...):** <http://www.bourgogne-batiment-durable.fr>

➤ 188

**...Et, la minute de pub ! ..... Pub ! ..... Pub ! ..... Pub ! ..... Pub !...**



Sauf mention contraire :

- les photos sont d'Arcanne, de l'ouvrage « L'isolation thermique écologique » (éd. terre vivante), ou d'Internet
- les dessins sont d'Arcanne ou de « L'isolation thermique écologique » ( Sylvain Huiban ou Hervé Nallet)
- les autres illustrations sont de l'association Arcanne.

# Annexes

# Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite) ▶▶
3. Chapitre "inertie" avec calculs ▶▶
4. Une isolation "écologique" ? ▶▶
5. La "sur-isolation" ▶▶
6. Critères pour le choix d'un isolant ▶▶
7. Exemples d'isolants ▶▶
8. Exemples de parois "basse conso" ▶▶



# Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite)
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
6. Critères pour le choix d'un isolant
7. Exemples d'isolants
8. Exemples de parois "basse conso"

***Mais au fait,  
que recherche t'on ?***

## Être bien !



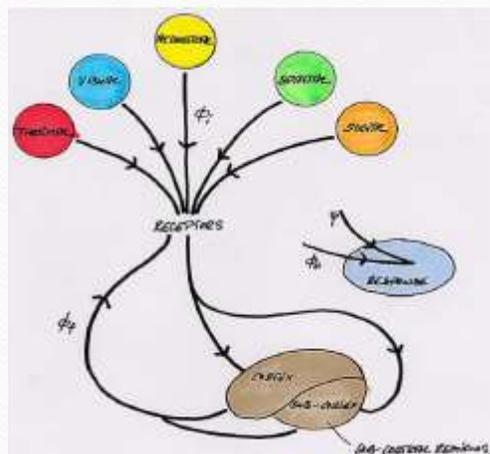
## Le bien être

Notre cerveau reçoit un ensemble de stimuli. Ces derniers sont d'ordre :

- Visuel
- Acoustique
- Olfactif
- Spatial
- Social
- Thermique

Ces stimuli sont confrontés à notre état **physique** et **psychique**.

Le cerveau émet un stimulus sortant qui évalue notre **bien-être**



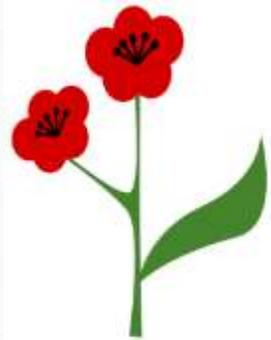
## *Le confort visuel*



## *Le confort acoustique*



## *Le confort olfactif*



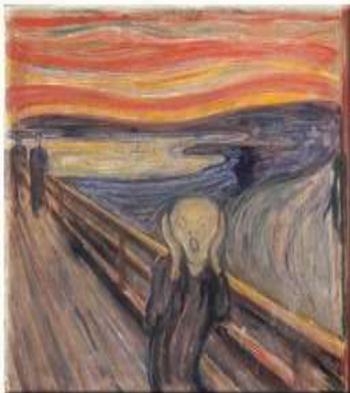
## *Le confort spatial*



## *Le "confort" social*



## *L'état physique et psychique*



## **Le confort (hygro) thermique**



➤ 203



## **Bien-être... et confort thermique**



- Le **bien-être** est une notion subjective résultant de la perception de nos sens et de notre état physique et psychique.
- La perception thermique **n'est que l'un des stimuli** reçu par notre organisme et qui décide de notre bien-être.

➤ 204



**Bien-être** est la perception de nos sens psychique.

↳ La sensation thermique **n'est que l'un des stimuli** reçu par notre organisme et qui décide de notre bien-être.

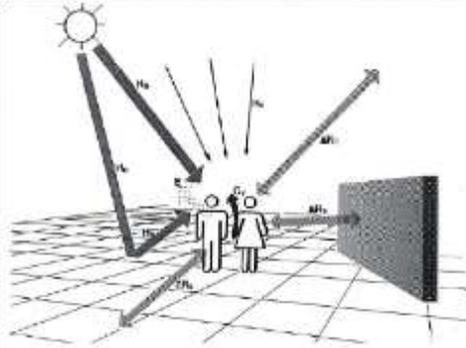


**... même si nous sommes de très bons artisans, de très bons entrepreneurs, de très bons ingénieurs... il faut accepter le fait que cette approche globale (du bien être, de l'être bien) est de la compétence du concepteur !**

## **Le confort (hygro)thermique**

## Le confort (hygro) thermique

- . *L'approche thermique ne s'improvise pas ...*
- . *Le confort thermique, indicateur de base de la performance énergétique, ne peut se limiter à la seule température.*
- . *En définissant un environnement intérieur délimité de l'environnement extérieur, l'enveloppe du bâti joue alors le rôle d'interface entre les deux milieux*



> 207

## Le confort (hygro) thermique

Métabolisme humain / Principe de base des transferts thermiques



> 208

# Le confort (hygro) thermique

## Principes de base

*Le confort hygrothermique ne tient compte que des paramètres suivants :*

- **Les facteurs liés à l'environnement :**
  - la température de l'air
  - la température des surfaces environnantes
  - la vitesse relative de l'air
  - l'humidité relative de l'air
- **Les facteurs liés à l'individu :**
  - son activité
  - son habillement



*Ces différents facteurs interagissent entre eux ...*

**Le confort (hygro) thermique**

→ Pour avoir des parois tempérées, il faut d'abord et avant tout les isoler !

22°C

15°C

22°C

18°C

Il faut que le résultat soit toujours positif avec DTi

## Le confort (hygro) thermique

Ça se mesure :  
L'ambiancemètre



## Le confort (hygro) thermique

Exemple de valeurs liées à l'activité (en met)

Activité	Métabolisme énergétique	
	W/m <sup>2</sup>	met
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	56	1,0
Activité sédentaire (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2,0
Marche à plat		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Source : NF EN ISO 7730

## Le confort (hygro) thermique

### Exemple de valeur liées à l'habillement (en clo)

						
<b>Unité :</b>						
<i>En clo :</i>	< 0,5	0,6-1,2	1,3-1,7	1,8-2,4	2,5-3,4	>3,5
<i>En m²K/W :</i>	< 0,08	≈ 0,1 à 0,2	≈ 0,2 à 0,3	≈ 0,3 à 0,4	≈ 0,4 à 0,5	> 0,5

## Le confort (hygro) thermique

### Principes de base

- *Il est quasi impossible de satisfaire tout le monde ...*
- *Il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes insatisfaites est le minimum !*
- *P.O. Fanger (1970) soumet des sujets à différents microclimats. Leur sensation est exprimée par un vote selon l'échelle :*

**NF EN ISO 7730**

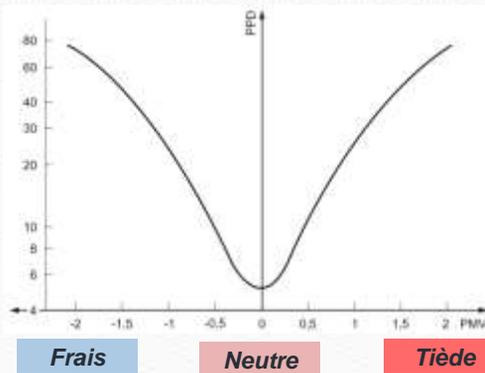
-3	Très froid	Insatisfait car trop froid
-2	Froid	Votes satisfaisants
-1	Frais	
0	Agréable / Neutre	
+1	Tiède	Insatisfait car trop chaud
+2	Chaud	
+3	Très chaud	

# Le confort (hygro) thermique

NF EN ISO 7730

## Principes de base

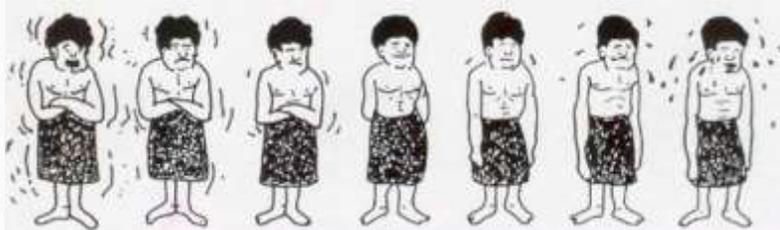
PPD  
(% prévisible  
d'insatisfaits)



PMV (Vote Moyen Prévisible)

# Le confort (hygro) thermique

Le confort thermique : n'avoir ni trop chaud, ni trop froid !



Très froid      Froid      Agréable (Neutre)      Chaud      Très chaud

Frais      Tiède

## Le confort (hygro) thermique

Confort thermique = absence d'inconfort

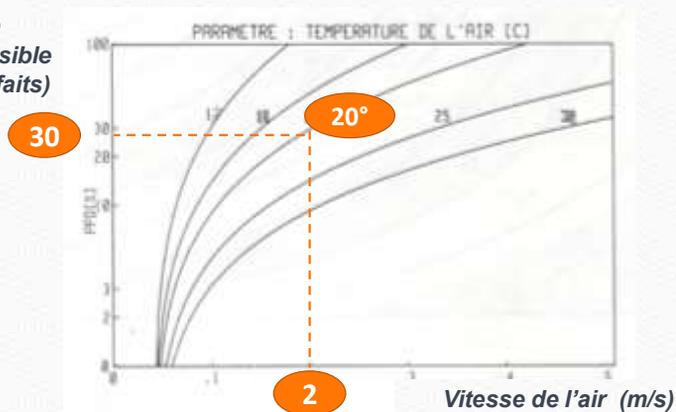
Dans les principales sources d'inconfort :

- Les effets des courants d'air
- L'asymétrie de température radiante
- La différence verticale de la  $t^\circ$  de l'air
- L'effet de la température du sol

## Le confort (hygro) thermique

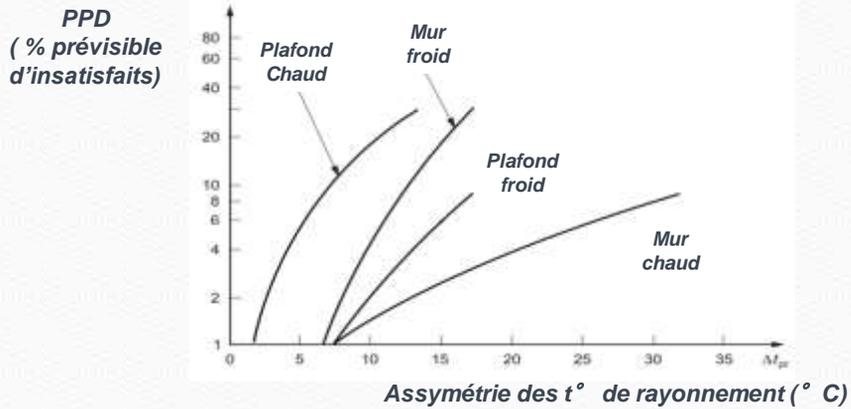
Les effets des courants d'air

PPD  
(% prévisible  
d'insatisfaits)



## Le confort (hygro) thermique

### Les effets de l'asymétrie des températures radiantes

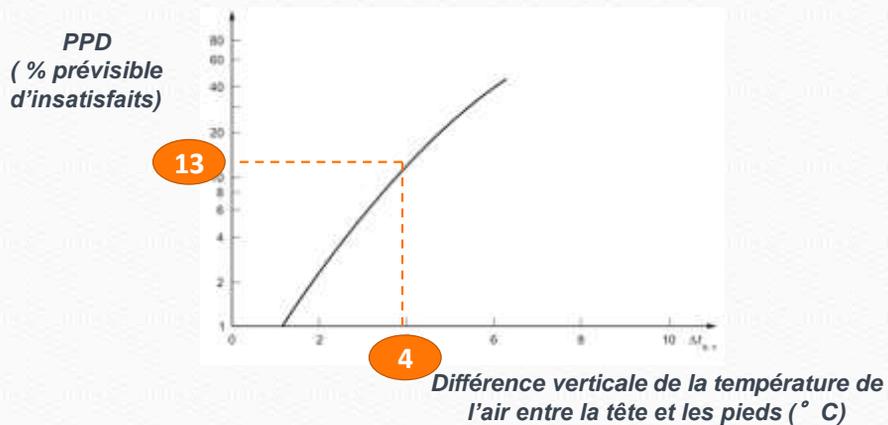


Source : Norme NF EN ISO 7730

➤ 226

## Le confort (hygro) thermique

### Différence verticale de la température de l'air



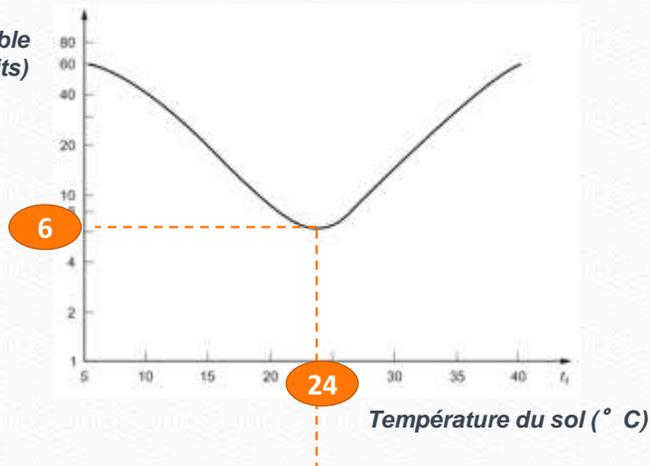
Source : Norme NF EN ISO 7730

➤ 227

## Le confort (hygro) thermique

### Les sols froids ou chauds

**PPD**  
(% prévisible d'insatisfaits)



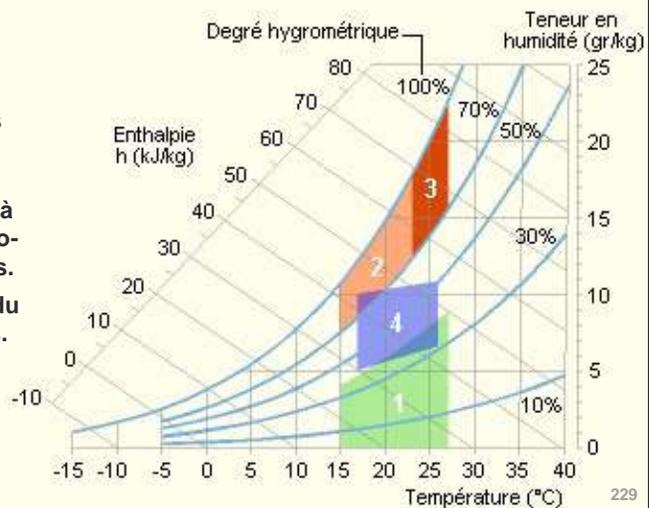
Source : Norme NF EN ISO 7730

➤ 228

## Le confort (hygro) thermique

### Polygone du confort hygrothermique.

1. Zone à éviter vis à vis des problèmes de sécheresse.
2. & 3. Zones à éviter vis à vis de développ.<sup>t</sup> de micro-organismes et bactéries.
3. Zone à éviter vis à vis du développ.<sup>t</sup> des acariens.
4. Polygone de confort hygrothermique.



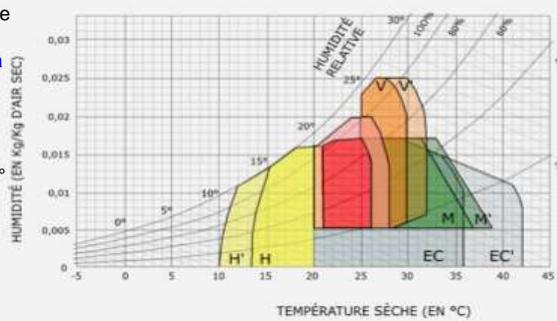
229



## Le confort (hygro) thermique

### Le diagramme de l'ambiance bioclimatique

- Zone de **confort hygrothermique** pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (0,1 m/s) et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été.
- Zone des conditions hygroth° compensables par l'**inertie thermique associée à la protection solaire** et à l'utilisation d'**enduits clairs**
- Extension de la zone de confort hygrothermique due à la **ventilation par augmentation de la vitesse d'air** : de 0,1 à 1,5 m/s
- Zone des conditions hygroth° compensables par une **conception solaire passive** du bâtiment
- Zone des conditions hygroth° qui nécessitent l'**humidification de l'air**



Source : JL Izard, Labo ABC Marseille Luminy

**Si on ne joue qu'avec la température de l'air pour apporter le confort thermique, il faudra du chauffage et de la clim en dehors de cette zone !**

**Si l'on compose également avec la température des parois, le mouvement de l'air et son l'humidité, la zone de confort sans chauffage et sans clim augmente considérablement.**

Extension de la zone de confort hygrothermique due à la ventilation par augmentation de la vitesse d'air : de 0,1 à 1,5 m/s

Zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation

Zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment

Zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air

Source : JL Izard, Labo ABC Marseille Luminy

## Annexes

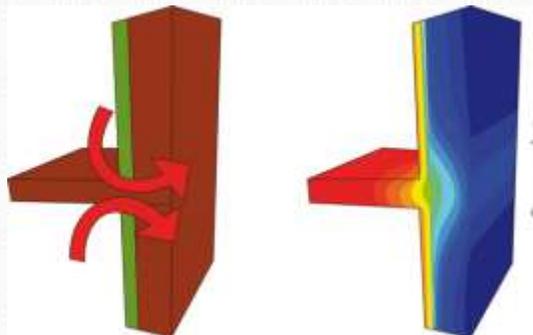
1. Bien être et confort thermique
- 2. Humidité (...suite)**
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
6. Critères pour le choix d'un isolant
7. Exemples d'isolants
8. Exemples de parois "basse conso"

## Humidité.

... Mais n'y a t-il que les parties courantes des parois ??

➤ 234

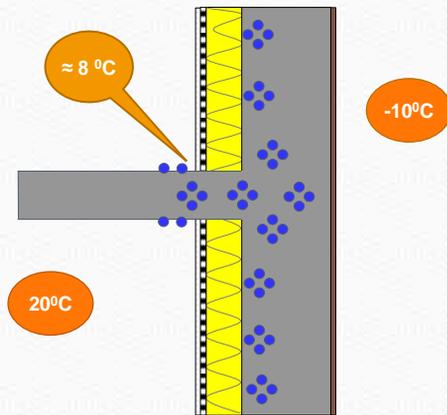
## Les ponts thermiques



→ Les parois étant moins froides au droit des ponts thermiques, nous pouvons penser à un risque moindre à ces points singuliers !

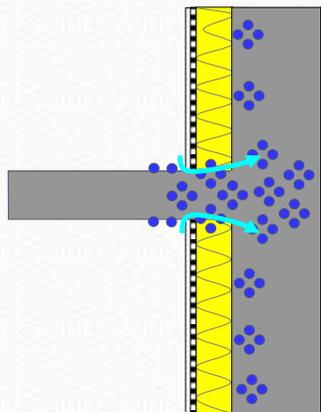
➤ 235

## Les ponts thermiques



→ Sauf que lorsqu'il fait très froid, ou que l'air intérieur est particulièrement humide, la zone de condensation s'étend, et peut atteindre jusqu'au parement intérieur !

## Les ponts thermiques

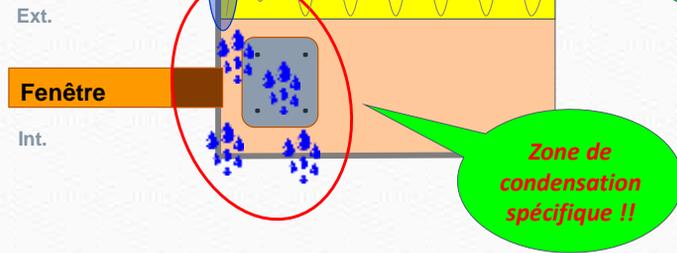


→ Une gestion affinée de l'étanchéité à l'air est particulièrement nécessaire au droit des points singuliers.

## Les ponts thermiques / ITE

- Les ponts thermiques peuvent faire apparaître des zones à risques dans des systèmes jugés plutôt fiables.

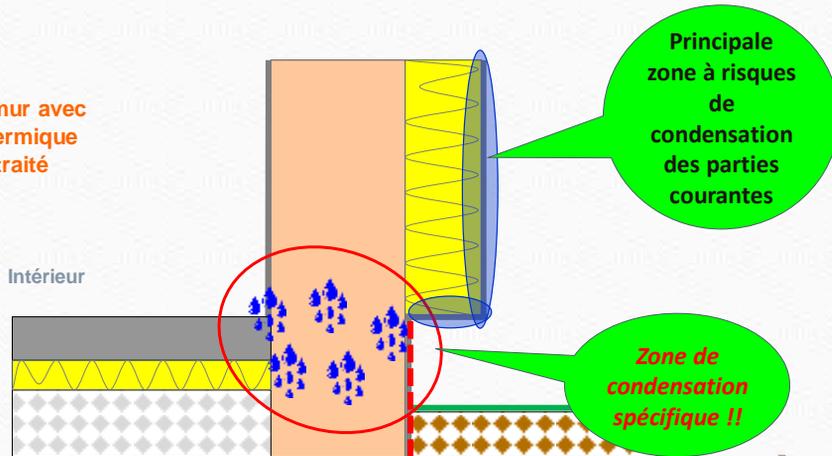
Jonction fenêtre / mur  
avec pont thermique  
non traité (coupe  
horizontale)



## Les ponts thermiques / ITE

- Les ponts thermiques peuvent faire apparaître des zones à risques dans des systèmes jugés plutôt fiables.

Bas de mur avec  
pont thermique  
non traité



## Les ponts thermiques / ITE

- Limiter les risques de condensation invite à traiter l'ensemble des ponts thermiques.

