

# Agromatériaux pour le bâtiment: caractérisation et comportement hygrothermique multi-échelle



Chadi MAALOUF

Maître de conférences  
I.U.T de Reims-Châlons-  
Charlevilles

GDR Fibmat, Charleville Mézières, le 5 novembre 2025



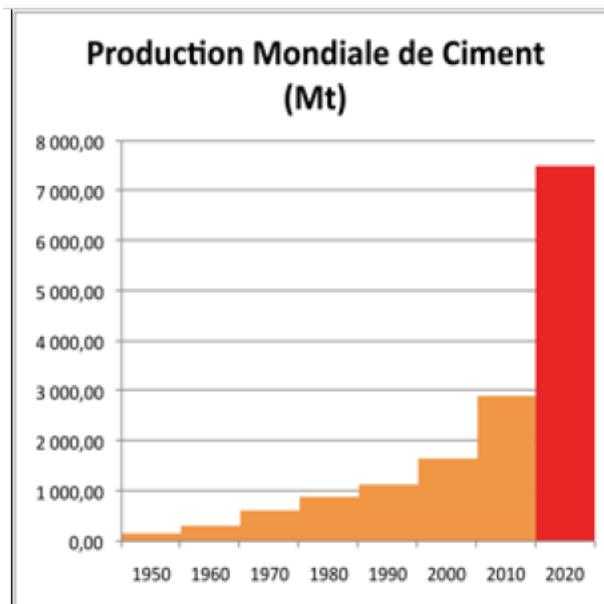
# Objectifs

Donner un aperçu de l'utilisation des agromatériaux dans la construction. Comprendre leurs principales propriétés hygrothermiques et leurs avantages et inconvénients avec une approche allant du matériau au bâtiment .

# Problématique

Le béton est, après l'eau, la matière la plus consommée au monde

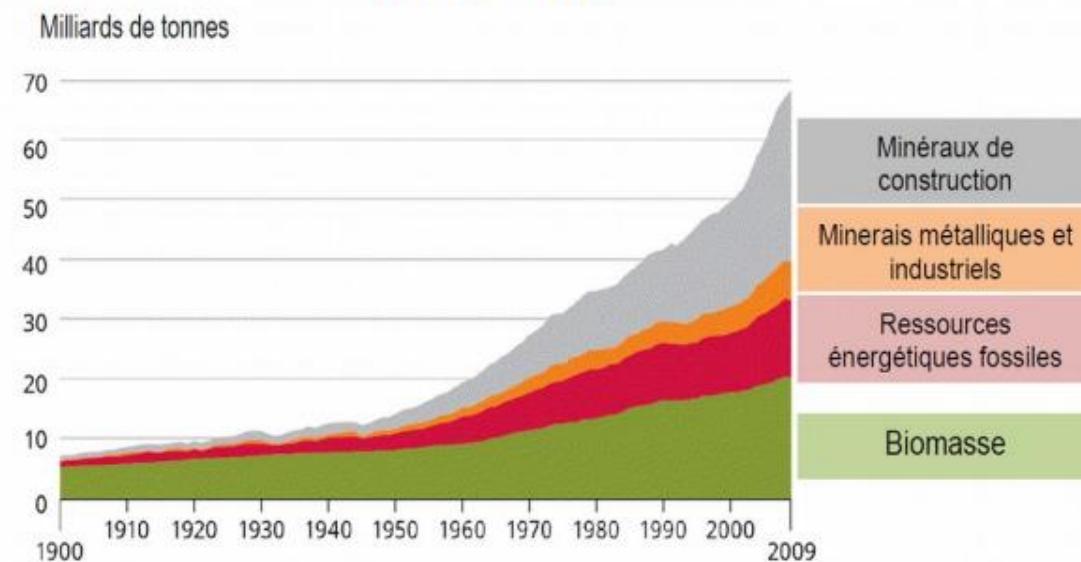
La production du ciment émet 5 à 7% du CO<sub>2</sub> éq. produit dans le monde



Au niveau mondial, en un siècle, l'extraction de matériaux de construction a été multipliée par 34 alors que celle des énergies fossiles a été multipliée par 12.