→ Isoler le mur bien en deçà du niveau de l'isolation du sol intérieur

Intérieur



Ex. de gestion du pont thermique de bas de mur

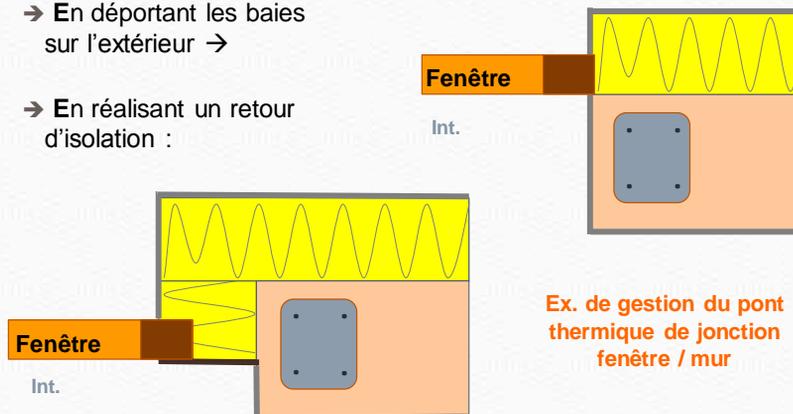
➤ 240

## Les ponts thermiques / ITE

- Limiter les risques de condensation invite à traiter l'ensemble des ponts thermiques.

→ En déportant les baies sur l'extérieur →

→ En réalisant un retour d'isolation :



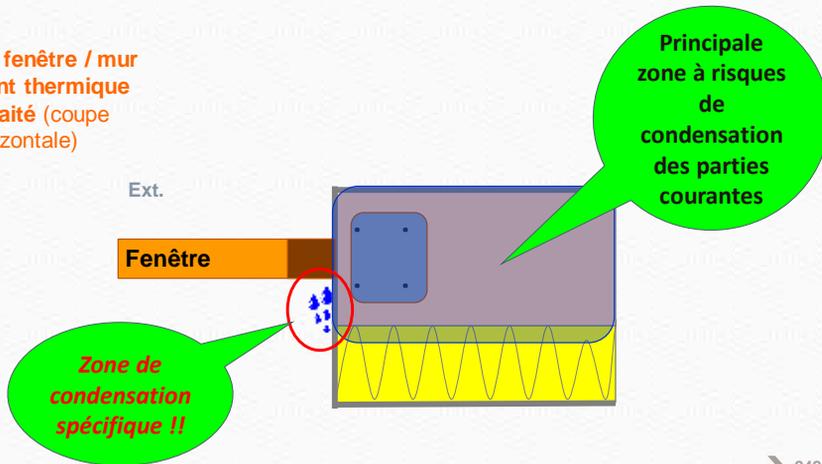
Ex. de gestion du pont thermique de jonction fenêtre / mur

➤ 241

## Les ponts thermiques / ITI

- Les risques de condensation qui accompagnent l'ITI sont amplifiés au droit des ponts thermiques.

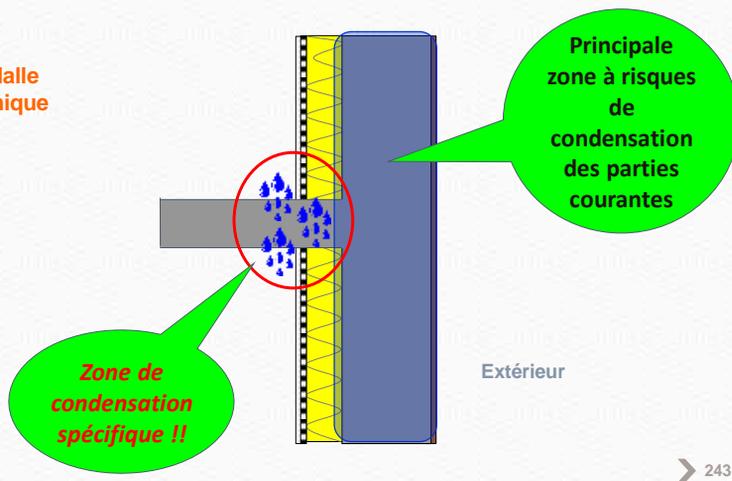
Jonction fenêtre / mur  
avec pont thermique  
non traité (coupe  
horizontale)



## Les ponts thermiques / ITI

- Les risques de condensation qui accompagnent l'ITI sont amplifiés au droit des ponts thermiques.

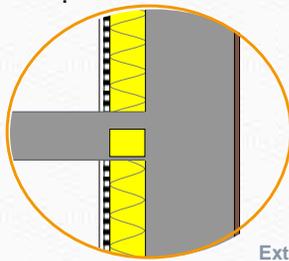
Jonction mur/dalle  
avec pont thermique  
non traité



## Les ponts thermiques / ITI

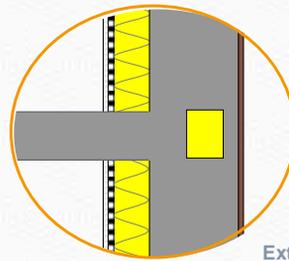
- Ici également, traiter les ponts thermiques permet de limiter grandement les risques spécifiques dus à la condensation de la vapeur d'eau.

→ Rupteur thermique



Extérieur

→ Isolant en bout de dalle :



Extérieur

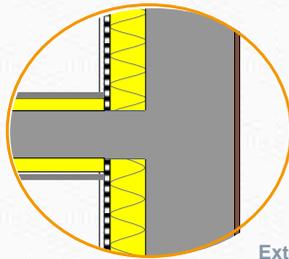
Exemples de gestion du pont thermique d'about de dalle / Neuf.

➤ 244

## Les ponts thermiques / ITI

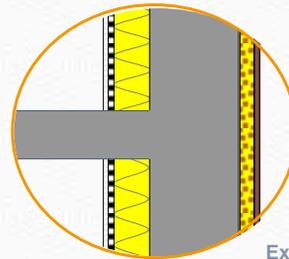
- Ici également, traiter les ponts thermiques permet de limiter grandement les risques spécifiques dus à la condensation de la vapeur d'eau.

→ Isolation des sols et plafonds :



Extérieur

→ Enduit extérieur isolant :



Extérieur

Exemples de gestion du pont thermique d'about de dalle / Existant.

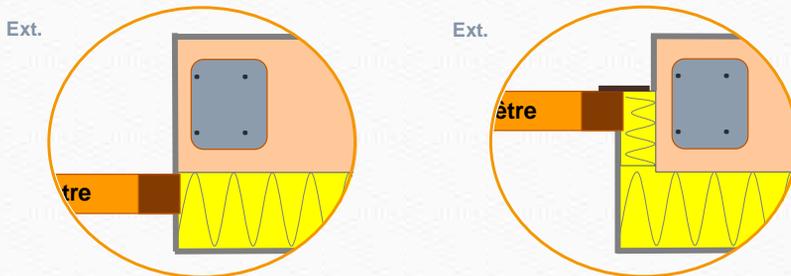
➤ 245

## Les ponts thermiques / ITI

- Ici également, traiter les ponts thermiques permet de limiter grandement les risques spécifiques dus à la condensation de la vapeur d'eau.

→ Déporter les baies sur l'intérieur

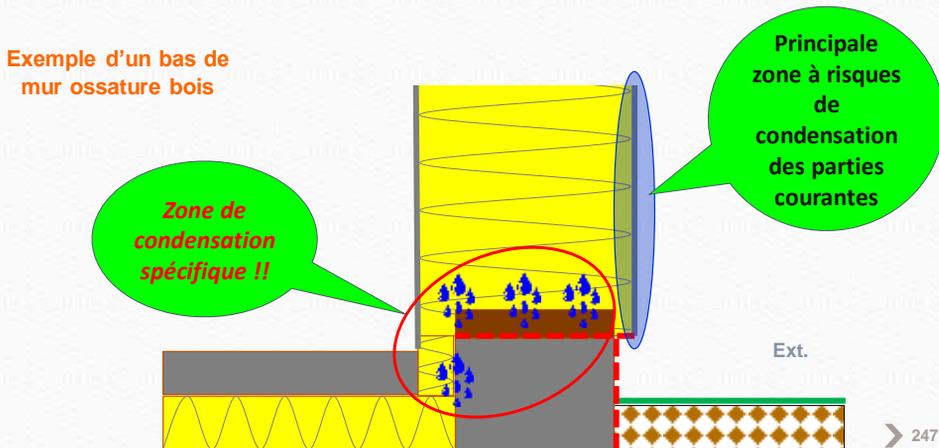
→ Réaliser un retour d'isolation :



Exemples de gestion du pont thermique de pourtour de fenêtre.

## Autres points singuliers ?

- La préoccupation doit dépasser les seuls ponts thermiques pour vérifier s'il n'existe pas de risques spécifiques aux divers changements/ abouts de parois

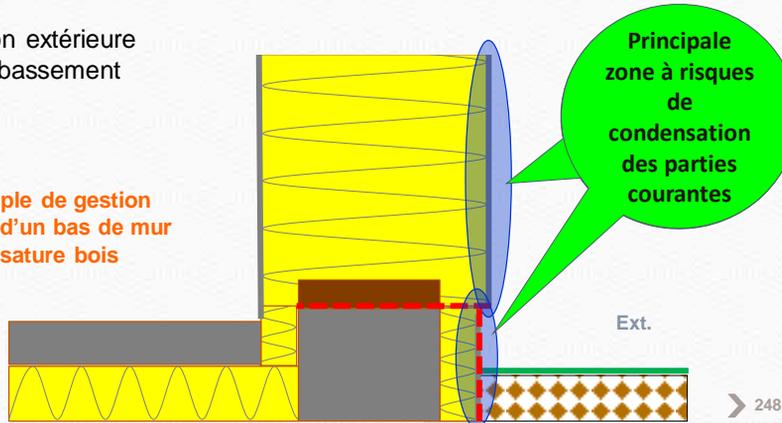


## Autres points singuliers ?

- La préoccupation doit dépasser les seuls ponts thermiques pour vérifier s'il n'existe pas de risques spécifiques aux divers changements/abouts de parois.

→ Isolation extérieure du soubassement

Exemple de gestion affinée d'un bas de mur ossature bois

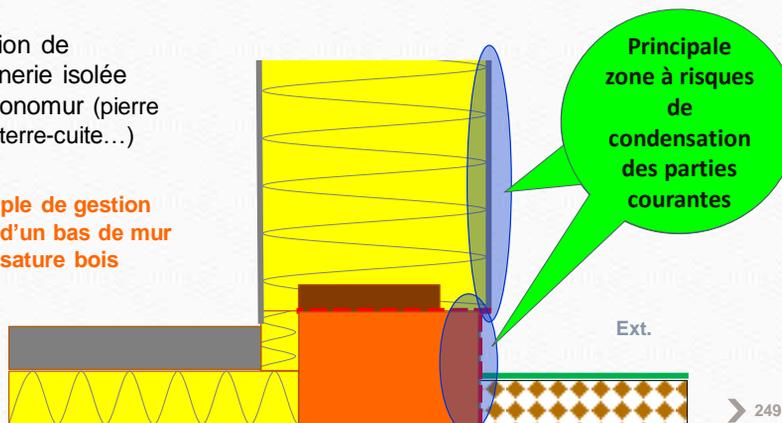


## Autres points singuliers ?

- La préoccupation doit dépasser les seuls ponts thermiques pour vérifier s'il n'existe pas de risques spécifiques aux divers changements/abouts de parois.

→ Utilisation de maçonnerie isolée type monmur (pierre ponce, terre-cuite...)

Exemple de gestion affinée d'un bas de mur ossature bois



## Ponts thermiques intégrés

- Limiter les risques de condensations invite également à limiter les ponts thermiques intégrés.



- Poteau ajouré, fixation ou espaceur plastiques... autant de manières de limiter les déperditions thermiques comme les risques de condensations.

250

## Canalisations et réseaux



- Bien respecter la mise sous fourreau des canalisations



- L'isolation des conduits éloigne les risques dus aux condensations



- Ajuster les pentes, prévoir l'évacuation des condensats...



## Canalisations et

Dans les textes de références et avis d'experts on peut trouver ce type de formule : « *Toute conduite d'eau à l'intérieur de la couche isolante doit être protégée par fourreau. Il en est de même pour toute traversée de ventilation* »



→ Bien respecter la mise sous fourreau des canalisations



→ L'isolation des conduits éloigne les risques dus aux condensations



→ Ajuster les pentes, prévoir l'évacuation des condensats...

➤ 252

## Humidité.

... La qualité de mise en oeuvre

➤ 253

## Qualité de mise en œuvre

- Nous avons déjà remarqué que le qualité de l'étanchéité à l'air était primordiale.

**Rappel**

### Gestion de la vapeur d'eau dans les parois

**Risques moindres...**

si la ventilation des locaux est effective  
Ventilateurs permanents, au moins en période de chauffe

Quantification des infiltrations de vapeur d'eau dans à une membrane non continue devant un isolant en dalle\*

→ Avec une fente de 1mm pour 1m<sup>2</sup> d'isolant, la quantité de vapeur d'eau qui entre par jour dans le mur est de 800g contre qq. grammes avec un pare-vapeur ou un frein de vapeur continu.

- et si l'étanchéité à l'air est effective (scoté chaud de l'isolant)



## Qualité de mise en œuvre

- Dans le cas d'une isolation par l'intérieur, la continuité de cette couche "étanchéité à l'air / gestion de la vapeur d'eau" est primordiale.

**Rappel**

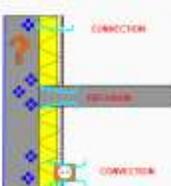
### Continuité de la couche d'étanchéité à l'air / gestion de la vapeur d'eau dans les parois ? . ITI

#### . Gestion de la vapeur d'eau

Avec un pare-vapeur, le passage de la vapeur d'eau doit être « évitable », elle privilégie les points faibles de l'enveloppe.

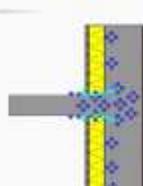
Une fuge dans la paroi elle s'additionne à l'eau déjà contenue dans les matériaux.

En l'absence de l'insertion du résineux isolant, qui le compose, cette eau stagne plus ou moins longtemps dans le mur. Mais généralement, évaporé en façade sud : au moins jusqu'au printemps.



**Rappel**

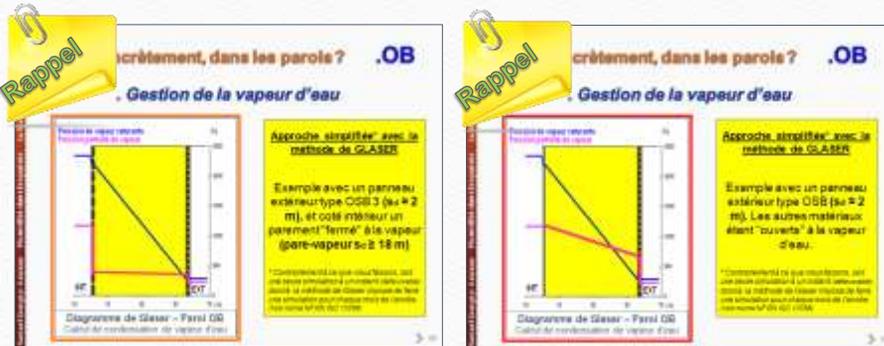
### Les ponts thermiques



→ Une gestion affinée de l'étanchéité à l'air est particulièrement nécessaire au droit des points singuliers.

## Qualité de mise en œuvre

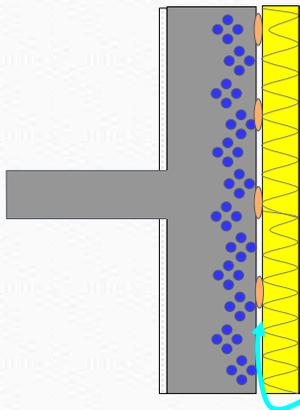
- Dans les parois bois, elle est particulièrement nécessaire si le "parement" extérieur n'est pas très ouvert à la vapeur d'eau. (présence d'un panneau OSB par exemple)



→ Si la couche "étanchéité à l'air / gestion de la vapeur d'eau" est discontinue, on quitte la situation de gauche pour celle de droite.

## Qualité de mise en œuvre

- Mais il faut également réaliser que les vides sont souvent sources de problème s'ils ne sont pas voulus et maîtrisés.



→ En ITE, une pose sur plots où le vide est en contact avec l'extérieur :

- diminue fortement le pouvoir isolant de l'isolation ;
- charge d'humidité le mur support.

→ Et si la ventilation du vide est réelle :

- les risques dus à l'humidité sont plutôt moindres ;
- ... mais l'isolation est alors quasiment inopérante.



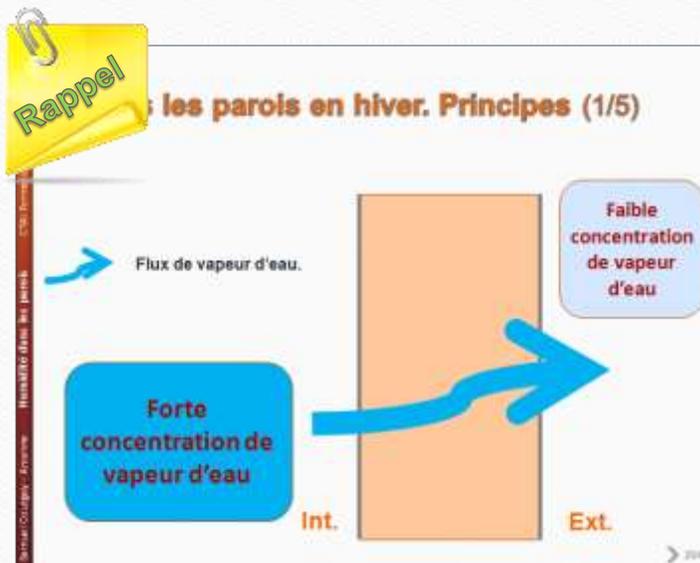
# Humidité.

## ... Les matériaux hygroscopiques



**... Dans les parois, que se passe t'il ?**

**Rapide résumé**



**Rappel**

### ... les parois en hiver. Principes (2/5)

... Sauf qu'une concentration trop importante de vapeur d'eau qui croise des couches froides arrive à saturation : le trop plein (de vapeur) se condense, c'est le "point de rosée".

Int. Ext.

> 262

**Rappel**

### ... les parois en hiver. Principes (3/5)

L'eau contenue dans les matériaux peut s'y déplacer assez facilement si ces derniers sont capillaires...

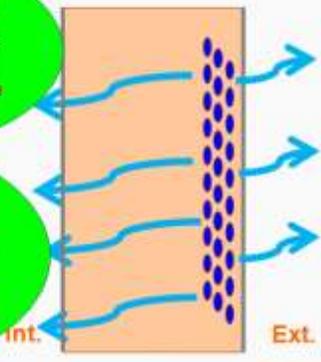
Int. Ext.

> 263



### les parois en hiver. Principes (4/5)

- ... sinon, elle attend le réchauffement de la paroi (qq. heures ou jours sur la façade sud, qq. mois sur la façade nord) pour se ré-évaporer et sortir.
- Pour une paroi pérenne il lui faudra alors n'être composée que de matériaux acceptant cette longue présence d'humidité.



> 264



### les parois en hiver. Principes (5/5)

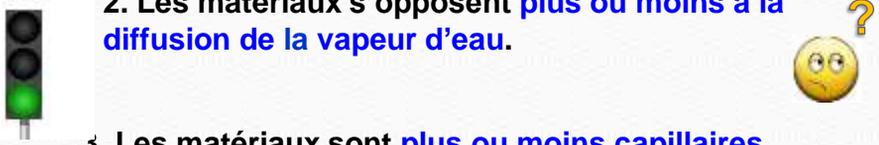
- Sachant que le flux de vapeur :
  - est augmenté si le renouvellement de l'air n'est pas suffisant ;
  - ... d'où la pertinence d'un renouvellement assez régulier de l'air !
  - est hyper dense au droit des étanchéités à l'air ;
  - ... d'où la pertinence d'une réelle étanchéité à l'air côté intérieur !
  - est \* ou - atténué selon la capacité des matériaux à laisser passer la vapeur ;
  - ... on pourra composer avec cette caractéristique des matériaux !



Enfin, il faut réaliser que si le parement extérieur est peu imperméable à la pluie (ancien enduit...), ça charge le mur en eau → complique plutôt la situation.

> 265

**Nous venons de rappeler les 3 "grandeurs" qui souvent suffisent pour cerner la problématique « humidité » au sein des parois :**

1. Les matériaux sont plus ou moins vulnérables à la présence d'eau (hydro-vulnérabilité) / 
2. Les matériaux s'opposent plus ou moins à la diffusion de la vapeur d'eau. 
3. Les matériaux sont plus ou moins capillaires, certains ne sont pas capillaires.

> 266

**Mais un dernier élément est désormais source d'importants échanges,**

**... Comme si c'était la clef de compréhension !**

**On parle de « changements de phases », de « chaleur latente (ou enthalpie) de l'eau »...**

**Ceci transformerait certains matériaux « moyens » d'un point de vue thermique en matériaux ++...**

**Qu'en est-il ???**

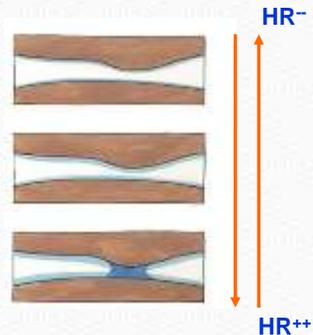
> 268

## Humidité - (re)Prenons la loupe

### → Condensation capillaire

La grande majorité des matériaux est capable de stocker et déstocker de l'humidité dans ses pores. On dit qu'ils sont hygroscopiques.

Selon le taux d'humidité de l'air, la vapeur d'eau s'y condense, ou l'eau s'y évapore



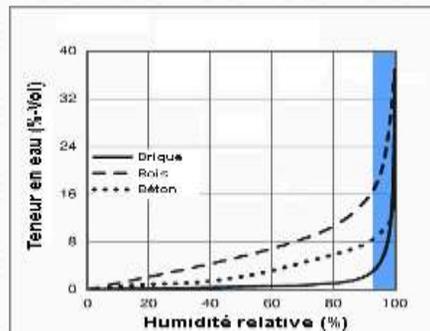
*Les matériaux sont +/- hygroscopiques. Quelques-uns sont non- hygroscopiques.*

## Humidité - (re)Prenons la loupe

### → Capacité hydrique, ou hygroscopicité

- . Capacité d'un matériau à fixer, selon l'humidité relative de l'air, de l'eau dans ses cavités.

Visualisée par la courbe de sorption (ou isotherme de sorption), l'hygroscopicité est quelques fois résumée par la "teneur en eau référence" ( $w_{80}$  : quantité d'eau, en  $\text{kg/m}^3$ , à 80% d'humidité relative).



## Humidité - (re)Prenons la loupe

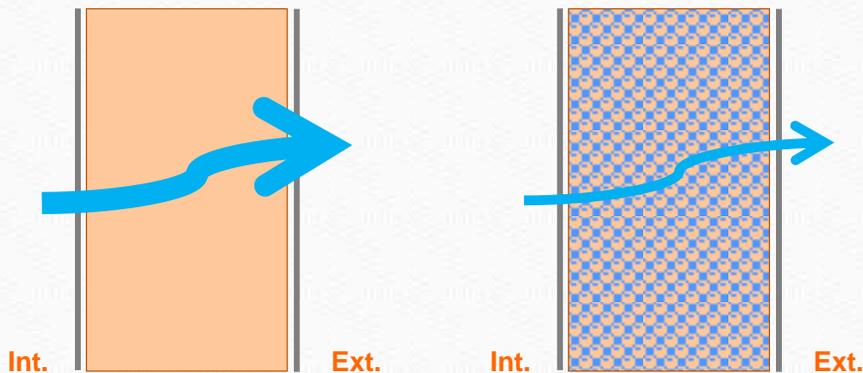
### → Capacité hydrique, ou hygroscopicité

- Ex. de matériaux très fortement hygroscopiques ( $60 < w_{80}$ ) : bois, majorité des bétons et panneaux bois (OSB, MDF...) et qq. produits "techniques".
- Ex. de matériaux fortement hygroscopiques ( $30 < w_{80} < 60$ ) : majorité des enduits (ciment, chaux...), qq. bétons et isolants à base de fibres de bois...
- Ex. de matériaux moyennement hygroscopiques ( $10 < w_{80} < 30$ ) : qq. briques, majorité des enduits à la chaux, qq. pierres et isolants biosourcés...
- Ex. de matériaux faiblement hygroscopiques ( $w_{80} < 10$ ) : majorité des produits plâtre, terre cuite et isolants biosourcés, béton cellulaire, qq. pierres...
- Ex. de matériaux "non hygroscopiques" ( $w_{80} \approx 0$ ) : verre, métaux, verre cellulaire, PSE, PSX, PUR, laines minérales, liège...



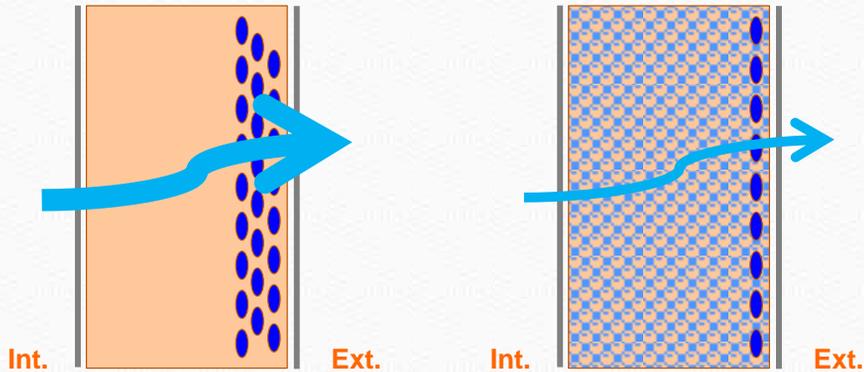
## Humidité - (re)Prenons la loupe

### → Les matériaux hygroscopiques



## Humidité - (re)Prenons la loupe

### → Les matériaux hygroscopiques



➤ 273

## Humidité - (re)Prenons la loupe

### Les matériaux hygroscopiques

*Vis-à-vis des risques dus à la condensation de la vapeur d'eau au sein des matériaux, le caractère hygroscopique va dans le bon sens...*

*Cela permet également, dans certains cas, de stocker de l'humidité sans désagrément sur 1 jour, 1 semaine, 1 mois... (avec certains isolants végétaux par exemple)*

*... cela n'en fait néanmoins pas une des principales clefs nous permettant de comprendre le sujet « humidité » !*



➤ 274

## Les matériaux hygroscopiques

. Outre cette capacité à limiter la condensation de la vapeur d'eau, le caractère hygroscopique des matériaux :

- augmente l'aspect inertiel des parois (du fait de l'absorption/restitution de calories qui accompagne le changement de phase de l'eau) ;
- lisse les variations du taux d'humidité (on parle d' « inertie hydrique ») ;
- ... et il est possible que tout ceci contribue à certains éléments de bien-être, de ressenti.

Par contre certains autres comportements deviennent fluctuants ( $\lambda$ ,  $\mu$ ...)

*En lissant les variations de  $t^\circ$ , cela joue sur le confort intérieur, surtout en été.  
En condensant plus en hiver, cela améliore (légèrement?) le bilan ( $U_{\text{dynamique}}$ ) de la paroi sur la saison froide.*

*Cela joue (positivement) sur le confort hygrothermique*

*Pour pouvoir le démontrer, il faut une norme (type NF EN ISO 7730), mais abordant d'autres éléments du confort, du "bien être".*

*C'est intégrable (et généralement intégré) dans les calculs ( $c$ ,  $\lambda$  utile...)*

215

**Les parois utilisant des matériaux hygroscopiques par ailleurs ouverts à la diffusion de vapeur d'eau sont appelées par certains\* "parois perspirantes" !**

*\* Pour d'autres le fait que les matériaux soient tous ouverts à la vapeur d'eau suffit pour qualifier la paroi de "perspirante". Pour d'autres encore, il faut que les matériaux soient ouverts à la vapeur d'eau et que l'ensemble soit capillaire; sans exigence sur hygroscopicité...*



### LES MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE (MCP)

La terre, même « sèche », contient donc une certaine quantité d'eau sous forme liquide, en équilibre avec la vapeur d'eau contenue dans l'air. C'est cette caractéristique qui explique pourquoi un mur en terre joue le rôle de climatiseur naturel. Pour la comprendre, comparons la terre aux nouveaux « matériaux à changement de phase », communément appelés MCP.

Les MCP sont l'une des dernières innovations dans le monde des matériaux pour la construction. Leurs caractéristiques ? Ils changent de « phase » (d'état physique) en fonction des variations de température du milieu ambiant, comme la glace qui se transforme en eau à 0 °C (ci-dessous). Or la fusion solide-liquide s'accompagne de l'absorption de calories ambiantes... et de leur restitution lors du processus inverse de solidification. C'est sur ce principe physique que s'appuie la mise au point des MCP.

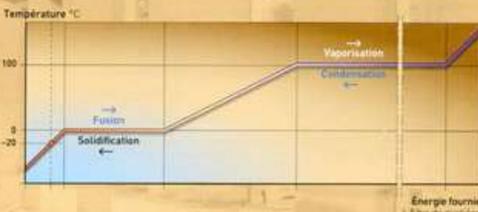
Ils se présentent sous forme de microbilles de cire de paraffine, encapsulées dans des polymères. Les billes sont incorporées dans des matériaux, tels que plaque de plâtre, enduit, béton cellulaire, panneaux « sandwich », etc. Différence majeure avec l'eau, leur température de fusion se situe entre 19 °C et 27 °C.

Dès que l'air ambiant atteint ce seuil de température, la cire fond et absorbe une partie de la chaleur de la pièce. Lorsque la température se refroidit, la cire se solidifie et restitue au milieu ambiant l'énergie accumulée. On parvient ainsi à écarter de 3 °C à 5 °C les pointes de température. Au confort qui résulte de cette régulation s'ajoute également une économie certaine sur les dépenses de climatisation.

### LA TERRE EST UN MCP NATUREL

Une des qualités premières du matériau terre est le confort climatique qu'il apporte à ses habitants, car la terre est un matériau à changement de phase naturel ( inutile en effet de lui incorporer des microbilles de paraffine, puisqu'elle contient déjà une matière capable de changer de phase à température ambiante : l'eau ! Certes, l'eau gèle à 0 °C et bout à 100 °C... mais ces règles diffèrent pour les ponts capillaires de quelques nanomètres d'épaisseur établis entre les plaquettes d'argiles. À cette échelle, l'eau est en équilibre avec l'humidité ambiante, et une partie de cette eau s'évapore quand la température extérieure s'élève telle « bout » à température ambiante. Inversement, il y a condensation capillaire lorsque la température diminue. Ainsi, la nanostructure du matériau terre permet à l'eau qu'il contient de changer de phase à température

ambiante : quand la température augmente, cette eau absorbe une partie de la chaleur de la pièce en s'évaporant ; lorsque la température se refroidit à l'inverse, une partie de l'eau de l'air ambiant se condense dans la terre et restitue l'énergie qu'elle avait accumulée. La terre exploite en quelque sorte le changement d'état de l'eau comme mode de transfert d'énergie propre et infiniment renouvelable, afin de nous procurer confort et climatisation ! De plus, la vaporisation et la condensation de l'eau constituent des échanges énergétiques bien plus puissants que la fusion et la solidification de la paraffine (l'énergie échangée par un litre d'eau qui s'évapore équivaut à celle échangée par 22 kg de paraffine qui fond ! Toutefois, pour que ce mécanisme puisse fonctionner efficacement, encore faut-il qu'il y ait des échanges rapides de vapeur entre l'air extérieur et le cœur d'un mur en terre. Cela implique donc l'existence, en plus des petits pores dans lesquels se produisent la condensation et l'évaporation capillaires, d'un réseau de canaux de plus grand diamètre, efficacement connectés entre eux et avec l'extérieur. Un tel réseau se rencontre dans la terre, et dans certains matériaux naturels, mais pas l'encore dans les briques et bétons ordinaires. C'est une piste de recherche sérieuse pour demain.



Prenez un bloc de glace dont la température est de -20 °C et chauffez-le : sa température augmente continuellement jusqu'à 0 °C. À ce stade, la température s'élève plus : la glace commence à fondre. Tant que toute l'eau ne sera pas passée de l'état solide à l'état liquide, la température reste constante. Lorsque le bloc de glace a fondu, la température augmente à nouveau jusqu'à 100 °C... L'eau bouillie dans ce la température se stabilise jusqu'à ce que toute l'eau soit devenue vapeur. Ainsi, à tout changement de phase correspond un échange de chaleur. C'est ce principe qu'exploitent les matériaux à changement de phase.



**Vous avez envie de "tomber en amour" avec la construction terre ???**

**Commencez par cet ouvrage !**

## Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite)
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
6. Critères pour le choix d'un isolant
7. Exemples d'isolants
8. Exemples de parois "basse conso"



## Une isolation performante ?

Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :

- conséquente
- générant très peu de ponts thermiques
- accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air
- **composant judicieusement avec l'inertie**
- pérenne

> 279

## L'inertie thermique

Deux grandeurs pour comprendre/expliquer l'inertie thermique :

- l'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)
- l'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

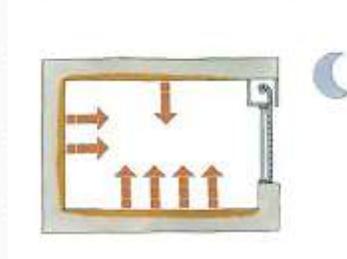
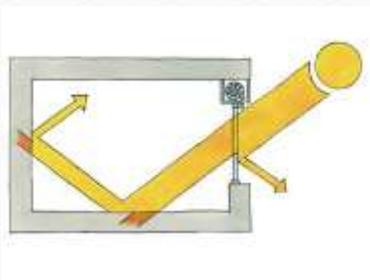
# L'inertie thermique

Deux grandeurs pour comprendre/expliquer  
l'inertie thermique :

- l'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)
- l'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

# L'inertie thermique

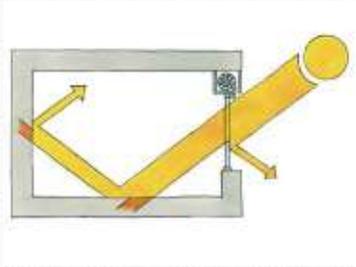
## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)



... mais attention, ce comportement n'est pas forcément toujours recherché. On se posera par exemple la question de la pertinence de l'inertie pour des bâtiments utilisés de manière discontinue, voire épisodique... et toutes les pièces ne voient pas le soleil !

# L'inertie thermique

## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)



... La pertinence remarquée ici ne vaut donc que si un rafraîchissement du bâtiment par surventilation nocturne est possible

# L'inertie thermique

## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

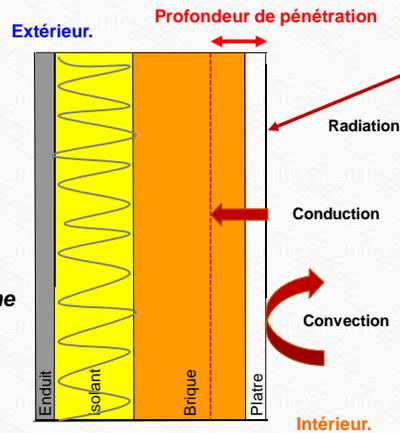
→ Fait référence à la quantité de chaleur pouvant interagir avec l'air intérieur sur une période donnée.

Elle dépend de la masse, de la chaleur spécifique et de la diffusivité des matériaux, ainsi que de l'état de surface des parements (couleur, rugosité...).

La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :

- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
- 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **séquentielle**

\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF EN ISO 13786



# L'inertie thermique

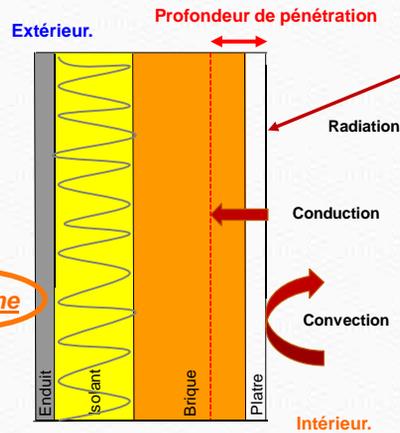
## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

→ Pour limiter les surchauffes en été\*  
 → Pour profiter des calories solaires l'hiver.  
 \* en complément d'une surventilation nocture

La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :

- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
- 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **sequentielle**

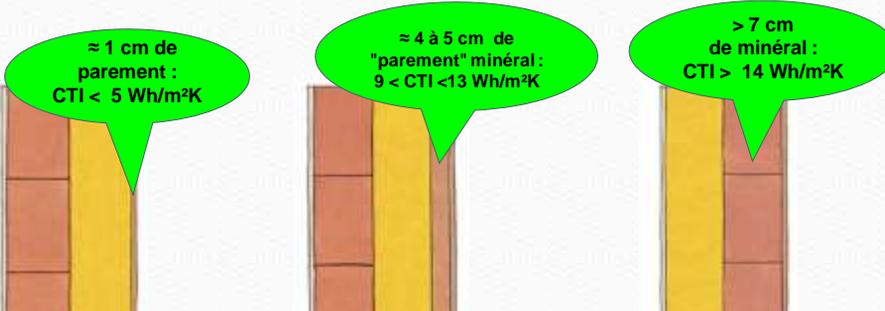
\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF EN ISO 13786



# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure quotidienne (ou CTI quotidienne)

Dessin Hervé Nallet (L'isolation thermique écologique)



≈ 1 cm de parement :  
 CTI < 5  $Wh/m^2K$

Exemple de paroi sans inertie (en France, est appelé également inertie horaire)

≈ 4 à 5 cm de "parement" minéral :  
 9 < CTI < 13  $Wh/m^2K$

Exemple de paroi à inertie quotidienne moyenne (ou CTI quotidienne moyenne)

> 7 cm de minéral :  
 CTI > 14  $Wh/m^2K$

Ex. de paroi à inertie quotidienne forte à très forte (CTI quotidienne forte à très forte)

# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure quotidienne (ou CTI quotidienne)

≈ 1 cm de  
parement :

≈ 4 à 5 cm de

> 7 cm

Avoir des parements "lourds" de plusieurs centimètres d'épaisseur (> 4 à 5 cm), est une réelle sécurité quant au confort d'été\*.

C'est également un gage de performance en hiver pour les pièces ouvertes au soleil.

CTI quotidienne moyenne )

forte à très forte (CTI  
quotidienne forte)

\* Dans le cas où un "rafraîchissement" du bâtiment est possible par surventilation nocturne. > 287

# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure quotidienne (ou CTI quotidienne)

Pour des bâtiments régulièrement utilisés, nous serons tenté par une inertie intérieure quotidienne **de 30 à 50 Wh/m²K minimum**, sachant que :

La norme ISO 13786 définit les calculs de CTI

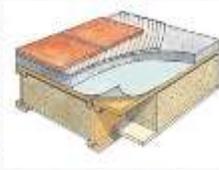
- plus elle est répartie sur l'ensemble des parois, plus son incidence sera réelle ;
- il lui faut être en priorité sur les surfaces recevant le soleil ;
- l'aspect sombre et rugueux des parements augmente les échanges thermiques.

. Pour calculer la CTI d'un m² de paroi : voir norme ISO 13786 et/ou parois type en annexe.  
. Pour calculer la CTI d'une pièce : on multiplie la CTI de chaque paroi par leur surface, on additionne l'ensemble des parois de la pièce que l'on divise par la surface de plancher.

> 288

# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure quotidienne (ou CTI quotidienne)



Sol :  
 CTI quotidienne: 17 Wh/m²K  
 Surface : 35 m²



Mur :  
 CTI quotidienne: 9 Wh/m²K  
 Surface : 45 m²



Plafond :  
 CTI quotidienne: 15 Wh/m²K  
 Surface : 42 m²

$$= ((35 \times 17) + (45 \times 9) + (42 \times 15)) / 35 \text{ soit } 46,5 \text{ Wh/m}^2\text{K}$$

➤ 289

# L'inertie thermique

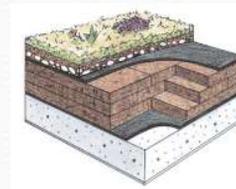
## 1.a. L'inertie intérieure quotidienne (ou CTI quotidienne)



Sol :  
 CTI quotidienne: 17 Wh/m²K  
 Surface : 35 m²



Mur :  
 CTI quotidienne: 21 Wh/m²K  
 Surface : 45 m²



Plafond :  
 CTI quotidienne: 25 Wh/m²K  
 Surface : 35 m²

$$= ((35 \times 17) + (45 \times 21) + (35 \times 25)) / 35 \text{ soit } 69 \text{ Wh/m}^2\text{K}$$

➤ 290



# L'inertie thermique

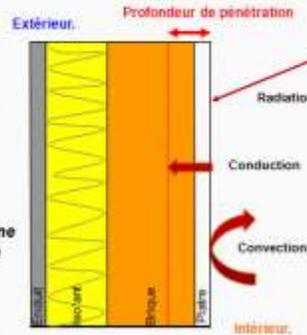
## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

→ Fait référence à la quantité de chaleur pouvant interagir avec l'air intérieur sur une période donnée.

Elle dépend de la masse, de la chaleur spécifique et de la diffusivité des matériaux, ainsi que de l'état de surface des parements (couleur, rugosité...).

- La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :
- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
  - 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **séquentielle**

\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF-EN ISO 13786.



> 50

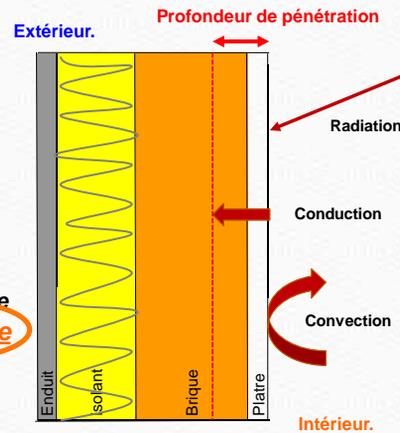
# L'inertie thermique

## 1. L'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)

→ Pour limiter les surchauffes d'été\* malgré qq. jours de canicule  
 → en hiver, pour retrouver un intérieur encore tempéré malgré qq. jours sans chauffage.

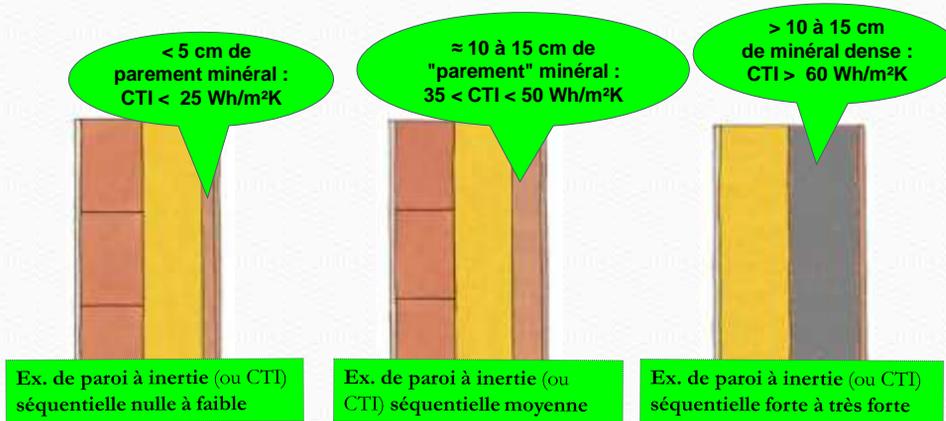
- La CTI s'exprime en  $Wh/m^2K$  pour une période de :
- 1 jour. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **quotidienne**
  - 12 j. On parle d'inertie intérieure (ou CTI) **séquentielle**

\*La CTI est qq. fois appelée "capacité thermique surfacique". De plus, elle peut être accompagnée des adjectifs "utile", ou "efficace". Elle se calcule selon la norme NF-EN ISO 13786



# L'inertie thermique

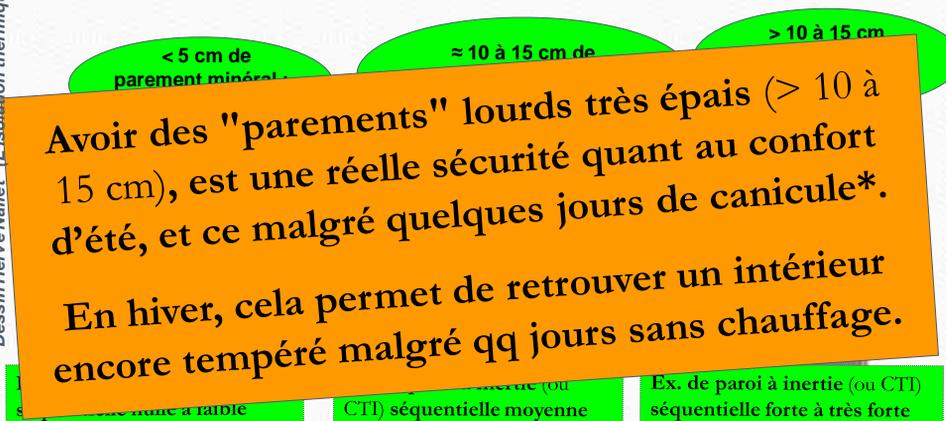
## 1.b. L'inertie intérieure séquentielle (ou CTI séquentielle)



Dessin Hervé Nallet (L'isolation thermique écologique)

# L'inertie thermique

## 1.b. L'inertie intérieure séquentielle (ou CTI séquentielle)



\* Dans le cas où un "rafraîchissement" du bâtiment est possible par surventilation nocturne. > 294

# L'inertie thermique

## 1.b. L'inertie intérieure séquentielle (ou CTI séquentielle)

Pour des bâtiments régulièrement utilisés, nous serons tenté par une inertie intérieure séquentielle **de 150 à 200 Wh/m²K minimum**, sachant que :

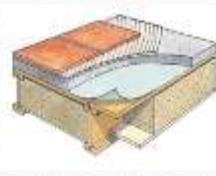
**La norme ISO 13786 définit les calculs de CTI**

- plus elle est répartie sur l'ensemble des parois, plus son incidence sera réelle ;
- il lui faut être en priorité sur les surfaces recevant le soleil ;
- l'aspect sombre et rugueux des parements augmente les échanges thermiques.