La pénurie de sable est annoncée en même temps que celle des énergies fossiles

**Figure 1 - Extraction mondiale de matières premières entre 1900 et 2009**



Source : AEE, 2015

## En France

# Problématique

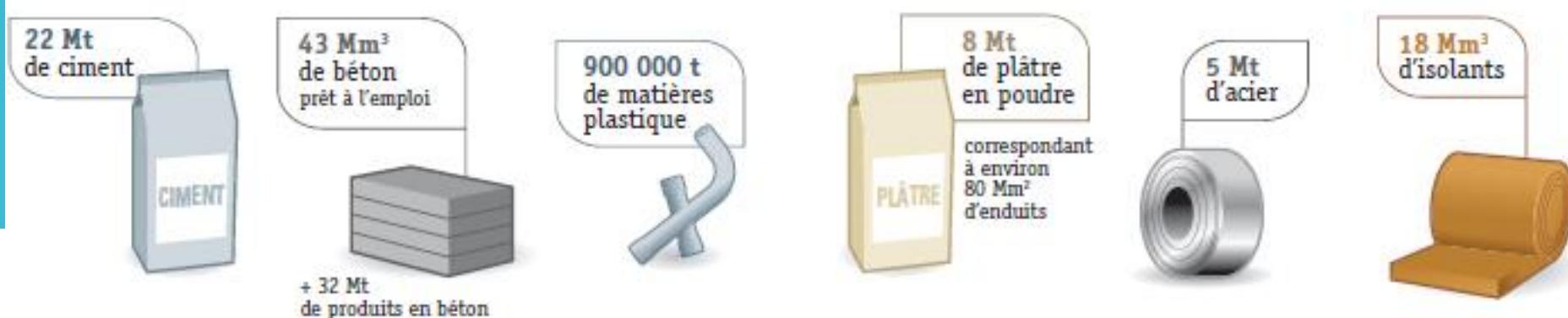
le BTP est le **principal consommateur** de matières premières non renouvelables en France.

En 2018 les 381 millions de tonnes de minéraux pour la construction (calcaire, argile, gypse etc.) ayant été extraits représentent environ la moitié des matières premières extraites du territoire français.