. Pour calculer la CTI d'un m² de paroi : voir norme ISO 13786 et/ou parois type en annexe.  
 . Pour calculer la CTI d'une pièce : on multiplie la CTI de chaque paroi par leur surface, on additionne l'ensemble des parois de la pièce que l'on divise par la surface de plancher.

# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure séquentielle (ou CTI séquentielle)



**Sol :**  
 CTI séquentielle : 55 Wh/m²K  
 Surface : 35 m²



**Mur :**  
 CTI séquentielle : 29 Wh/m²K  
 Surface : 45 m²

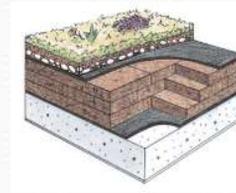
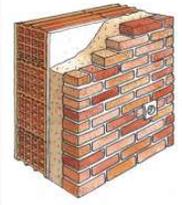
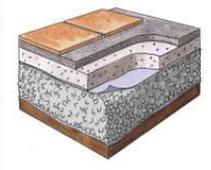


**Plafond :**  
 CTI séquentielle : 29 Wh/m²K  
 Surface : 42 m²

$$= (( 35 \times 55) + (45 \times 29) + (42 \times 29)) / 35 \text{ soit } 127 \text{ Wh/m}^2\text{K}$$

# L'inertie thermique

## 1.a. L'inertie intérieure séquentielle (ou CTI séquentielle)



**Sol :**

CTI séquentielle : 95 Wh/m²K  
Surface : 35 m²

**Mur :**

CTI séquentielle: 85 Wh/m²K  
Surface : 45 m²

**Plafond :**

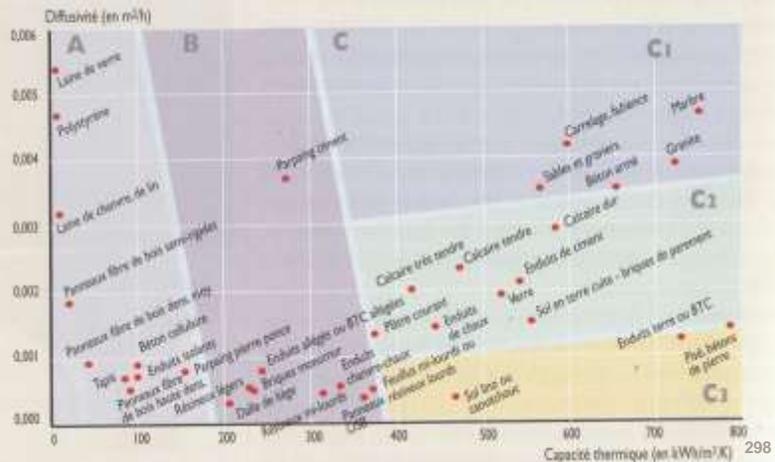
CTI séquentielle : 128 Wh/m²K  
Surface : 35 m²

$$= (( 35 \times 95) + (45 \times 85) + (35 \times 128)) / 35 \text{ soit } 332 \text{ Wh/m}^2\text{K}$$

# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)

- Zone A :** Matériaux non adaptés à la création de masses inertielles.
- Zone B :** Matériaux pouvant apporter un peu d'inertie, surtout si leur surface est laissée rugueuse.
- Zone C :** Matériaux adaptés à la création de capacité thermique intérieure :
  - quotidienne. Dans des épaisseurs allant de 3 (C3) à 6 cm (C1)
  - séquentielle. Dans des épaisseurs allant de 15 (C3) à 25 cm (C1)



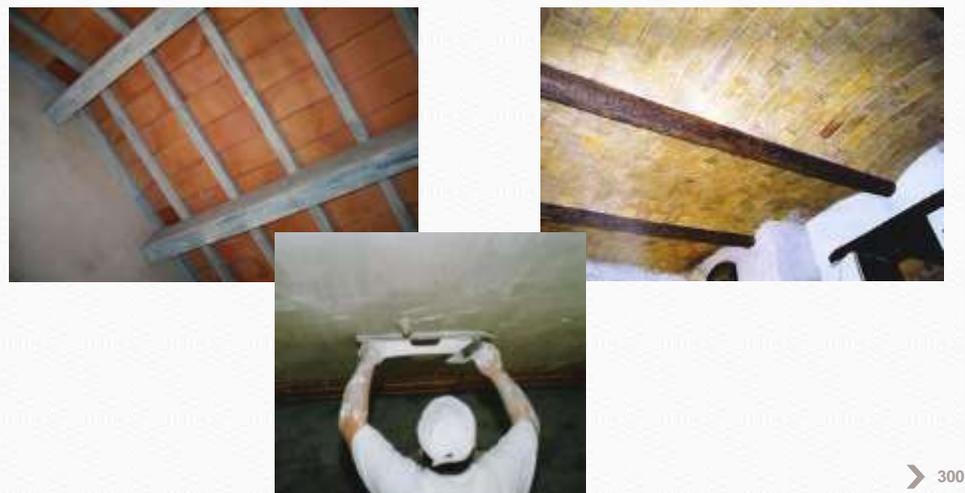
# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)



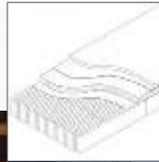
# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)



# L'inertie thermique

## 1. L'inertie thermique intérieure (ou CTI)



> 301

***... et bien entendu, lorsque l'on parle de confort d'été, la pertinence de l'inertie intérieure ne vaut que si l'on profite chaque nuit de la fraîcheur nocturne pour évacuer les calories accumulées en journée !***



> 302

# L'inertie thermique

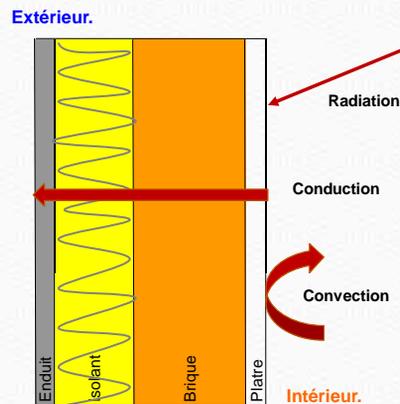
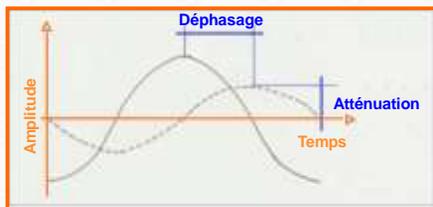
Deux grandeurs pour comprendre/expliquer l'inertie thermique :

- l'inertie intérieure (ou capacité thermique intérieure)
- l'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

La capacité thermique totale, en wattheure par mètre carré kelvin ( $Wh/m^2.K$ ), permet de calculer le **déphasage** (heure) du flux de chaleur, et l'**atténuation de son amplitude** (%)



# L'inertie thermique

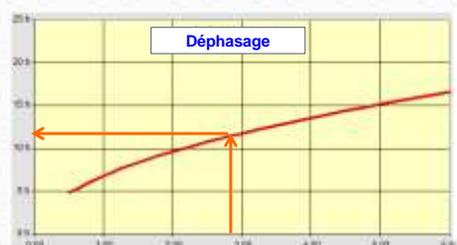
## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

Exemple de calcul\* pour un mur de pierres calcaire de 50 cm d'épaisseur :

$e = 0,50 \text{ m}$  ;  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$  ;  $\lambda = 2 \text{ W/mK}$  ;  $c$  (chaleur spécifique) :  $1000 \text{ J/kgK}$

Constante de temps relative (=R.C/86400). (Rappels :  $R = e/\lambda$  et  $C = \rho * c * e$ )

soit  $((0.50/2) \times (2000 \times 1000 \times 0,50))/86400$  soit **2.89**



305

# L'inertie thermique

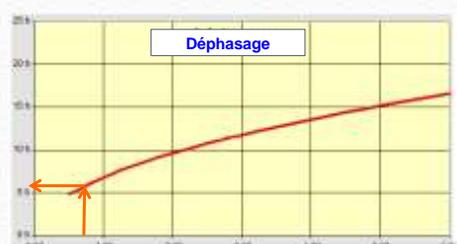
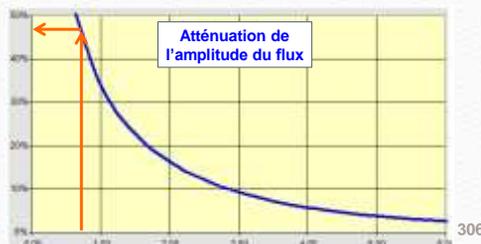
## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

Exemple de calcul\* pour un mur de pierres calcaire de 25 cm d'épaisseur :

$e = 0,25 \text{ m}$  ;  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$  ;  $\lambda = 2 \text{ W/mK}$  ;  $c$  (chaleur spécifique) :  $1000 \text{ J/kgK}$

Constante de temps relative (=R.C/86400). (Rappels :  $R = e/\lambda$  et  $C = \rho * c * e$ )

soit  $((0.25/2) \times (2000 \times 1000 \times 0,25))/86400$  soit **0,72**



306

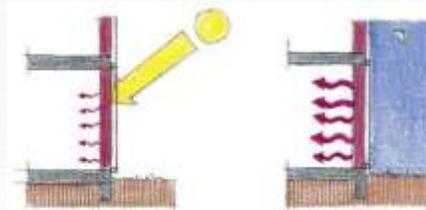
# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

Composer avec l'inertie de transmission (CTT) sert d'abord et avant tout à :

- optimiser les murs capteurs et fonds de serre ;
- comprendre l'incidence des murs sud massifs\*.

Fonctionnement  
type d'un mur  
capteur →



\* C'est par ex. une des clefs permettant de comprendre pourquoi le patrimoine ancien n'est pas si déperditif que ce que nous en dit la thermique statique (moteurs de calculs des RT, DPE...)

➤ 307

# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

*Quelques fois, les vendeurs d'isolants denses, généralement de matériaux bio-sourcés, parlent de déphasage, d'atténuation du flux de chaleur pour vanter leurs produits.*

*Ils seraient de fait particulièrement performants en été, contrairement aux isolants standards (polystyrène, laine minérale...)*

➤ 308

# L'inertie thermique

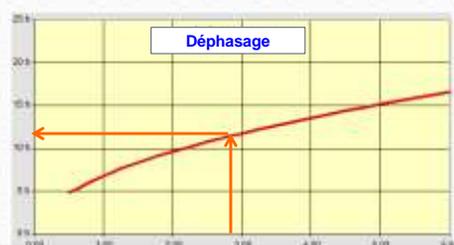
## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

Exemple de calcul\* pour une isolation en ouate de cellulose de 30 cm :

$e = 0,30 \text{ m}$  ;  $\rho = 55 \text{ kg/m}^3$  ;  $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$  ;  $c$  (chaleur spécifique) :  $2000 \text{ J/kgK}$

Constante de temps relative (=R.C/86400). (Rappels :  $R = e/\lambda$  et  $C = \rho * c * e$ )

soit  $((0.30/0,04) \times (55 \times 2000 \times 0,30))/86400$  soit **2,86**



# L'inertie thermique

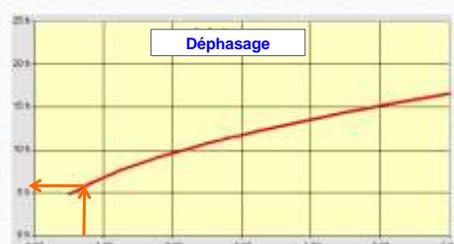
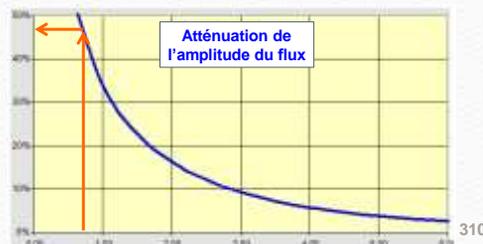
## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

Exemple de calcul\* pour une isolation en laine minérale de 30 cm :

$e = 0,30 \text{ m}$  ;  $\rho = 25 \text{ kg/m}^3$  ;  $\lambda = 0,032 \text{ W/mK}$  ;  $c$  (chaleur spécifique) :  $900 \text{ J/kgK}$

Constante de temps relative (=R.C/86400). (Rappels :  $R = e/\lambda$  et  $C = \rho * c * e$ )

soit  $((0.30/0,032) \times (25 \times 900 \times 0,30))/86400$  soit **0,73**



# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

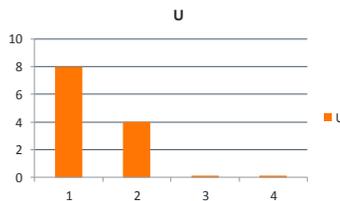
**S'il est exact que ces isolants déphasent plus le flux de chaleur, et atténuent plus son amplitude !**

→ A l'échelle d'un bâtiment, cette participation des isolants est anecdotique sur une paroi lourde.

→ Pour les parois légères, elle est secondaire vis-à-vis d'une forte isolation, d'une bonne étanchéité à l'air, de parements intérieurs lourds, et d'une sur-ventilation des parements exposés au soleil.

**Ne pas oublier que la valeur U renseigne l'intensité du flux de chaleur possible, et :**

- . U paroi 1 (50cm de calcaire) = 4 W/m<sup>2</sup>K
- . U paroi 2 (30 cm de calcaire) = 8 W/m<sup>2</sup>K
- . U paroi 3 (30 cm de ouate) = 0,13 W/m<sup>2</sup>K
- . U paroi 4 (30 cm de LM) = 0,11 W/m<sup>2</sup>K



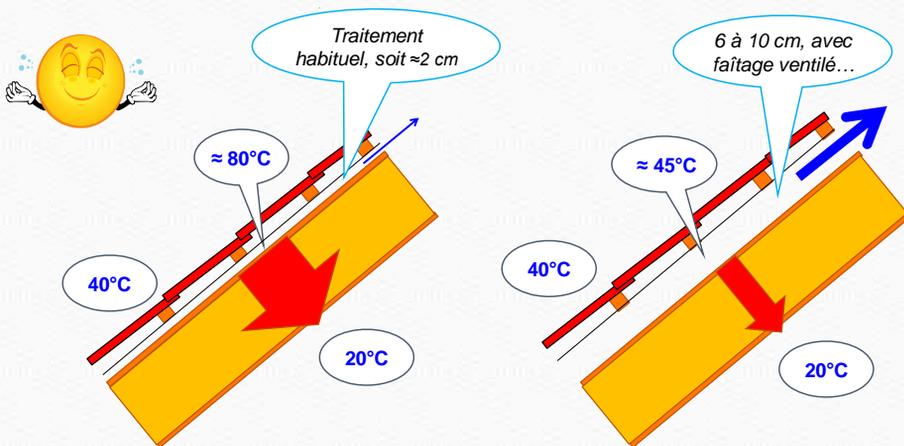
# L'inertie thermique

## 2. L'inertie de transmission (ou capacité thermique totale)

Si l'utilisation d'isolants à "forte" capacité thermique peut être d'importance, c'est particulièrement dans les combles et MOB dans lesquelles il n'est pas possible de composer réellement avec les « principaux leviers »

(forte isolation + étanchéité à l'air réelle, quasi absence de ponts thermiques, parements intérieurs lourds, sur-ventilation des parements exposés au soleil...)

### ... La pertinence d'avoir des parements ventilés... et de les surventiller !



Le flux de chaleur étant proportionnel à la différence de  $t^\circ$  de part et d'autre d'un corps, dans notre exemple, le complexe isolant de gauche laisse passer 2,5 fois plus de calories que celui, identique, de droite.



## Le "toit parasol" antillais



➤ 315



*... Et bien entendu, lorsque l'on parle de confort d'été, il faut également :*

- *ajuster/limiter la surface des baies vitrées ;*
- *éventuellement choisir des vitrages spéciaux ;*
- *aménager les abords (végétalisation, plan d'eau...) ;*
- **et surtout : installer des protections solaires... et ce, si possible à l'extérieur du vitrage.**  
*("On n'attend pas que le loup soit dans la bergerie !")*



## **Revenons à notre « Isolation performante »**



### **Une isolation performante ?**

**Une isolation qui permet des bâtiments confortables, économes et pérennes ; soit une isolation :**

- **conséquence**
- **généralant très peu de ponts thermiques**
- **accompagnée d'une réelle étanchéité à l'air**
- **composant judicieusement avec l'inertie**
- **pérenne**

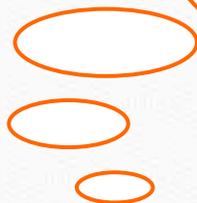


**Les nouveaux enjeux du bâtiment sont environnementaux**

Il nous faut produire le confort auquel la majorité aspire par des moyens radicalement plus performants d'un point de vue environnemental !



***Mais ne peut-on pas être plus ambitieux ??***  
***N'y a-t-il pas plus "écologique" qu'une isolation performante ?***



# Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite)
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
6. Critères pour le choix d'un isolant
7. Exemples d'isolants
8. Exemples de parois "basse conso"

> 321

## Isolation écologique ! ... Tentons une définition :

- Une isolation qui génère des bâtiments confortables et économes, soit une isolation:
  - conséquente ;
  - sans pont thermique ;
  - sans inétanchéité à l'air ;
  - qui compose avec l'inertie ;
  - pérenne ;
- Une isolation qui permette des bâtiments sains ;
- Une isolation qui utilise des « éco-matériaux » .

Une isolation écologique est d'abord et avant tout une isolation qui remplit sa mission... c'est-à-dire une isolation "performante".

> 322

## **Isolation écologique ! ...**

- **Une isolation qui génère des bâtiments confortables et économes, soit une isolation :**

- *consécente ;*
- *sans pont thermique ;*
- *sans inétanchéité à l'air ;*
- *qui compose judicieusement avec l'inertie ;*
- *pérenne ;*

- **Une isolation qui permette des bâtiments sains**

**RAPPEL :** Si la qualité de l'air intérieur est liée au choix de matériaux, c'est surtout vrai pour les matériaux de parement et de finition.

Et le comportement des habitants, la présence d'un garage non indépendant, le choix du mobilier et des produits d'entretien sont de première importance... comme la présence d'une ventilation efficace.

Mais attention, si l'aspect « sain » d'un isolant peut être estimé secondaire\*, pour l'habitant, ce n'est pas le cas pour l'artisan qui le met en œuvre !

→ Lisez les « fiches de sécurité » et les étiquettes « émissions dans l'air intérieur » !



\* Cette "légèreté" n'est possible que parce qu'aucun produit ne semble particulièrement "suspect" > 324

## **Isolation écologique ! ...**

- **Une isolation qui génère des bâtiments confortables et économes, soit une isolation :**
  - *conséquente ;*
  - *sans pont thermique ;*
  - *sans inétanchéité à l'air ;*
  - *qui compose judicieusement avec l'inertie ;*
  - *pérenne ;*
- **Une isolation qui permette des bâtiments sains**
- **Une isolation qui utilise des « éco-matériaux »**

### **Repères**

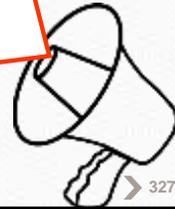
**Vis à vis de l'approche environnementale, plus l'échelle est large, plus l'approche gagne en pertinence !**

**L'échelle « agglomération » est donc plus opportune que l'approche « quartier », qui l'est plus que l'approche « bâtiment », « paroi » et enfin « matériau ».**



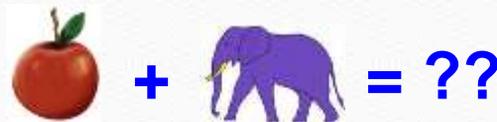
**N10**  
**Repères**

**Oui mais... même pour le dernier niveau, soit le niveau « matériaux de construction », on ne peut taire l'intérêt, pour un même service rendu, de choisir celui des matériaux qui a le meilleur bilan environnemental !**



**... Mais c'est quoi un « éco-matériau » ??**

**Quel(s) indicateur(s) prendre ?  
Comment les additionner ?  
Quelle(s) base(s) de données utiliser ?**



**ACV - Analyse de cycle de vie** (du berceau à la tombe, au berceau...)

**FDES – Base INIES, logiciel Elodie...**

**Normes iso 14000, ...**

**Faute de confiance dans les timides et tardives initiatives "officielles" :**

**certains s'organisent pour mûrir le sujet** (RésoBAT, CD2e, réseau EcoBâtir...)

**, ou utilisent des BdD étrangères** (Ecoinvent, IBO, NIBE...)

**, ou proposent leurs propres outils ou bases de données** (BdD CD2e, ALE Lyon, EnviroBat, Oïkos... et les logiciels EQUER, e-LICCO, COCON, PAPOOSE, ESCALE...)