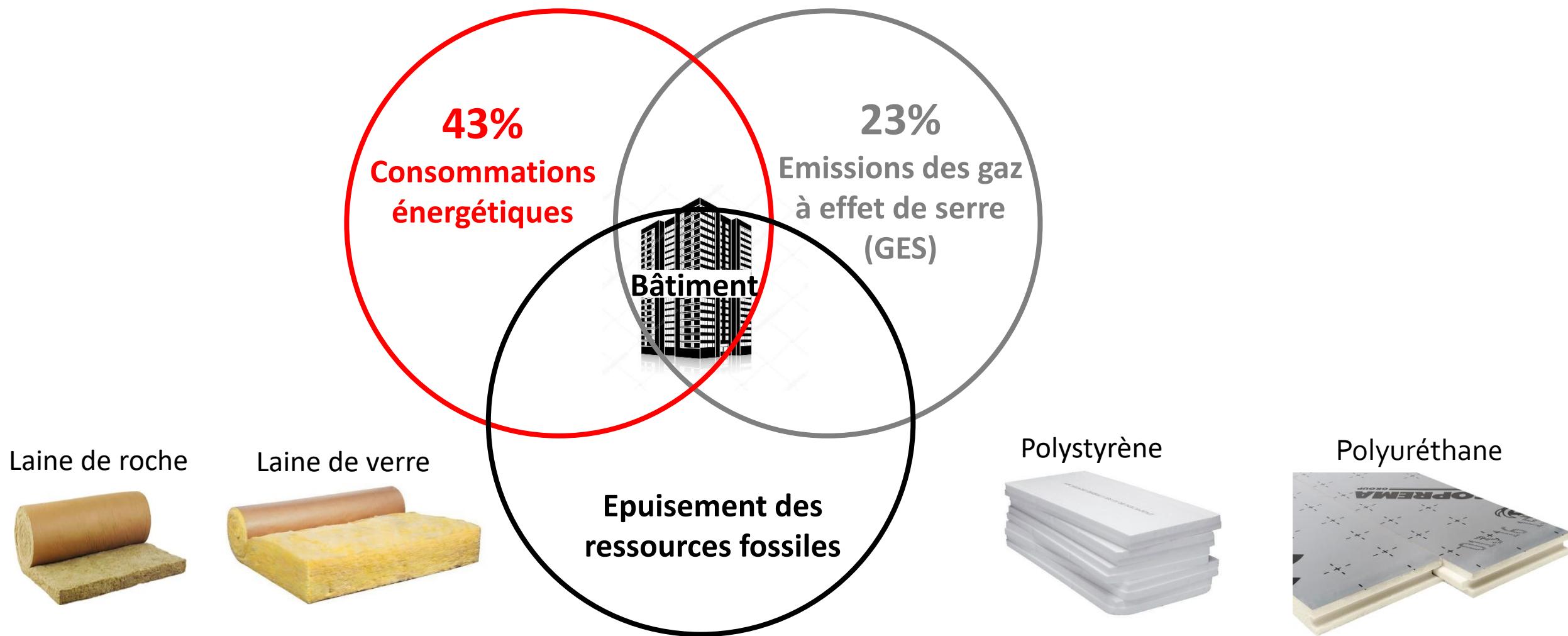
*stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr*

Ces minéraux sont utilisés :

- Tels quels en tant que sable, granulats, remblai etc.
- Après transformation pour fabriquer des matériaux de construction élaborés :



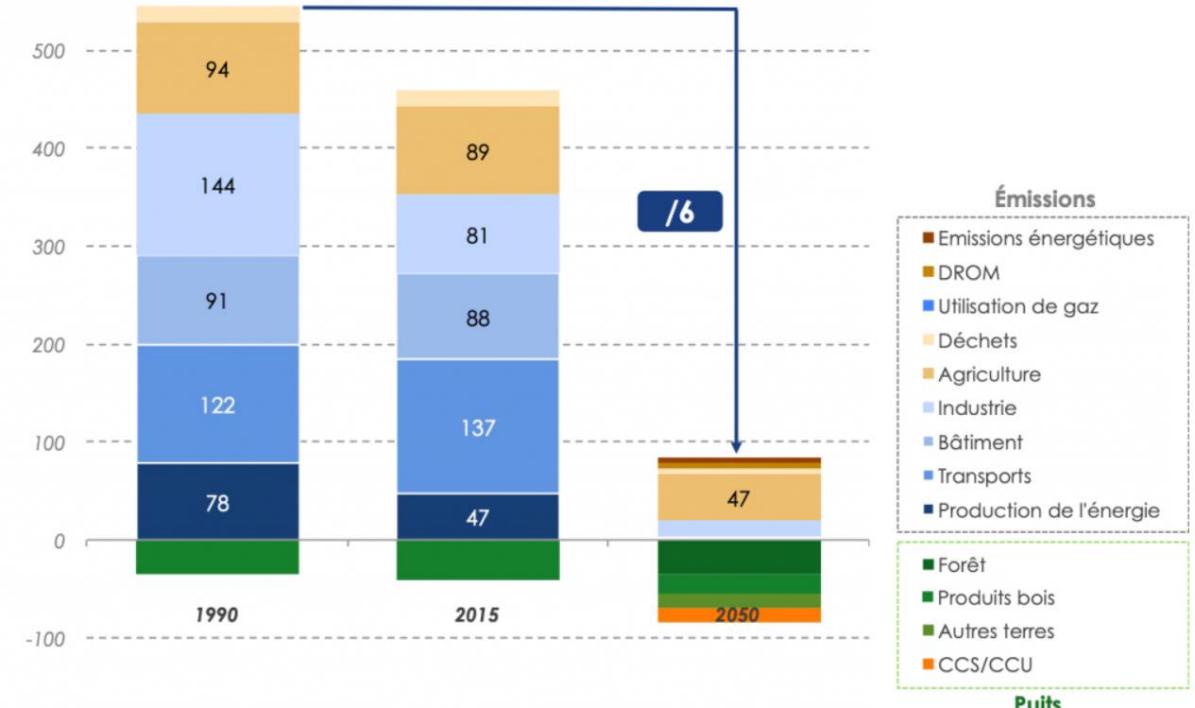
# Problématique



# Enjeux actuels

évolution des émissions nettes de gaz à effet de serre  
MtCO<sub>2</sub>e

## SNBC: neutralité Carbone en 2050



Source : Évolution des émissions de la France entre 1990 et 2050 pour atteindre la neutralité carbone, données du Projet de Stratégie Nationale Bas-Carbone, version décembre 2018



**Solution : S'orienter vers les matériaux biosourcés dans l'isolation thermique des bâtiments**

## Exemple: les bétons biosourcés

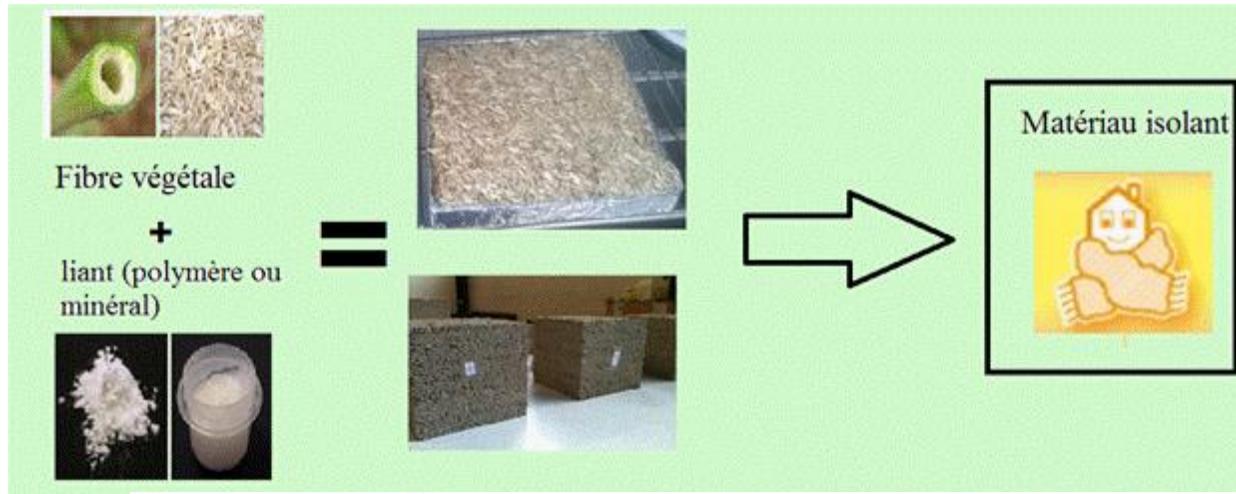
### Fibre végétale

chanvre, typha  
miscanthus, lin....

### + Liant

chaux, ciment  
Amidon...