**, ou utilisent ou mettent en place des certifications, chartes, labels** (NaturPlus, NF Environnement, FSC, PEFC, Oïkos...)

**... Et d'autres, dans l'attente, s'arrêtent à des critères simples** (Matériaux locaux, "bio-sourcés", "puits de carbone"...)

**ACV - Analyse de cycle de vie**

**FDES –**

**Au final : beaucoup de  
perte de temps... et  
toujours peu de  
lisibilité pour les  
acteurs de terrain !**

**Faute de confiance dans**

**certains s'organisent pour mûrir le sujet** (RésoBAT, CD2e, réseau EcoBâtir...)

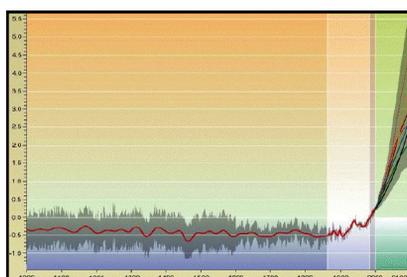
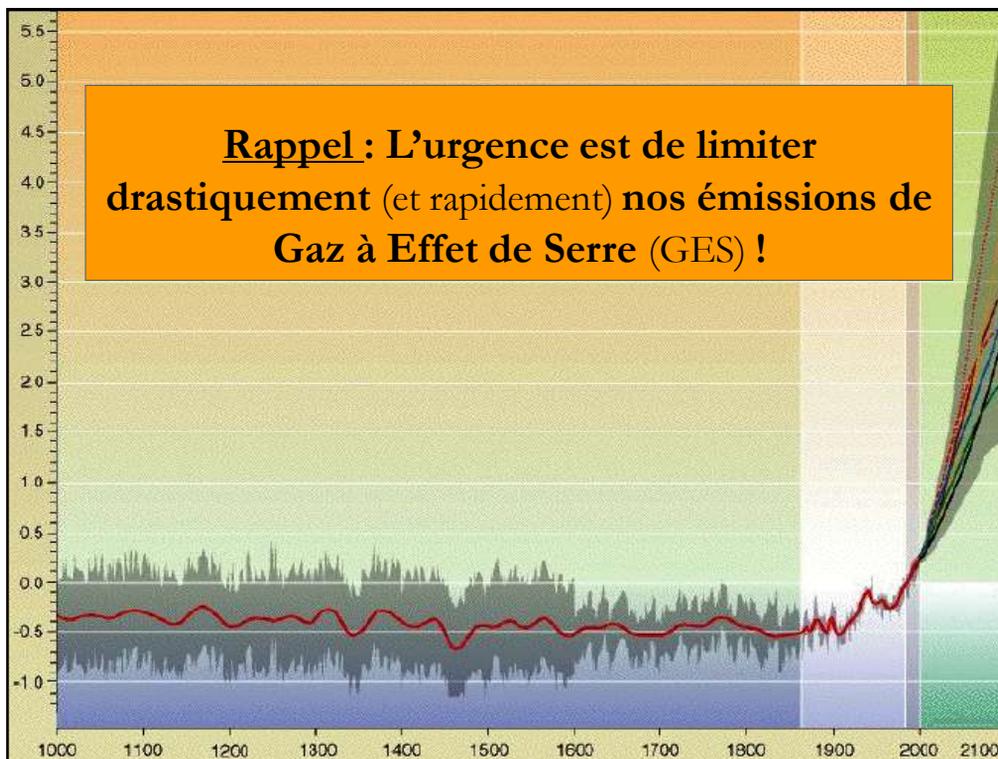
**, ou utilisent des BdD étrangères** (Ecoinvent, IBO, NIBE...)

**, ou proposent leurs propres outils ou bases de données** (BdD CD2e, ALE Lyon, EnviroBat, Oïkos... et les logiciels EQUER, e-LICCO, COCON, PAPOOSE, ESCALE...)

**, ou utilisent ou mettent en place des certifications, chartes, labels** (NaturPlus, NF Environnement, FSC, PEFC, Oïkos...)

**... Et d'autres, dans l'attente, s'arrêtent à des critères simples** (Matériaux locaux, "bio-sourcés", "puits de carbone"...)

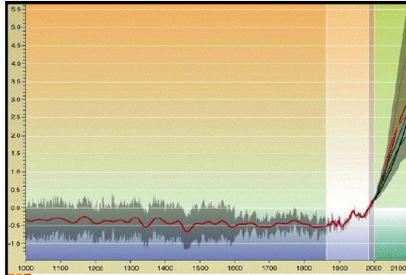




## **Lutter contre le réchauffement climatique !**

**Plusieurs pistes complémentaires sont possibles aux professionnels du bâtiment. En particulier :**

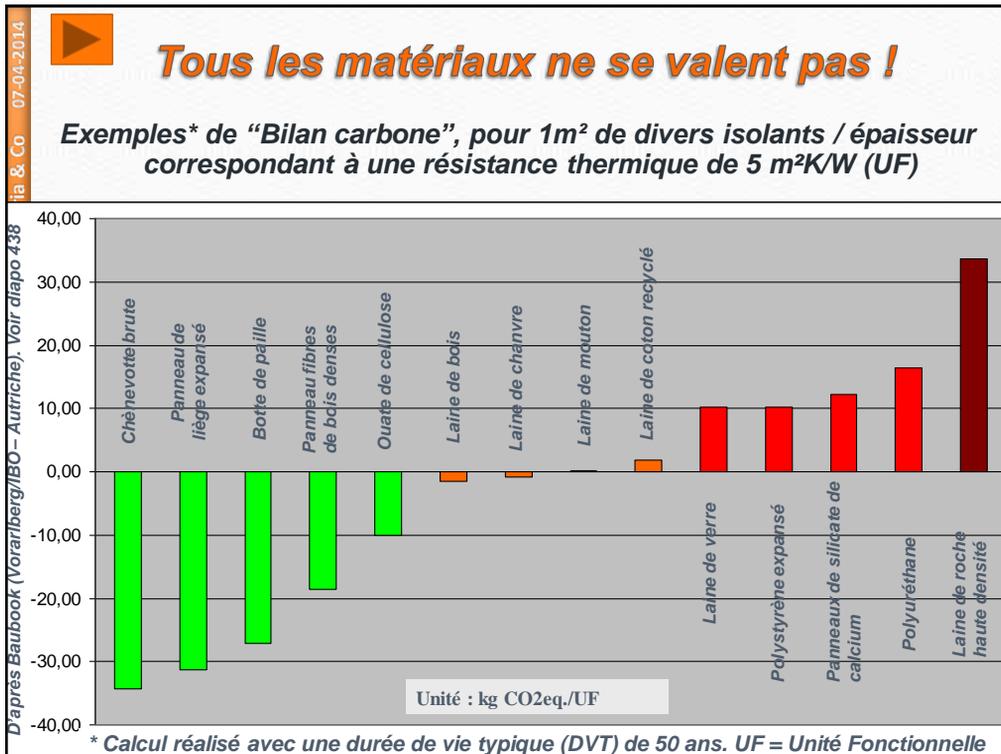
1. *L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments*
2. *L'utilisation d'énergies peu génératrices de GES*
3. *L'utilisation de matériaux dont la fabrication génère peu de GES*
4. *L'utilisation de matériaux "puits de carbone".*



## Lutter contre le réchauffement climatique !

Plusieurs pistes complémentaires sont possibles aux professionnels du bâtiment. En particulier :

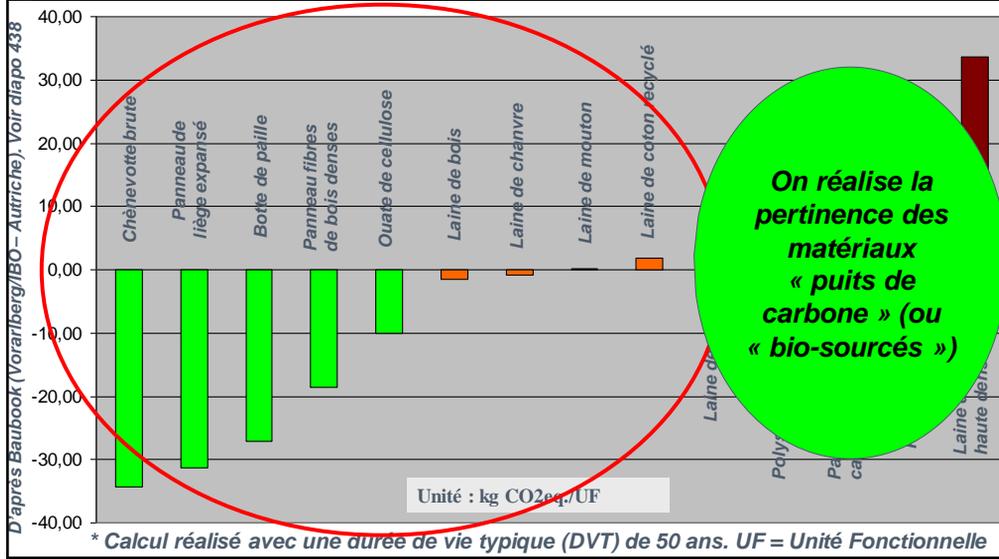
1. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments
2. L'utilisation d'énergies peu génératrices de GES
3. L'utilisation de matériaux dont la fabrication génère peu de GES
4. L'utilisation de matériaux "puits de carbone".





## Tous les matériaux ne se valent pas !

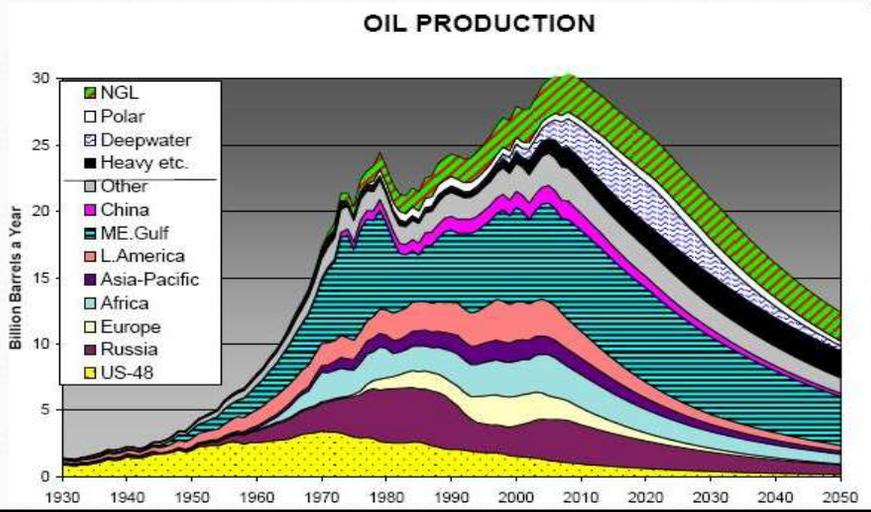
Exemples\* de "Bilan carbone", pour 1m<sup>2</sup> de divers isolants / épaisseur correspondant à une résistance thermique de 5 m<sup>2</sup>K/W (UF)



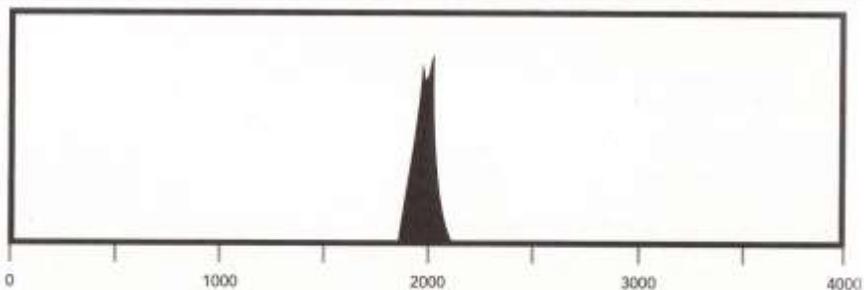
**Si le premier indicateur environnemental est le bilan carbone, le suivant est sans doute l'énergie grise\* !**

\* Grandeur n'ayant pas encore de définition "officielle", nous estimons dans les présents propos: Energie Grise = quantité d'énergie primaire non renouvelable nécessaire à la (seule) fabrication des matériaux.

## ... Raréfaction des matières premières (1 de 2)



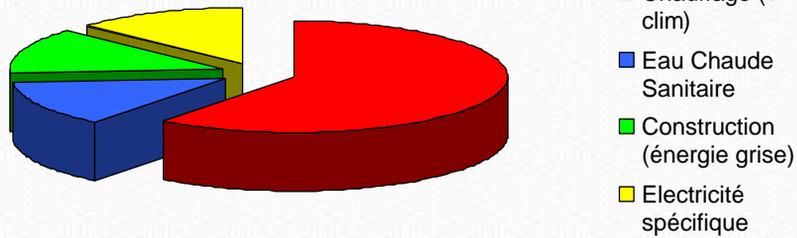
## ... Raréfaction des matières premières (2 de 2)



→ On peut estimer cette courbe (age du pétrole sur 4000 ans\*) représentative de notre comportement vis à vis des énergies fossiles et fissiles...

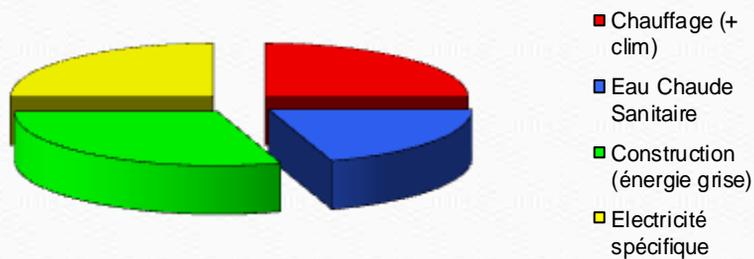
\* Manuel de transition, de Rob Hopkins, édition écosociété. 2010

## Consommation énergétique d'un bâtiment sur sa vie entière



Répartition des consommations d'énergie. Maison existante moyenne / Climat français moyen

## ... et si c'est un bâtiment BBC utilisé par des habitants plutôt économes ?



\* Répartition des principaux postes de consommation d'énergie. Moyenne, d'après études type ACV (Analyse du Cycle de vie) sur un bâtiment BBC, avec comportement économe des habitants.

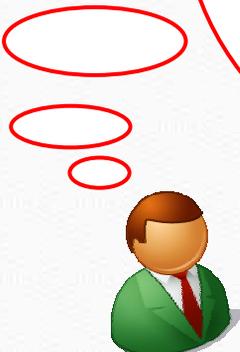
**... et si c'est un bâtiment BBC utilisé par des habitants plutôt économes ?**

**→ Si l'optimisation énergétique est actuellement la priorité des priorités, le coût environnemental de la fabrication des matériaux/bâtiments est celle de demain !**

\* Répartition des principaux postes de consommation d'énergie. Moyenne, d'après études type ACV (Analyse du Cycle de vie) sur un bâtiment BBC, avec comportement économe des habitants.

**Et vu que les isolants de demain vont se fabriquer dans les unités de fabrication que l'on crée aujourd'hui...**

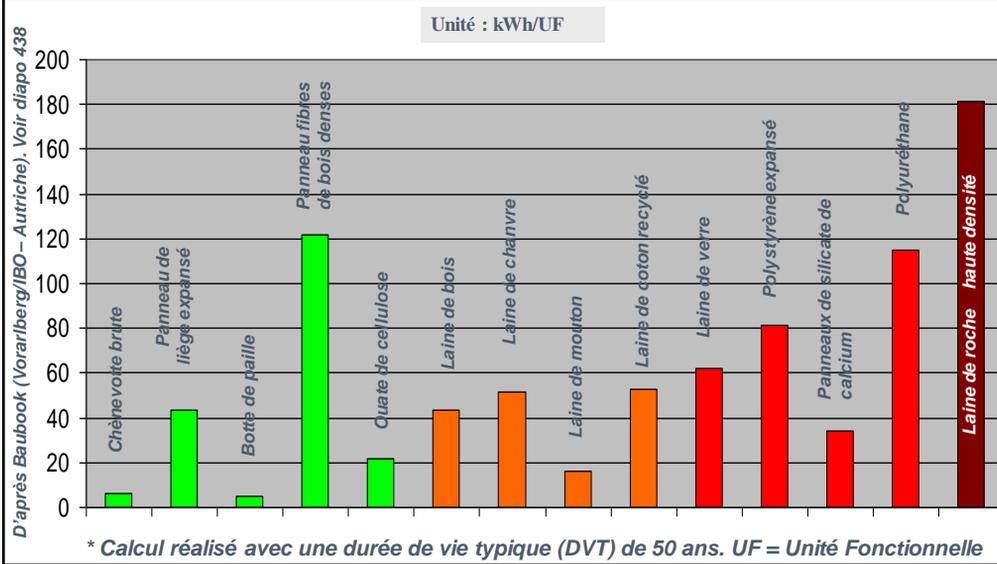
**→ On réalise l'importance que revêt le sujet « éco-isolants » !**





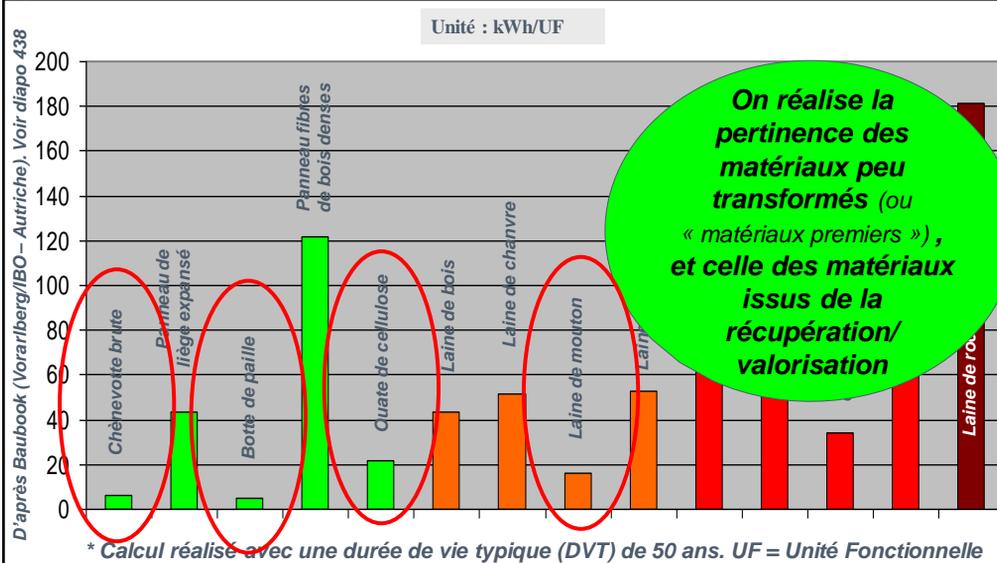
## Exemples de Bilan "énergie grise"\*

UF (unité fonctionnelle) : 1m<sup>2</sup> d'une épaisseur correspondant à une résistance thermique de 5 m<sup>2</sup>K/W.



## Exemples de Bilan "énergie grise"\*

UF (unité fonctionnelle) : 1m<sup>2</sup> d'une épaisseur correspondant à une résistance thermique de 5 m<sup>2</sup>K/W.



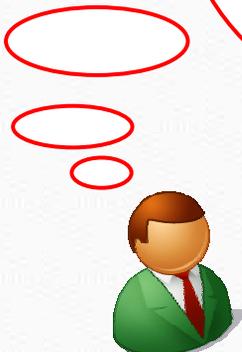
## **Après les approches "carbone" et "énergie grise" :**

### **D'autres indicateurs environnementaux ??**

- **Epuisement des ressources non énergétiques**
- **Atteinte à la biodiversité** (acidification, couche d'ozone, pollution de l'air, de l'eau...)
- **Consommation d'eau**
- **Gestion en fin de vie** (séparabilité, réemploi, recyclabilité, valorisation énergétique...)
- ...etc.

**Mais ne nous trompons pas d'indicateurs !**

**...et souvenons nous que pour être « écologique », un bâtiment sous nos climats doit déjà être thermiquement performant !**



***Sinon, par analogie avec la voiture, un bâtiment « écolo » pourrait être, simplement,***



*...qq. chose de vert,*



*... ou de "bio-sourcé" !*

***Et si l'on parlait  
développement durable ??***

## ... Et si l'on osait le développement durable ?

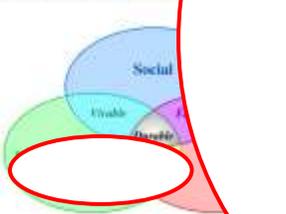


La définition du DD est proposée en 1987 par la commission mondiale de l'environnement (rapport Brundland).



Intensité sociale, valeur du travail ...

## ... Et si l'on



La définition du DD est proposée en 1987 par la commission mondiale de l'environnement (rapport Brundland).



**Le sujet « social » nous impose entre autre de répondre à la question de la répartition des richesses (sur un même territoire, au niveau planétaire...)**

**... On peut toujours espérer mais le DD semble lever des sujets trop peu consensuels pour que l'on en fasse réellement.**

**... C'est néanmoins dans cette direction qu'il faut aller... Mais, sans volonté politique forte et/ou sans pression citoyenne, le risque existe que l'on reste encore longtemps avec majoritairement, de seuls effets d'annonce !**



# Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite)
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
6. Critères pour le choix d'un isolant
7. Exemples d'isolants
8. Exemples de parois "basse conso"



## Vers des bâtiments performants...

*Aucune solution imposée mais des tendances !*

	MURS	U en W/(m².K)	isolant (cm)
Hier	Non isolé		
Aujourd'hui	Isolé	0,40	10
Demain	<b>MURS :</b>	<b>= 0,25 à 0,15</b>	<b>15 à 30</b>
	TOITURE	U en W/(m².K)	isolant (cm)
Hier	Non isolé		
Aujourd'hui	Isolé	< 0,20	20 à 30
Demain	<b>TOITURES :</b>	<b>= 0,15 à 0,08</b>	<b>30 à 50</b>
	SOLS	U en W/(m².K)	isolant (cm)
Hier	Non isolé		
Aujourd'hui	Isolé	0,50	4 à 5
Demain	<b>SOLS :</b>	<b>= 0,30 à 0,15</b>	<b>10 à 25</b>

Calculé à partir de l'isolant habituel avec un lambda d'environ 0,035 W/(m.K) pour les murs et toitures, d'environ 0,025 W/(m.K) pour les sols. >

**Rappel**

... Mais est ce pertinent au niveau environnemental d'avoir de telles épaisseurs ??

	MUR	TOITURE	SOLS
Hier	Non isolé	Non isolé	Non isolé
Aujourd'hui	Isolé	U en W/(m².K) < 0,20	U en W/(m².K) 0,60
Demain	TOITURES : = 0,15 à 0,08	30 à 50	SOLS : = 0,30 à 0,15
		isolant (cm)	isolant (cm)
Hier	Non isolé		
Aujourd'hui	Isolé		
Demain			

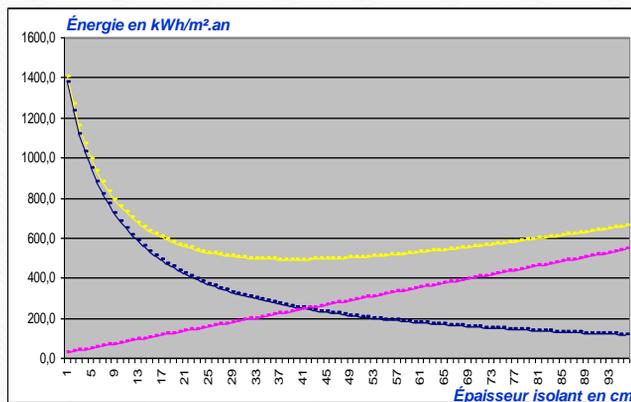
353

## Isolation conséquente.

Est-ce pertinent au niveau environnemental ?

Ca se calcule. Sur le sujet « énergie », cela donne ce type de courbes →

- . Courbe rose : Énergie grise (ou énergie procédé)
- . Courbe bleue : Conso de chauffage
- . Courbe jaune : Cumul des deux courbes



Calculs réalisés avec une durée de vie de 50 ans, et une installation de chauffage performante (rend.t de 80%). Choix de produits standards, « énergie grise » d'après IBO (Autriche).

**Est-ce pertinent au niveau environnemental ?**

## Isolation conséquence.

Matériau ( Densité, Conductivité, Énergie grise)	Épaisseur "plafond énergétique" NANCY (cm)	Épaisseur "plafond énergétique" NICE (cm)
Polyuréthane (30kg/m <sup>3</sup> , 0,027W/mK, 28,33kWh/Kg)	21,8	9,4
Laine de roche HD (140kg/m <sup>3</sup> , 0,04W/mK, 6.47kWh/Kg)	28,7	14,2
Fibre de bois HD (160kg/m <sup>3</sup> , 0,040W/mK, 3.81kWh/Kg)	38,8	21,0
Polystyrène expansé (17kg/m <sup>3</sup> , 0,035W/mK, 27.36kWh/Kg)	42,7	23,7
Laine de verre (25kg/m <sup>3</sup> , 0,036W/mK, 13.83kWh/Kg)	53,2	30,9
Laine de chanvre (30kg/m <sup>3</sup> , 0,04W/mK, 8.64kWh/Kg)	68,5	41,3
Fibre de bois semi-rigide (40kg/m <sup>3</sup> , 0,04W/mK, 5.42kWh/Kg)	76,5	46,8
Ouate de cellulose HD (55kg/m <sup>3</sup> , 0,04W/mK, 1.95kWh/Kg)	130,4	88,9
Botte de paille / fibres perpendiculaires au flux thermique (90kg/m <sup>3</sup> , 0,044W/mK, 0.24kWh/Kg)	323,8	220,7

Calculs réalisés avec une durée de vie de 50 ans, et une installation de chauffage performante (rend.t de 80%). Choix de produits standards, « énergie grise » d'après IBO (Autriche).

## Isolation conséquence.

En résumé (simplifié), l'on peut dire que :

- la majorité des isolants reste pertinente pour les niveaux BBC ... excepté dans le sud avec les matériaux demandant beaucoup d'énergie à être produit (= à forte "énergie grise", ou "énergie procédé") ;
- les épaisseurs les plus importantes du niveau passif sous-entendent l'utilisation d'isolants à "énergie grise" limitée, particulièrement pour les régions clémentes.

Épaisseur "plafond énergétique" NICE (cm)
9,4
14,2
21,0
23,7
30,9
41,3
46,8
88,9
220,7

## Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite)
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
- 6. Critères pour le choix d'un isolant**
7. Exemples d'isolants
8. Exemples de parois "basse conso"

> 357

## Isolant thermique



En France, une certification spécifique (ACERMI - CSTB/LNE), qui :

- certifie les conductivité et résistance thermique
- contrôle régulièrement les produits et leur conditions de fabrication
- peut renseigner l'adaptation à l'usage via les valeurs I.S.O.L.E

- . I : Incompressibilité
- . S : Stabilité dimensionnelle
- . O : Comportement à l'eau
- . L : Cohésion et flexion
- . E : Perméance à la vapeur

> 358

## Isolant thermique



En France, une norme (NF EN 12542), qui :

- certifie

Si l'approche ISOLE permet d'ajuster une première série (nécessaire) de repères quant à l'adaptation à l'usage, elle gagnerait à être actualisée. Entre autre vis à vis des caractéristiques hygrométriques et de l'adaptation des matériaux à certaines parois existantes (murs avec remontées capillaires...).

## Carte d'identité thermique des matériaux. Quatre données suffisent !

Valeurs mesurées

. **Conductivité thermique** :  $\lambda$  (lambda), en **W/m.K**

De 0,004 (isolant sous vide) à 380 (cuivre)

. **Chaleur spécifique** : **c**, en **J/kg.K** (ou chaleur massique)

D'environ 800 à 2500 selon le comportement hygroscopique des matériaux (et 4190 pour l'eau)

. **Masse volumique** :  $\rho$  (rho), en **kg/m<sup>3</sup>**

De quelques kg pour les isolants à plus de 2000 kg pour les bétons et 10000 kg pour certains métaux

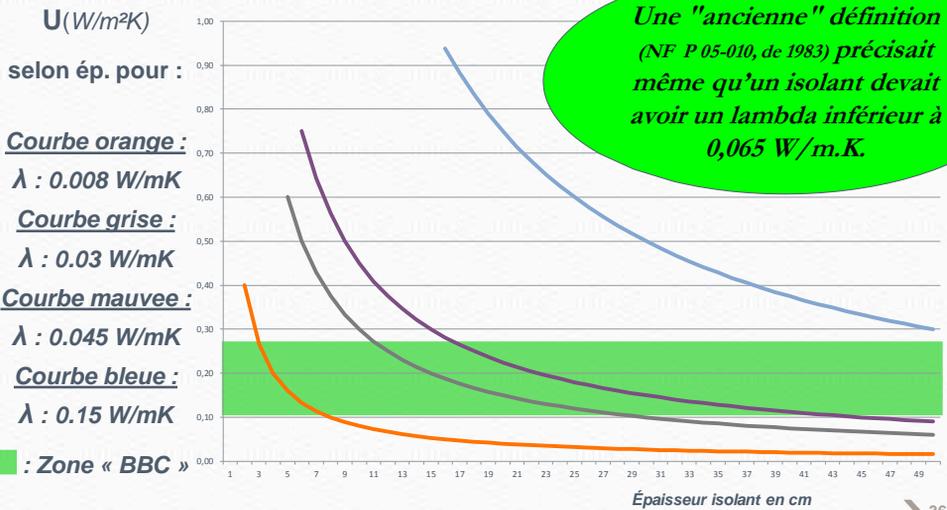
. **Epaisseur** : **d**, en **m**

**Valeurs calculées**

**... et à partir de là on calcule :**

- . La résistance thermique :  $R = d/\lambda$  en  $m^2K/W$
  - . La conductance thermique :  $U = 1/R$  en  $W/m^2K$
  - . La capacité thermique (volumique) :  $C = \rho.c$  en  $J/m^3K$
  - . La capacité thermique (surfactive) :  $C = d.\rho.c$  en  $J/m^2K$
  - . La diffusivité (thermique) :  $a = \lambda/\rho.c$  en  $m^2/s$
  - . L'effusivité (thermique) :  $b = \lambda.\rho.c^{0,5}$  en  $Ws^{0,5}/m^2K$
  - . La constante de temps relative :  $CT = R.C / 86400$ , sans unité
- ... etc.

**Réalisons l'incidence du lambda sur l'efficacité à limiter les flux de chaleur**



**Valeurs mesurées**

## La carte d'identité "hygro(métrique)" des matériaux

- **Facteur de résistance à** (la diffusion de) **vapeur d'eau** :  $\mu$  (mu), **sans unité** (ou Sd pour un produit)
- **Coef. d'absorption d'eau** (pour le comportement capillaire) : **A** (qq. fois  $A_w$ ), en  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$

... Et dans l'idéal, également coefficients de transport d'eau en absorption ( $D_{ws}$ ), et redistribution ( $D_{ww}$ ), en  $\text{m}^2/\text{s}$

... en plus d'être plus ou moins putrescible et/ou altérable. (**hygro-vulnérabilité**).

## . Caractéristiques "hygro" des isolants 1/3

**NON PERMEABLE à LA VAPEUR D'EAU**



Verre cellulaire

Polystyrène extrudé



Polyuréthane

**PEU (à très peu) PERMEABLE à LA VAPEUR D'EAU**



Panneau de liège



Polystyrène expansé



Laine de chanvre



Panneau de fibres de bois



Mousse minérale



Ouate de cellulose



Laine minérale



Botte de paille

**PERMEABLE à LA VAPEUR D'EAU**

## Caractéristiques "hygro" des isolants 2/3

**NON CAPILLAIRE**

- Laine minérale
- Verre cellulaire
- Polyuréthane
- Polystyrène extrudé
- Panneau de liège
- Polystyrène expansé
- Mousse minérale

**+ ou - CAPILLAIRE**

- Laine de chanvre
- Ouate de cellulose
- Botte de paille
- Panneau de fibres de bois

???\* (indicated for Laine de chanvre, Ouate de cellulose, and Botte de paille)

\* Il manque encore des données pour de nombreux matériaux

365

## Caractéristiques "hygro" des isolants 3/3

**NON PUTRESCIBLE & NON ALTERABLE**

- Verre cellulaire
- Panneau de liège
- Mousse minérale

**IMPUTRESCIBLE, MAIS +/- ALTERABLE\***

- Polystyrène extrudé
- Mousse minérale
- Panneau de liège
- Polystyrène expansé
- Polyuréthane
- Laine minérale
- Laine de chanvre
- Ouate de cellulose
- Botte de paille
- Panneau de fibres de bois

**NON PUTRESCIBLE & très peu ALTERABLE**

**+/- PUTRESCIBLE\* (donc +/-ALTERABLE\*)**

\* De nombreuses données sont peu explicites... d'où les « +/- »

366

## **Repères économiques pour le choix des isolants**

***... Sachant qu'avant de choisir  
un isolant, il est nécessaire de  
réaliser la diversité des  
techniques de mise en œuvre,***

***... car elles conditionnent  
lourdement le prix final !***

## Murs. Exemples d'ITE (isolation par l'extérieur)



Panneaux entre ossature



Vrac projeté



Panneaux collés  
et/ou chevillés



Vrac insufflé

369

## Murs. Exemples d'ITI (isolation par l'intérieur)



Vrac projeté



Panneaux collés



Panneaux entre rails



Panneaux chevillés



Vrac insufflé



Panneaux entre ossature



Double cloison

> 370

## Toitures. Exemples



Coffres de toit



Panneaux par dessus



Vrac par dessous



Panneaux par dessous



Sarking

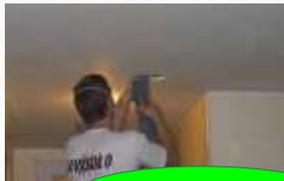


Panneaux en maçonnerie légère



Vrac par dessous

## Planchers / Sols. Exemples



Insufflation



Béton allégé



Panneaux par dessus



Projection



Vrac par dessus



Panneaux par dessous



Isolation du pourtour, côté int. et/ou ext.

## Repères économiques.

Une référence sera laissée dans les fiches "matériau", avec en repères :

- **Coût matériau pour 1 m<sup>2</sup> d'une résistance R de 5 m<sup>2</sup>K/W :**
  - . € : < 25 Euros
  - . €€ : entre 25 et 50 Euros
  - . €€€ : > 50 Euros
  
- **Incidence du type de mise en œuvre :**
  - . € : simple déversement ou possibilité d'une mise en œuvre simultanée isolant/parement
  - . €€ : l'isolant peut être support du parement de finition
  - . €€€ : la réalisation de "coffre" est nécessaire, et autres types de pose complexe.



## Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite)
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
6. Critères pour le choix d'un isolant
- 7. Exemples d'isolants**
8. Exemples de parois "basse conso"

## . Isolants à base de plastiques alvéolaires

### Polystyrène expansé (EPS)



Bilan CO<sub>2</sub> : 3.45 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 27.36 kWh/kg (\*)

Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.032 à 0.038	W/m.K
$\rho$	7 à 30	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	1450	J/kg.K
Comportement à la migration de vapeur d'eau		
$\mu$	20 à 100	(sans unité)

- Autres comportements à l'humidité :**
- . Non hygroscopique
  - . Non capillaire
  - . Non putrescible, quasi non altérable 🌱

"Reconnaitances" techniques en France :  
. Nombreux produits sous avis techniques et certification ACERMI

Coût Matériau	€
Type de pose	€ à €€



## . Isolants à base de plastiques alvéolaires

### Polystyrène extrudé (XPS)



Bilan CO<sub>2</sub> : 3.44 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 28.33 kWh/kg (\*)  
**PSX au HFC :** ☠️  
Bilan CO<sub>2</sub> : 81.3 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 28.89 kWh/kg (\*)

Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.029 à 0.035	W/m.K
$\rho$	25 à 40	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	1300 à 1500	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	80 à 100	(sans unité)

- Autres comportements à l'humidité :**
- . Non hygroscopique
  - . Non capillaire
  - . Non putrescible, quasi non altérable 🌱

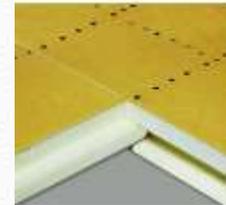
"Reconnaitances" techniques en France :  
. Nombreux produits sous avis techniques et certification ACERMI

Coût Matériau	€ à €€
Type de pose	€ à €€



## . Isolants à base de plastiques alvéolaires

### Polyuréthane (PUR)



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.024 à 0.030	W/m.K
$\rho$	20 à 50	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	1400 à 1500	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	30 à 100	(sans unité)

#### Autres comportements à l'humidité :

- . Non hygroscopique
- . Non capillaire
- . Non putrescible, quasi non altérable 🌱

#### "Reconnaitances" techniques en France :

- . Nombreux produits sous avis techniques et certification ACERMI

Bilan CO<sub>2</sub> : 4,04 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 28,33 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€ à €€
Type de pose	€ à €€



➤ 377

## . (Super) Isolants à base de plastiques alvéolaires

### Isolants sous vides (PIV)



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.0042 à 0.005	W/m.K
$\rho$	100 à 200	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	???	J/kg.K
Comportement à vapeur d'eau		
$\mu$	+ ∞	(sans unité)

#### Autres comportements à l'humidité :

- . Non hygroscopique
- . Non capillaire
- . Non putrescible, non altérable 🌱🌱

#### "Reconnaitances" techniques en France :

- . Pas encore de reconnaissances pour le bâtiment en France

Bilan CO<sub>2</sub> : ??? kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : ??? kWh/kg

Coût Matériau	€€€
Type de pose	€€ à €€€



➤ 378

## . Autres isolants à base de plastiques alvéolaires



Panneaux de polyisocyanurate (PIR).  
Famille des PUR



Panneaux de mousse phénolique (PF)



Mousse à projeter à base d'isocyanates.  
Famille des PUR



La laine de bouteilles plastiques (recyclées)

## . Isolants à base minérale

### La laine de verre



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.030 à 0.050	W/m.K
$\rho$	10 à 30 (jusqu'à 150)	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	≈ 850	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 2	(sans unité)

#### Autres comportements à l'humidité :

- . Non hygroscopique
- . Non capillaire
- . Non putrescible, +/- altérable



"Reconnaitances" techniques en France :  
 . Nombreux produits sous avis techniques et certification ACERMI

Bilan CO<sub>2</sub> : 2.26 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
 Énergie grise : 13.83 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€
Type de pose	€ à €€€

\* D'après base de données Baubook (Vorarlberg/IBO - Autriche).

## . Isolants à base minérale

### La laine de roche



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.032 à 0.050	W/m.K
$\rho$	10 à 40 (jusqu'à 220)	Kg/m <sup>3</sup>
c	≈ 850	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 2	(sans unité)

**Autres comportements à l'humidité :**

- . Non hygroscopique
- . Non capillaire
- . Non putrescible, +/- altérable 🍏 / 🍏

**"Reconnaitances" techniques en France :**

- . Nombreux produits sous avis techniques et certification ACERMI



Bilan CO<sub>2</sub> : 1.64 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 6.47 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€
Type de pose	€ à €€€

## . Isolants à base minérale

### Le verre cellulaire



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.037 à 0.060	W/m.K
$\rho$	100 à 220	Kg/m <sup>3</sup>
c	800 à 1100	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 et + ∞	(sans unité)

**Autres comportements à l'humidité :**

- . Non hygroscopique
- . Non capillaire
- . Non putrescible, non altérable 🍏 🍏

**"Reconnaitances" techniques en France :**

- . Nombreux produits sous avis techniques et certification ACERMI

Mousse de verre.  
Produits voisins  
( $\lambda$  de 0.07 à 0.09)

Bilan CO<sub>2</sub> : 0.94 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 4.36 kWh/kg (\*)  
Mousse de verre :  
Bilan CO<sub>2</sub> : 0.35 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 1.85 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€€ à €€€
Type de pose	€ à €€



## . Isolants à base minérale



### La mousse minérale (ou panneaux d'isolation minérale, panneaux de silicate de calcium hydraté...)

Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.045 à 0,60	W/m.K
$\rho$	115 à 240	Kg/m <sup>3</sup>
c	≈ 1000 à 1300	J/kg.K
Comportement à vapeur d'eau		
$\mu$	3 à 6	(sans unité)

#### Autres comportements à l'humidité :

- . Hygroscopique 🌿
- . Capillaire
- . Non putrescible, quasi non altérable 🌿

#### "Reconnaitances" techniques en France :

- . RAS en France. Produit sous ATE (MULTIPOR de XELLA)



Bilan CO<sub>2</sub> : 0.47 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 1.33 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€€
Type de pose	€€

## . Isolants à base minérale



### La Perlite

Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.045 à 0,075	W/m.K
$\rho$	70 à 240	Kg/m <sup>3</sup>
c	≈ 1000	J/kg.K
Comportement à vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 5	(sans unité)

#### Autres comportements à l'humidité :

- . Hygroscopique 🌿
- . Capillaire (excepté certains produits traités)
- . Non putrescible, quasi non altérable 🌿

#### "Reconnaitances" techniques en France :

- . Nombreux produits sous certification ACERMI...