### + Eau



Source: Novabiom



Chanvre-  
Eco

## Mise en oeuvre



Projeté ou banché

Briques

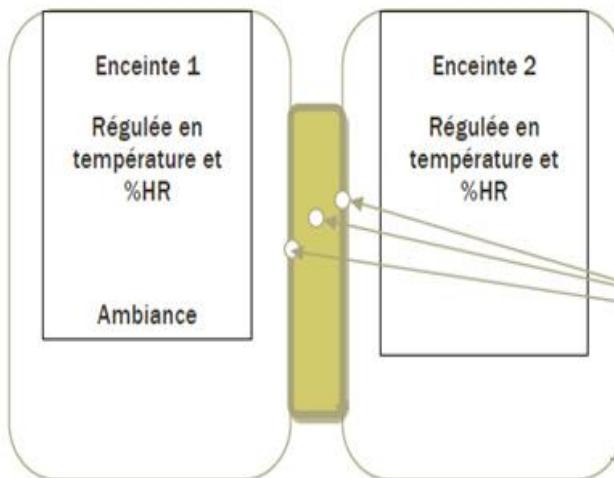
## Etude multi-échelle

Echelle du matériau



Caractérisation physique

Echelle du mur



Paroi étudiée  
Analyse du comportement hygrothermique

Echelle du local



Confort hygrothermique et consommation énergétique

# Conduction de la chaleur

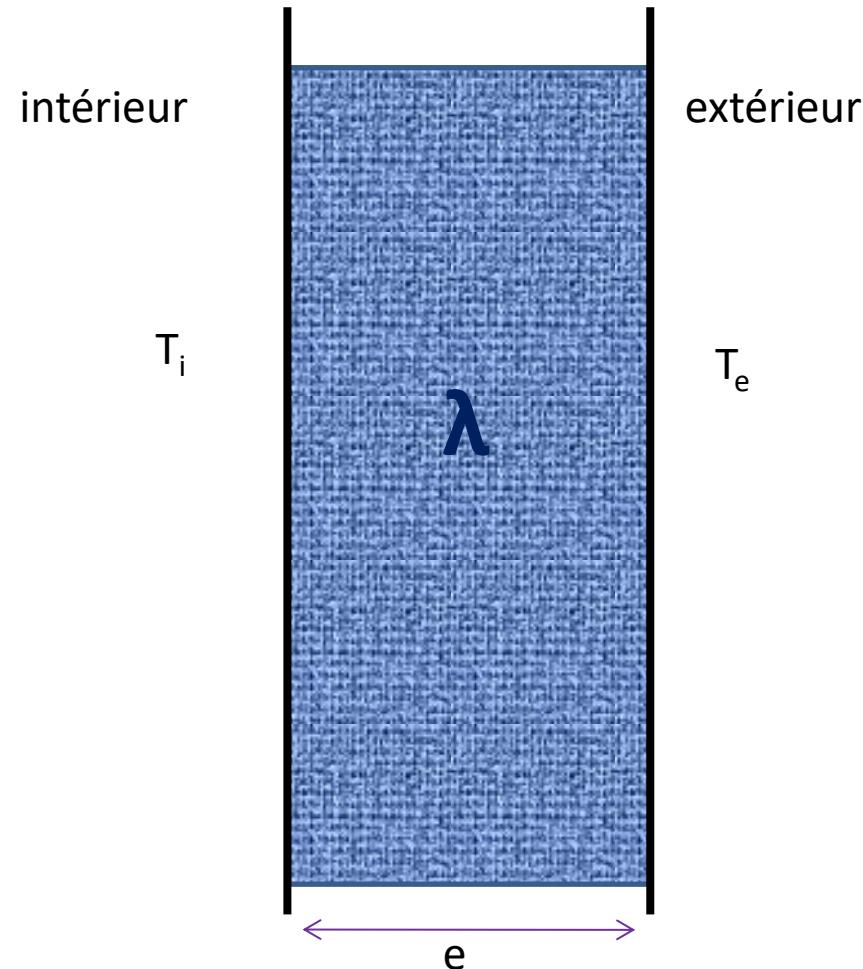
- Cas d'un mur simple couche

- On note  $\varphi$  la densité de flux thermique (exprimée en  $\text{W/m}^2$ ), c'est-à-dire l'énergie perdue par  $\text{m}^2$  de surface.
- **La loi de Fourier** définit le flux tel que :

$$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

- Le Flux thermique, noté  $\Phi$  en ( $\text{W}$ ) est défini tel que :