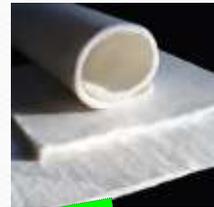


Bilan CO<sub>2</sub> : 0,49 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 2,60 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€€ à €€€
Type de pose	€ à €€

## . (Super) Isolants à base minérale

### Aérogels (ou nanogel)



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.011 à 0.018	W/m.K
$\rho$	env. 3 à 150	Kg/m <sup>3</sup>
c	???	J/kg.K
Comportement à vapeur d'eau		
$\mu$	???	(sans unité)

**Autres comportements à l'humidité :**

- . Non hygroscopique
- . Non capillaire
- . Non putrescible, non altérable 🌱🌱

"Reconnaitances" techniques en France :  
 . Pas encore de reconnaissances pour le bâtiment en France

Bilan CO<sub>2</sub> : ??? kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
 Énergie grise : ??? kWh/kg

Coût Matériau	€€€
Type de pose	€€

## . Autres isolants à base de minéraux



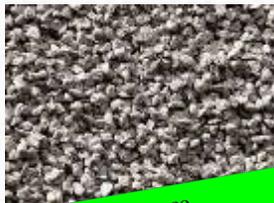
Vermiculite



Argile expansée



Pouzzolane



Pierre ponce



Verre expansé

## . Autres isolants à base de minéraux

Attention !  
Isolants à  $\lambda$   
assez élevé



Vermiculite



Argile expansée



Pouzzolane



Pierre ponce



Verre expansé

## . Isolants à base de végétaux

### La chènevotte



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.050 à 0.060	W/m.K
$\rho$	90 à 115	Kg/m <sup>3</sup>
c	1950	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 2	(sans unité)

**Autres comportements à l'humidité :**

- . Hygroscopique 🌿
- . +/- capillaire ??? (à vérifier)
- . Difficilement putrescible 🍄 / 🍌



Bilan CO<sub>2</sub> : -1,25 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 0,24kWh/kg (\*)

"Reconnaitances" techniques en France :  
- Chènevotte vrac : RAS

Coût Matériau	€
Type de pose	€ à €€€

## . Isolants à base de végétaux

### La brique de chanvre



Bilan CO<sub>2</sub> : 0,03 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 0,88kWh/kg (\*)

Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	$\leq 0.065$	W/m.K
$\rho$	$\approx 300$	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	$\approx 1700$	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 5	(sans unité)

**Autres comportements à l'humidité :**

- . Hygroscopique 🌱
- . +/- capillaire ??? (à vérifier)
- . Difficilement putrescible 🌱 / 🍄

"Reconnaitances" techniques en France :  
: ATEX (Chanvribloc®)

Coût Matériau	€€€
Type de pose	€€

## . Isolants à base de végétaux

### Le liège expansé



Bilan CO<sub>2</sub> : -1,23 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 1.97 kWh/kg (\*)

Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.040 à 0.048	W/m.K
$\rho$	70 à 150	Kg/m <sup>3</sup>
$c$	$\approx 1800$	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 15	(sans unité)

**Autres comportements à l'humidité :**

- . Non hygroscopique
- . Non capillaire
- . Non putrescible et quasi non altérable 🌱

"Reconnaitances" techniques en France :  
. Qq. produits certifiés ACERMI

Coût Matériau	€€ à €€€
Type de pose	€ à €€€



## . Isolants à base de végétaux

### Les laines de lin, chanvre, de tissu recyclé...



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.036 à 0.048	W/m.K
$\rho$	18 à 75	Kg/m <sup>3</sup>
c	1200 à 1700	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 2	(sans unité)

Autres comportements à l'humidité :	
. +/- hygroscopique ???	
. +/- capillaire ??? (à vérifier)	
. Difficilement putrescible (traité)	

**L de chanvre :** Bilan CO<sub>2</sub> : -0,13 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
 Énergie grise : 8,64 kWh/kg  
**L de lin :** Bilan CO<sub>2</sub> : 0.36 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
 Énergie grise : 10.56 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€ à €€
Type de pose	€€€

"Reconnaitances" techniques en France : Qq. produits sous ATec et/ou certifiés ACERMI

➤ 391

## . Isolants à base de végétaux

### Fibres de bois (feutres +/- denses...)



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.038 à 0.060	W/m.K
$\rho$	30 à 200 (voire 350)	Kg/m <sup>3</sup>
c	≈ 1900	J/kg.K
Comportement à vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 10	(sans unité)

Autres comportements à l'humidité :	
. Hygroscopique	
. +/- capillaire	
. Difficilement putrescible (traité)	/

**Bilan CO<sub>2</sub> :** -0,58 à -0,183 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
**Énergie grise :** 3,81 à 5.42 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€ à €€€
Type de pose	€€ à €€€

"Reconnaitances" techniques en France :

. Qq. produits sous ATec et/ou certifiés ACERMI

➤ 392

## . Isolants à base de végétaux

### La botte de paille



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.045 à 0.085	W/m.K
$\rho$	80 à 120 (voire 250)	Kg/m <sup>3</sup>
c	≈ 1600	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 2	(sans unité)

#### Autres comportements à l'humidité :

- . +/- hygroscopique ???
- . +/- capillaire ??? (à vérifier)
- . Putrescible ☹️

#### "Reconnaitances" techniques en France :

- . Règle pro ([www.compallions.fr](http://www.compallions.fr))
- . Demandes d'Atec en cours



Bilan CO<sub>2</sub> : -1,25 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 0,24kWh/kg (\*)



Coût Matériau	€
Type de pose	€€ à €€€

➤ 393

## . Isolants à base de végétaux

### La ouate de cellulose



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.036 à 0.045	W/m.K
$\rho$	25 à 90	Kg/m <sup>3</sup>
c	≈ 2000	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 2	(sans unité)

#### Autres comportements à l'humidité :

- . Hygroscopique 🌿
- . +/- Capillaire
- . Difficilement putrescible (traité) 🌿 ☹️



Bilan CO<sub>2</sub> : -0,91 kg CO<sub>2</sub> eq/kg  
Énergie grise : 1,95 kWh/kg (\*)

Coût Matériau	€ à €€
Type de pose	€ à €€€

**Reconnaitances techniques en France :** . Qq produits sous Atec et ACERMI

➤ 394

## . Autres isolants à base de végétaux

**La paille de lavande**

**Les rafles de céréales**

**Le kenaf, le miscanthus...**

**Les copeaux, le bois minéralisé ou rétifé**

**Les panneaux d'algues**

**Les panneaux d'herbe**

**Les panneaux de roseaux**

"Reconnaitances" techniques : RAS en France, malgré plusieurs produits avec ATE et marquage CE.

➤ 395

## . Isolants d'origine animale

### La laine de mouton



Caractéristiques thermiques		
$\lambda$	0.035 à 0.045	W/m.K
$\rho$	15 à 30	Kg/m <sup>3</sup>
c	1000 à 1800	J/kg.K
Comportement à la vapeur d'eau		
$\mu$	1 à 2	(sans unité)

- Autres comportements à l'humidité :**
- . Hygroscopique 🌱
  - . +/- capillaire ??? (à vérifier)
  - . Difficilement putrescible (traitée) 🌱 🍌

**Bilan CO<sub>2</sub> : 0,04 kg CO<sub>2</sub> eq/kg**  
**Énergie grise : 7,08 kWh/kg (\*)**

Reconnaitances techniques en France : . RAS

Coût Matériau	€ à €€
Type de pose	€€€



## Annexes

1. Bien être et confort thermique
2. Humidité (...suite)
3. Chapitre "inertie" avec calculs
4. Une isolation "écologique" ?
5. La "sur-isolation"
6. Critères pour le choix d'un isolant
7. Exemples d'isolants
8. Exemples de parois "basse conso"

> 397

## Exemple de parois « basse conso\* »

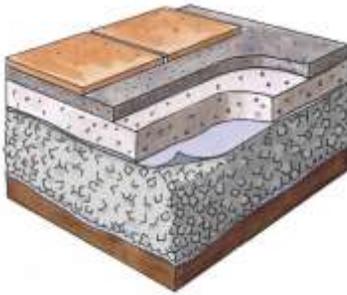
***\*soit un minimum car l'on estime de plus en plus souvent pertinent d'aller jusqu'au niveau « passif »***

Les exemples de parois proviennent de "L'isolation thermique écologique". Cet ouvrage insistant sur l'utilisation des isolants bio-sourcés, le choix des exemples s'en trouve orienté.

> 398

P.01

## Sols à forte inertie



**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 63 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 225 kWh/m<sup>2</sup>**

1. Terre cuite, carrelage, béton ciré...
2. Chape de pose (≈ 4 cm)
3. Dalle (≈12 cm)
4. Géotextile
5. Hémisson à base de granulats de mousse de verre (23 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 25 cm*
6. Géotextile
7. Sol d'origine compacté

**U = 0.30 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 3.34 m<sup>2</sup>K/W)  
Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

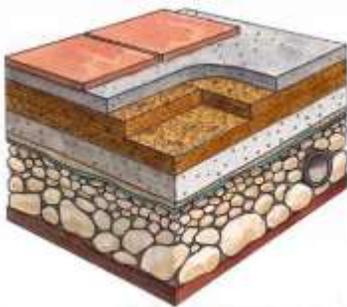
**Inertie :**

- CTI quotidienne : 17 Wh/m<sup>2</sup>K (Très forte)
- CTI séquentielle : 95 Wh/m<sup>2</sup>K (Très forte)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

P.02

## Sols à inertie moyenne



**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 38 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 197 kWh/m<sup>2</sup>**

1. Terre cuite, carrelage, béton ciré...
2. Chape (≈ 6 cm)
3. Panneaux en liège expansé (2 x 6 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 14 cm*
4. Dalle (≈12 cm) selon sur ou sous liège
5. Chape de propreté ou lit de sable
6. Géotextile
7. Hémisson ventilé
8. Sol d'origine compacté

**U = 0.30 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 3.28 m<sup>2</sup>K/W)  
Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

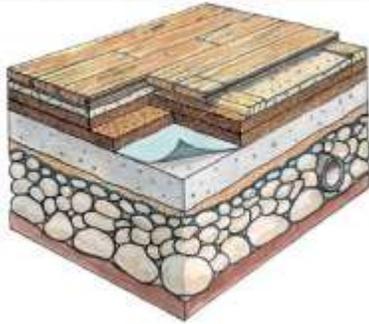
**Inertie :**

- CTI quotidienne : 17 Wh/m<sup>2</sup>K (Très forte)
- CTI séquentielle : 49 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

P03

## Sols à faible inertie



1. Parquet bois ( $\approx 2.2\text{ cm}$ )
2. Lambourde ( $\approx 4\text{ cm}$ )
3. Chênevotte entre lambourdes ( $\approx 4\text{ cm}$ )
4. Panneaux de liège expansé ( $2 \times 5\text{ cm}$ )
- Épais. supplémentaire pour passif : 13 cm**
5. Eventuelle barrière d'étanchéité
6. Dalle ( $\approx 12\text{ cm}$ )
5. Chape de propreté ou lit de sable
6. Géotextile
7. Hérissou ventilé sur sol d'origine compacté

$U = 0.29\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 3.51\text{ m}^2\text{K/W}$ )

Perte dues aux Ponts thermiques : 4%

**Inertie :**

- CTI quotidienne :  $9\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Moyenne)

- CTI séquentielle :  $21\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Faible)

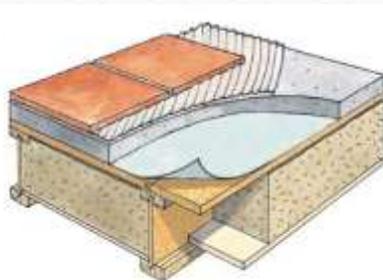
**Bilan  $\text{CO}_2$  du  $\text{m}^2$  de paroi :  $11\text{ kg CO}_2\text{ eq}$   
Coût Énergie grise :  $187\text{ kWh/m}^2$**

\* Calcul  $\text{CO}_2$  et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 401

P04

## Planchers bois sur locaux non chauffés



1. Terre cuite, carrelage, béton ciré...
2. Chape ( $\approx 6\text{ cm}$ )
3. Film de désolidarisation
4. Panneaux bois type OSB
5. Solivage bois type « poutre en I »
6. Chênevotte déversée en vrac ( $25\text{ cm}$ )
- Épais. supplémentaire pour passif : 7 cm**
7. Panneaux plaques de plâtre

$U = 0.19\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 5.34\text{ m}^2\text{K/W}$ )

Perte dues aux Ponts thermiques : 5%

**Inertie :**

- CTI quotidienne :  $17\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Très forte)

- CTI séquentielle :  $55\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Forte)

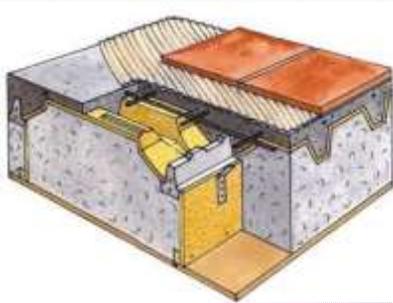
**Bilan  $\text{CO}_2$  du  $\text{m}^2$  de paroi :  $-40\text{ kg CO}_2\text{ eq}$   
Coût Énergie grise :  $136\text{ kWh/m}^2$**

\* Calcul  $\text{CO}_2$  et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 402

P.05

## Planchers béton sur locaux non chauffés



**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -5 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 215 kWh/m<sup>2</sup>**

1. Terre cuite, carrelage, béton ciré...
2. Dalle de compression (≈ 4 cm)
3. Hourdis moulés à base de bois
4. Poutrelle Béton Armé
5. Ouate de cellulose insufflée (≈ 22 cm)
- Épais. supplémentaire pour passif : 6 cm*
6. Joles de coffre en bois type OSB
7. Plafond en panneaux bois perpirants

**U = 0.19 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 5.20 m<sup>2</sup>K/W)  
Perte dues aux Ponts thermiques : 8%

**Inertie :**

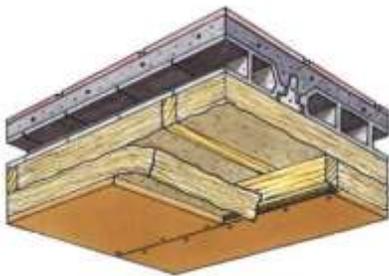
- CTI quotidienne : 17 Wh/m<sup>2</sup>K (Très forte)
- CTI séquentielle : 63 Wh/m<sup>2</sup>K (Forte)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 403

P.06

## Isolation de dalle existante



**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -13 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 39 kWh/m<sup>2</sup>**

1. Sol existant
2. Ossature bois (2 x 10 cm)
3. Laine de mouton (2 x 10 cm)
- Épais. supplémentaire pour passif : 5 cm*
4. Panneaux de feutre de bois ( 3 cm)

**U = 0.19 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 5.32 m<sup>2</sup>K/W)  
Perte dues aux Ponts thermiques : 11%

**Inertie :**

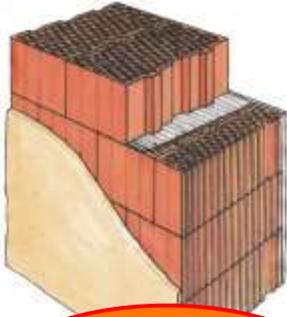
- CTI quotidienne : 18 Wh/m<sup>2</sup>K (Très forte)
- CTI séquentielle : 67 Wh/m<sup>2</sup>K (Forte)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 404

M.01

## Monomur terre cuite



**Matériau "médian"** (entre inertie et isolation), **une mise en œuvre moins épaisse peut dans certains cas être pertinente en mur sud !**

1. Enduit extérieur à base de chaux ( $\approx 2$  cm)
2. Monomur terre cuite (Brique Wienberger de 50 cm, pose roulée)  
**Épais. supplémentaire pour passif : 34 cm**
3. Enduit plâtre ( $\approx 1$  cm)

$U = 0.25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 4,05 \text{ m}^2\text{K/W}$ )  
Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

**Inertie :**

- CTI quotidienne :  $9 \text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Moyenne)
- CTI séquentielle :  $38 \text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Moyenne)

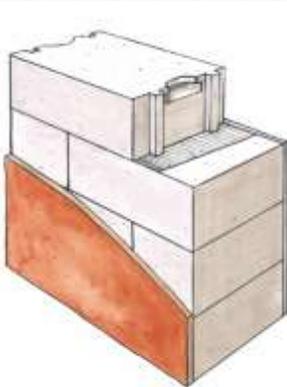
**Bilan  $\text{CO}_2$  du  $\text{m}^2$  de paroi :  $79 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$**   
**Coût Énergie grise :  $303 \text{ kWh/m}^2$**

\* Calcul  $\text{CO}_2$  et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

> 405

M.02

## Monomur béton cellulaire



1. Enduit extérieur à base de chaux ( $\approx 2$  cm)
2. Monomur béton cellulaire (Thermopierre de 42,5 cm)  
**Épais. supplémentaire pour passif : 18 cm**
3. Enduit à base de plâtre ( $\approx 1$  cm)

$U = 0.21 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 4,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ )  
Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

**Inertie :**

- CTI quotidienne :  $7 \text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Moyenne)
- CTI séquentielle :  $19 \text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Faible)

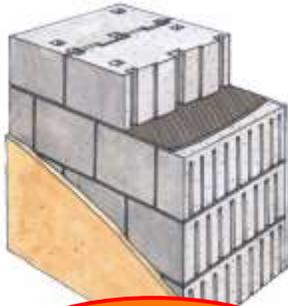
**Bilan  $\text{CO}_2$  du  $\text{m}^2$  de paroi :  $65 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$**   
**Coût Énergie grise :  $188 \text{ kWh/m}^2$**

\* Calcul  $\text{CO}_2$  et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

> 406

M.03

## Monomur en blocs de béton allégé



**Matériau "médian"** (entre inertie et isolation), **une mise en œuvre moins épaisse peut dans certains cas être pertinente en mur sud !**

1. Enduit extérieur à base de chaux ( $\approx 2\text{ cm}$ )
2. Monomur béton allégé de pierre ponce (Bloc KLB-P SWI de 49 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 28 cm*
3. Enduit plâtre ( $\approx 1\text{ cm}$ )

$U = 0.23\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 4,29\text{ m}^2\text{K/W}$ )  
Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

**Inertie :**

- CTI quotidienne :  $8\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Moyenne)
- CTI séquentielle :  $32\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Moyenne)

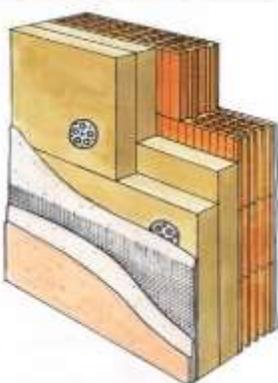
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 35 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 80 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 407

M.04

## Isolation extérieure en panneaux enduits



1. Enduit extérieur tramé ( $\approx 1,5\text{ cm}$ )
2. Panneaux de fibres de bois ( $2 \times 8\text{ cm}$ )  
*Épais. supplémentaire pour passif : 9 cm*
3. Chevilles plastiques
4. Mur porteur en briques ( $15\text{ cm}$ )
5. Finition intérieure

$U = 0.23\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 4,35\text{ m}^2\text{K/W}$ )  
Perte dues aux Ponts thermiques : 6%

**Inertie :**

- CTI quotidienne :  $14\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Forte)
- CTI séquentielle :  $37\text{ Wh/m}^2\text{K}$  (Moyenne)

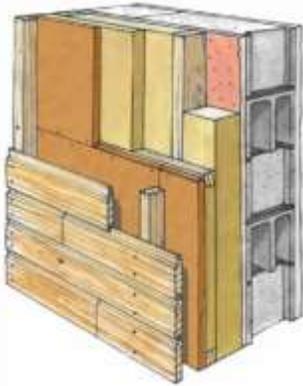
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 15 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 229 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 408

M.05

## Isolation extérieure sous bardage



1. Bardage bois ( $\approx 2$  cm)
2. Latte support bardage (4 cm minimum)
3. Panneaux pare pluie en feutre de bois ( $\approx 2$  cm)
4. Ossature bois (10 + 5 croisé)
5. Rouleau de laine de chanvre  
*Épais. supplémentaire pour passif : 9 cm*
6. Mur d'origine

$U = 0.23$  W/m<sup>2</sup>.K (R= 4,41 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 8%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 16 Wh/m<sup>2</sup>K (Forte)
- CTI séquentielle : 55 Wh/m<sup>2</sup>K (Forte)

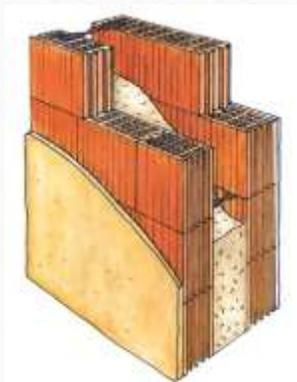
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -24 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 42 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 409

M.06

## Murs maçonnés à double paroi



1. Enduit à base de chaux ( $\approx 2$  cm)
2. Mur de parement en briques (15 cm)
3. Béton de chènevotte très faible densité (20 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 10 cm*
4. Mur porteur en briques (15 cm)
5. Finition intérieure

$U = 0.21$  W/m<sup>2</sup>.K (R= 4.72 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 3%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 14 Wh/m<sup>2</sup>K (Forte)
- CTI séquentielle : 49 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)

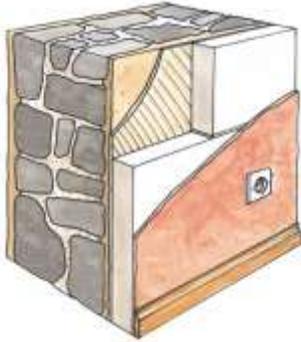
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 20 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 187 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 410

M.07

## Isolation intérieure par panneaux ou blocs à enduire



**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 9 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 26 kWh/m<sup>2</sup>**

1. Mur d'origine (sur notre exemple : mur en pierre calcaire + enduit int. & ext. à la chaux (40cm + 2x2 cm))
2. Mousse de pierre (panneaux Multipor de 10 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 18 cm*
3. Enduit terre (≈ 1 cm)

**U = 0.36 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 2.75 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

**Inertie :**

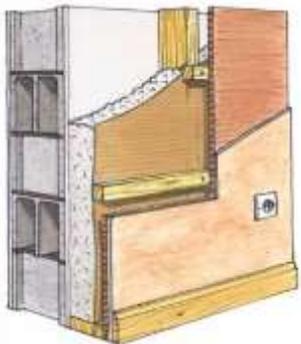
- CTI quotidienne : 9 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)
- CTI séquentielle : 22 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 411

M.08

## Isolation intérieure sur ossature bois



**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -14 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 30 kWh/m<sup>2</sup>**

1. Mur d'origine
2. Ossature bois (10 cm)
3. Ouate de cellulose projetée ou insufflée (10cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 18 cm*
4. Film régulateur de vapeur adaptatif
5. Liteau/ Espace technique (≈ 3 cm)
6. Panneaux de terre (≈ 2 cm)
7. Enduit terre (≈ 1 cm)

**U = 0.38 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 2.61 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 13%

**Inertie :**

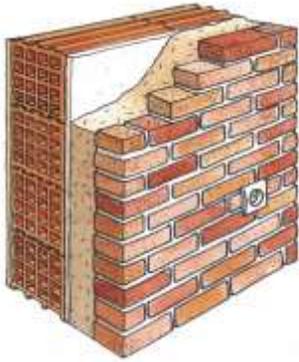
- CTI quotidienne : 12 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)
- CTI séquentielle : 18 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 412

ML09

## Isolation avec contre cloison maçonnée



1. Mur d'origine (brique de 20)
2. Isolant déversé en vrac (10cm de perlite)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 20 cm*
3. Contre cloison en brique de terre crue (12 cm)

**U = 0.37 W/m².K** (R= 2.73 m²K/W)  
Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 21 Wh/m²K (Très forte)
- CTI séquentielle : 85 Wh/m²K (Très forte)

**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 9 kg CO<sub>2</sub>eq**  
**Coût Énergie grise : 43 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

ML11

## Murs en bois massif... isolés



1. Enduit de finition
2. Corps d'enduit
3. Couche d'accrochage
4. Panneaux de laine de bois (10 + 4 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 9 cm*
5. Panneaux de bois massif type KLH® (9,5 cm)

**U = 0.23 W/m².K** (R= 4.31 m²K/W)  
Perte dues aux Ponts thermiques : 6%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 9 Wh/m²K (Moyenne)
- CTI séquentielle : 29 Wh/m²K (Moyenne)

**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -58 kg CO<sub>2</sub>eq**  
**Coût Énergie grise : 228 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

**M.11**

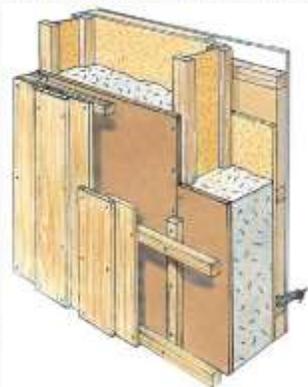
## Murs en bois massif... isolés

Les techniques anciennes s'adaptent pour correspondre aux exigences actuelles



**M.12**

## Murs OB et remplissage isolant à sec



1. Bardage bois (≈ 2 cm)
2. Latte et contre-lattes (6 cm minimum)
3. Panneaux pare pluie en feutre de bois (≈2cm)
4. Ossature bois (poutres en « I »)
5. Ouate de cellulose insufflée (23 cm)
- Épais. supplémentaire pour passif : 0 cm*
6. Panneau contreventant type OSB
7. Espace technique comblé d'un isolant fibres de bois en panneau (≈ 3 cm)
8. Plaque de plâtre

**U = 0.15 W/m².K** (R= 6.70 m²K/W)  
 Perte dues aux Ponts thermiques : 9%

**Inertie :**

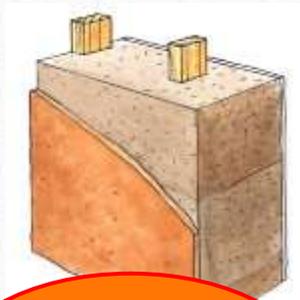
- CTI quotidienne : 9 Wh/m²K (Moyenne)
- CTI séquentielle : 15 Wh/m²K (Faible)

**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -47 kg CO<sub>2</sub>eq**  
**Coût Énergie grise : 114 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO2 et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

M.13

## Murs OB et remplissage bétons légers



**Matériau "médian"** (entre inertie et isolation), **une mise en œuvre moins épaisse ou plus lourde peut dans certains cas être pertinente en mur sud !**

1. Enduit extérieur bas de chaux (≈ 2 cm)
2. « béton » de chanvre (40 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 25 cm*
3. Ossature bois (2 x 6 cm)
4. Plâtre traditionnel (≈1 cm)

$U = 0.24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (R= 4.17 m<sup>2</sup>K/W)  
Perte dues aux Ponts thermiques : 1%

**Inertie :**  
- CTI quotidienne : 8 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)  
- CTI séquentielle : 32 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)

**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -9 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 175 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO2 et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)



## Murs OB et remplissage bétons légers

### Attention, tous les bétons légers ne se valent pas !

**Écriture verte :** solutions « BBC-compatibles »  
**En orange :** solutions potentiellement «BBC-compatibles» avec une approche intégrant l'ensemble des transferts hygrothermiques\*

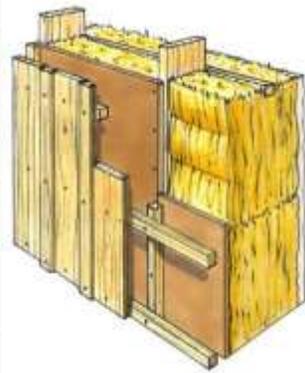
**Note :** les valeurs, chaque fois arrondies, sont ici laissées en premières références

Densité du béton végétal	Lambda (W/m.K)	U (R) pour 20cm	U (R) pour 30cm	U (R) pour 40cm	U (R) pour 50cm
200 kg/m3	0.07	0.35 (2.86)	0.23 (4.29)	0.18 (5.71)	0.14 (7.14)
300 kg/m3	0.09	0.45 (2.22)	0.30 (3.33)	0.23 (4.44)	0.18 (5.56)
400 kg/m3	0.12	0.60 (1.67)	0.40 (2.50)	0.30 (3.33)	0.24 (4.17)
500 kg/m3	0.15	0.75 (1.33)	0.50 (2.00)	0.38 (2.67)	0.30 (3.33)
800 kg/m3	0.25	1.25 (0.80)	0.83 (1.20)	0.63 (1.20)	0.50 (2.00)
1000 kg/m3	0.35	1.75 (0.57)	1.17 (0.86)	0.88 (1.14)	0.90 (1.11)

\* Attention, cette approche qui disqualifie les mélanges trop lourds et/ou trop peu épais n'est pas transposable aux parois recevant le soleil en hiver !!!

M.14

## Murs OB et remplissage bottes de paille



1. Bardage bois ( $\approx 2\text{ cm}$ )
2. Latte et contre-latte ( $6\text{ cm minimum}$ )
3. Panneaux pare pluie en feutre de bois ( $\approx 2\text{ cm}$ )
4. Poteaux bois massif
5. Botte de paille posée sur champ ( $35\text{ cm}$ )  
*Épais. supplémentaire pour passif : 0 cm*
6. Liteau de maintien des bottes
7. Enduit à base de terre, plâtre ou chaux ( $\approx 3\text{ cm}$ )

**U = 0.12 W/m².K** (R= 8.23 m²K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 4%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 15 Wh/m²K (Forte)
- CTI séquentielle : 25 Wh/m²K (Faible)

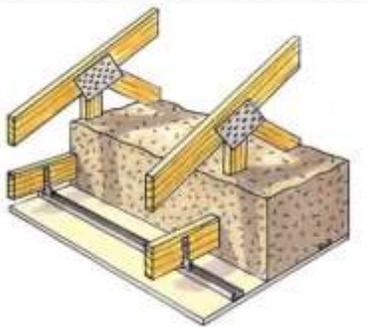
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -83 kg CO<sub>2</sub>eq**  
**Coût Énergie grise : 62 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 419

T.01

## Isolation des combles non praticables



1. Entrants de fermettes
2. Chènevotte déversée ( $40\text{ cm}$ )  
*Épais. supplémentaire pour passif : 13 cm*
3. Rail (métallique) support de plafond
4. Plafond existant en plaque de plâtre

**U = 0.14 W/m².K** (R= 7.34 m²K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 10%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 5 Wh/m²K (Faible)
- CTI séquentielle : 15 Wh/m²K (Faible)

**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -55 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 10 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 420

T.02

## Isolation des combles praticables



Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -96 kg CO<sub>2</sub>eq  
Coût Énergie grise : 93 kWh/m<sup>2</sup>

1. Panneaux de bois perspirant (≈ 2 cm)
2. Poutre en « I »
3. Chênevotte déversée (40 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 10 cm*
4. Lambourdes support plafond
5. Membrane assurant l'étanchéité à l'air et la régulation de la vapeur d'eau
6. Plaque de plâtre
7. Passage technique
8. Plafond en lambris de bois

**U = 0.12 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 8.01 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 6%

**Inertie :**

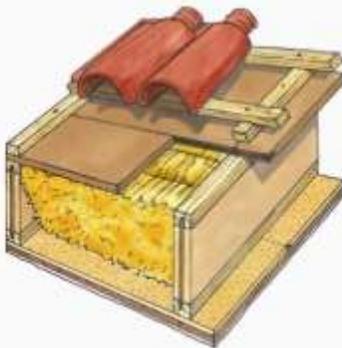
- CTI quotidienne : 9 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)
- CTI séquentielle : 21 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 421

T.03

## Isolation entre les éléments de charpente



Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -64 kg CO<sub>2</sub>eq  
Coût Énergie grise : 150 kWh/m<sup>2</sup>

1. Couverture en tuiles terre cuite
2. Lattage et contre lattage (4 cm minimum)
3. Panneaux pare pluie en feutre de bois (≈2 cm)
4. Botte de paille (≈ 35 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 9 cm*
5. Chevron porteur (avec âme isolée)
6. Panneaux contreventant type OSB
7. Panneau de terre + Enduit terre

**Up = 0.12 W/m<sup>2</sup>.K** (R= 8.43 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 6%

**Inertie :**

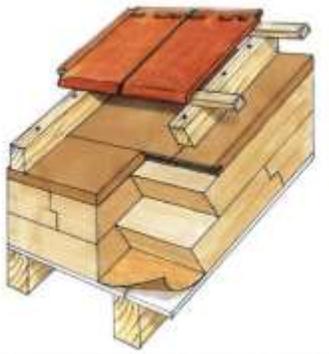
- CTI quotidienne : 15 Wh/m<sup>2</sup>K (Forte)
- CTI séquentielle : 29 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 422

T.04

## Isolation au dessus des chevrons



1. Couverture en tuiles terre cuite
2. Lattage et contre lattage (8 cm minimum)
3. Panneaux pare pluie en feutre de bois ( $\approx 2.2$  cm)
4. Panneaux en feutre de bois (2 x 14 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 10 cm*
5. Membrane assurant l'étanchéité à l'air et la régulation de vapeur d'eau
6. Plaque de plâtre
7. Chevrons

$U = 0.13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 7.44 \text{ m}^2\text{K/W}$ )

Perte dues aux Ponts thermiques : 3%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 7 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)
- CTI séquentielle : 16 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

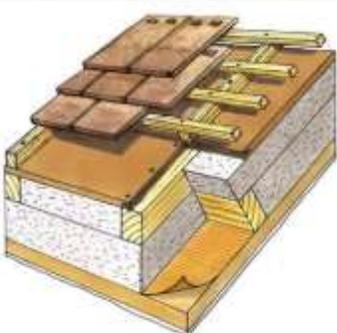
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -44 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 234 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 423

T.05

## Isolation par panneaux ou rouleaux



1. Couverture en tuiles terre cuite
2. Lattage et contre lattage (4 cm minimum)
3. Panneaux pare pluie en feutre de bois ( $\approx 2$  cm)
4. Chevrons et contre chevrons
5. Isolant texturé type coton recyclé... (10+15 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 9 cm*
6. Membrane assurant l'étanchéité à l'air et la régulation de vapeur d'eau
7. Panneau feutre de bois ( $\approx 3,5$  cm)
8. Enduit

$U = 0.13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 7.73 \text{ m}^2\text{K/W}$ )

Perte dues aux Ponts thermiques : 9%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 7 Wh/m<sup>2</sup>K (Moyenne)
- CTI séquentielle : 12 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

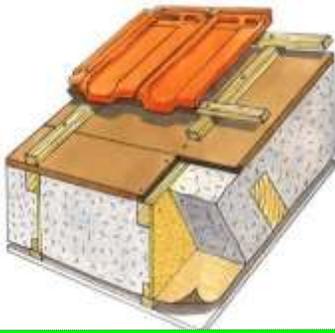
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -20 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 185 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 424

T.06

## Isolation par insufflation



1. Couverture en tuiles terre cuite
2. Lattage et contre lattage (4 cm minimum)
3. Panneaux pare pluie en feutre de bois (≈ 3.5 cm)
4. Chevrons sur pannes
5. Jous de coffres en panneaux type OSB
6. Ouate de cellulose insufflée (34 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 7 cm*
7. Membrane assurant l'étanchéité à l'air et la régulation de vapeur d'eau
8. Plaque de plâtre

$U = 0.12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (R= 8.5 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 14%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 6 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)
- CTI séquentielle : 10 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

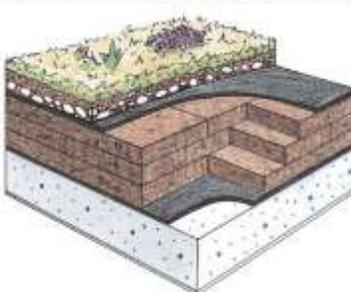
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -34 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 167 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 425

T.07

## Isolation de toiture terrasse en béton



1. Terre, substrat végétal...
2. Drainage et membrane d'étanchéité ( base : EPDM )
3. Panneaux de liège expansé (3 x 10 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 8 cm*
4. Membrane pare vapeur spécifique
5. Dalle béton
6. Plafond en plâtre traditionnel

$U = 0.13 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (R= 7.89 m<sup>2</sup>K/W)

Perte dues aux Ponts thermiques : 0%

**Inertie :**

- CTI quotidienne : 25 Wh/m<sup>2</sup>K (Très Forte)
- CTI séquentielle : 128 Wh/m<sup>2</sup>K (Très Forte)

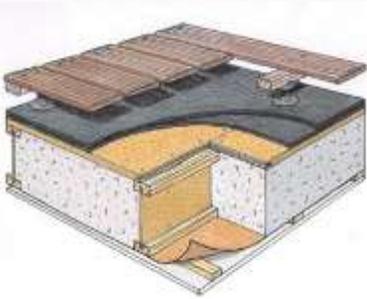
**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : 33 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 354 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)

➤ 426

T.08

## Isolation de toiture terrasse en bois



1. Terrasse bois (lames ajourées sur lambourdes)
2. Complexe d'étanchéité (base : EPDM)
3. Panneaux de bois type OSB
4. Poutres en « I »
5. Ouate de cellulose insufflée (35 cm)  
*Épais. supplémentaire pour passif : 6 cm*
6. Membrane assurant l'étanchéité à l'air et la régulation (évolutive) de vapeur d'eau
7. Plaque de plâtre sur liteaux

$U = 0.12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $R = 8.53 \text{ m}^2\text{K/W}$ )  
Perte dues aux Ponts thermiques : 6%

### Inertie :

- CTI quotidienne : 6 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)
- CTI séquentielle : 10 Wh/m<sup>2</sup>K (Faible)

**Bilan CO<sub>2</sub> du m<sup>2</sup> de paroi : -72 kg CO<sub>2</sub> eq**  
**Coût Énergie grise : 191 kWh/m<sup>2</sup>**

\* Calcul CO<sub>2</sub> et EG d'après la base de données Baubook (Voir « l'isolation thermique écologique »)



## Energie grise : réaliser les ordres de grandeur

La moyenne "énergie grise" des solutions constructives pour le neuf est de :

**183 kWh /m<sup>2</sup> pour les sols**  
**161.6 kWh/m<sup>2</sup> pour les murs**  
**184 kWh/m<sup>2</sup> pour les rampants**

Rapportées à une maison individuelle R+1 de 12 x 7.5 m (Shab 105 m<sup>2</sup>), les parois d'enveloppe ont une énergie grise moyenne de 456 kWhép/m<sup>2</sup> Shon.

Sur 30 ans, cela donne environ **15 kWh/m<sup>2</sup>.an**, (9,4 sur 50 ans)  
... à comparer aux 50 du label BBC

Note. : Ce calcul rapide, présenté pour réaliser les "ordres de grandeurs" nécessite des précisions :

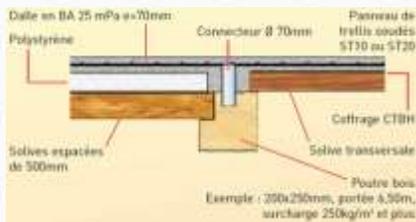
- n'est estimé ici que le coût fabrication matériau des parois de l'enveloppe. L'énergie grise de l'ensemble du bâtiment est en général de 40 à 70% supérieure ;
- nous partons de solutions plutôt optimisées au niveau environnemental, en construction standard, on est aisément à un coût EG de 1.5 à 2 fois supérieur.

➤ 428

## Parois. ...Suite et fin.

## Parois. ...Suite et fin.

Penser aux planchers mixtes "bois béton"





Mur de refend ou de séparation en pisé

## Parois. ...Suite et fin.

Penser aux refends et doublages lourds



Pierre de Vers / Ponds du Gard

➤ 431



Enduits en terre crue ou chaux sur différents supports: Parpaing, fibre de bois, paille, etc...

## Parois. ...Suite et fin.

Penser aux refends et doublages lourds



Cloisons en briques de terre crue comprimée (BTC)

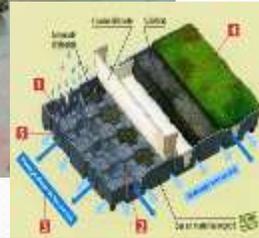
➤ 432

## Parois. ...Suite et fin.

Penser aux toitures végétalisées

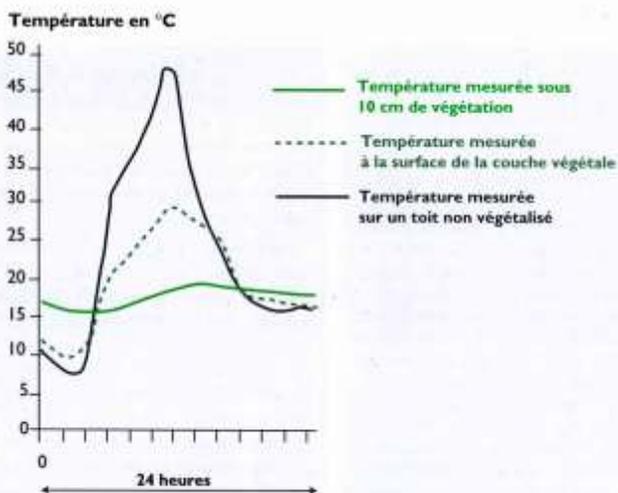


La végétalisation des toits dans les grandes villes (ici à Paris), en contribuant au renforcement des espaces verts, permet de réduire l'effet d'îlot thermique urbain. © Soprema.



## Parois. ...Suite et fin.

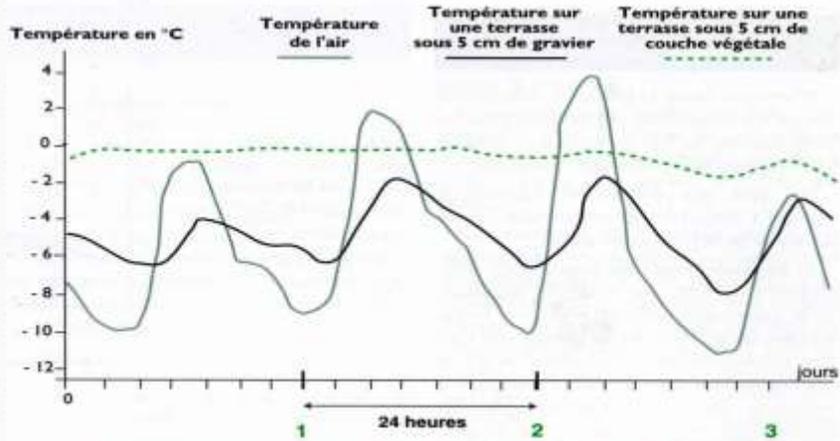
Penser aux toitures végétalisées



125. Exemples de mesures effectuées par W. Köhl sur une journée chaude, en été, de températures prises sur deux terrasses, l'une végétalisée, l'autre non végétalisée.

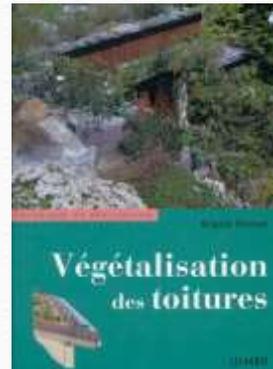
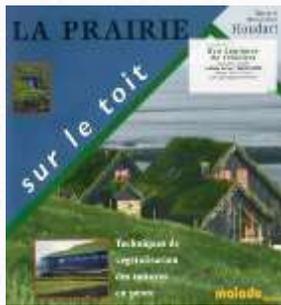
## Parois. ...Suite et fin.

### Penser aux toitures végétalisées



134. Exemples de relevés (effectués par W. Kolb) sur trois journées, en hiver, de températures prises sur deux terrasses, l'une végétalisée, l'autre couverte de gravier.

### Toitures végétalisées





## Caractéristiques des matériaux retenues pour calculs des diapos 334/335 et 343/344.

	Bilan CO2 kgCO2eq/kg	Energie grise kWh/kg	Densité kg/m3	Lambda W/mK
Chênevotte brute (vrac)	-1,25	0,24	110	0,050
Panneaux de liège expansé	-1,23	1,97	110	0,040
Bottes de paille. Flux thermique perpend	-1,25	0,24	90	0,047
Panneaux fibres de bois / haute densité	-0,58	3,81	160	0,040
Ouate de cellulose vrac / haute densité	-0,91	1,95	55	0,040
Fibre de bois semi rigide	-0,18	5,42	40	0,040
Laine de chanvre	-0,13	8,64	30	0,040
Laine de mouton	0,04	4,08	20	0,040
Laine de coton recyclé (Métisse®)	0,36	10,56	25	0,040
Laine de verre	2,26	13,83	25	0,036
Polystyrène expansé	3,45	27,36	17	0,035
Panneau de silicate de calcium	0,47	4,77	115	0,050
Polyuréthane	4,04	28,33	30	0,027
Laines de roche / haude densité	1,64	6,47	140	0,040

*Si la base IBO a été choisie pour de nombreuses raisons nous rassurant sur sa fiabilité et son objectivité, on peut néanmoins toujours en douter. Par exemple, on y voit un différentiel entre laines de verre et de roche inverse de celui repéré en France. Est-ce parce qu'en Autriche la filière LdR est plus forte ??*

A suivre...

« Bilan CO2 » et « Énergie grise » renseignés d'après base de données IBO – Autriche  
 « Chênevotte » renseignée par analogie avec « botte de paille » ; « Laine de coton recyclé » par analogie avec « laine de lin ». Définition retenue pour énergie grise : Énergie non renouvelable pour phase « fabrication matériau »

## Comportem.t à la vapeur d'eau - Différentes unités

Le comportement à la vapeur d'eau est très majoritairement exprimé dans le bâtiment par les valeurs  $\mu$  et  $S_d$ . Néanmoins, d'autres valeurs existent. Avec des valeurs et unités plus complexes, donc plus sujettes à erreurs, elles sont généralement cantonnées au milieu scientifique... mais également pour la France par le CSTB et l'ACERMI.

- $\pi$  (qq. fois  $\delta$ ). **Perméabilité\***, en g/m.h.mmHg, kg/m.s.Pa, ou mg/m.h.Pa
- **Wp** (qq. fois  $W$  ou  $P$ ). **Perméance\***, en g/m<sup>2</sup>.h.mmHg, kg/m<sup>2</sup>.s.Pa, ou mg/m<sup>2</sup>.h.Pa.  
avec **Wp= $\pi/d$**  ( $d$  : épaisseur en mètre).
- **Rd** (qq. fois  $Z$ ). **Résistance\***, en m<sup>2</sup>.h.mmHg/g, m<sup>2</sup>.s.Pa/kg ou m<sup>2</sup>.h.Pa/mg,  
avec **Rd=1/Wp**

**Pour les conversions : si l'unité de base utilisée est le :**

- g/m.h.mmHg (gramme par mètre heure, mm de mercure) :  $\mu = 0.09/\pi$      $S_d = 0.09/Wp$      $S_d = Rd \times 0.09$
- kg/m.s.Pa (kg par m sec. Pascal) :  $\mu = (1.88 \times 10^{-10})/\pi$      $S_d = (1.88 \times 10^{-10})/Wp$      $S_d = Rd \times 1.88 \times 10^{-10}$
- mg/m.h.Pa (mg par mètre heure Pascal) :  $\mu = 0.675/\pi$      $S_d = 0.675/Wp$      $S_d = Rd \times 0.675$