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



## Conduction de la chaleur

- **Le flux thermique est constant** pendant la propagation de la chaleur dans un mur.
- La densité de flux thermique est donc donnée par :

$$\varphi = -\lambda \frac{T_e - T_i}{e} = \frac{T_i - T_e}{e/\lambda}$$

- Le flux thermique est lui donné par :

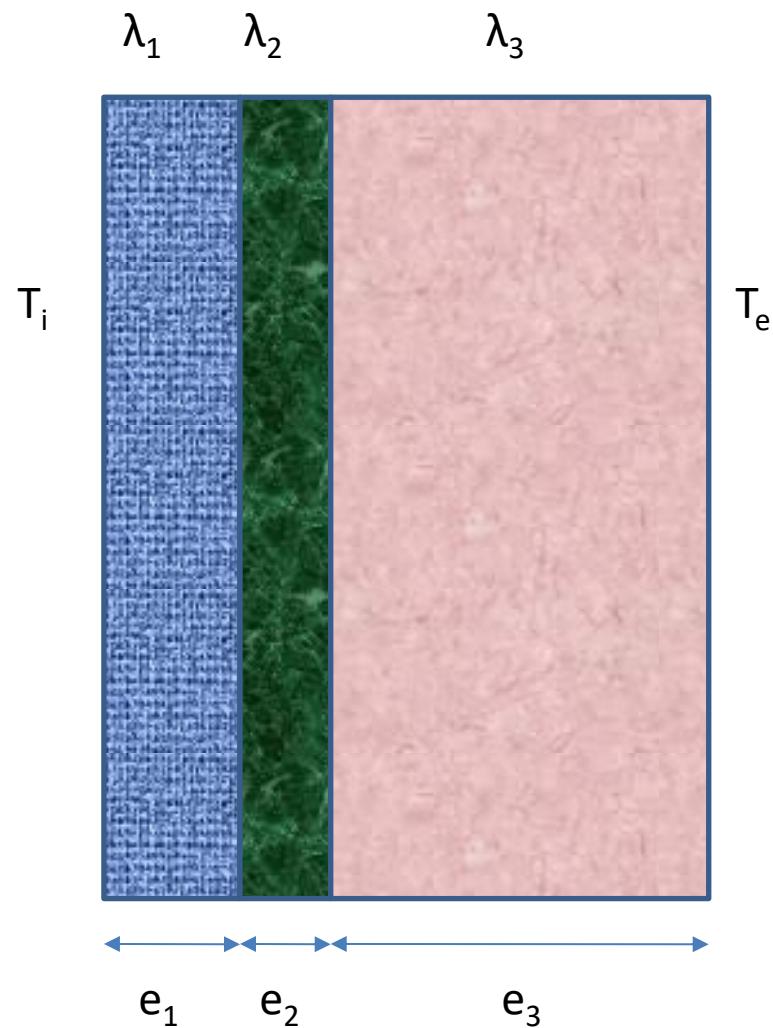
$$\Phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{T_e - T_i}{e} = S \frac{T_i - T_e}{e/\lambda}$$

- Ou  $R_{th}=e/\lambda$  est appelé résistance thermique par unité de surface en ( $m^2 K/W$ ). Un R élevé signifie que le matériau offre une meilleure isolation.

## Conduction de la chaleur: paroi multicouche

- Dans le cas où un mur est composé de plusieurs planches de matériaux différents de conductivité thermique différentes et d'épaisseur différentes, la densité de flux thermique est donnée par :

$$\varphi = \frac{T_i - T_e}{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{\lambda_i}}$$



## Conduction de la chaleur: paroi multicouche

- Dans ce cas, la **résistance thermique par unité de surface** est donnée par :

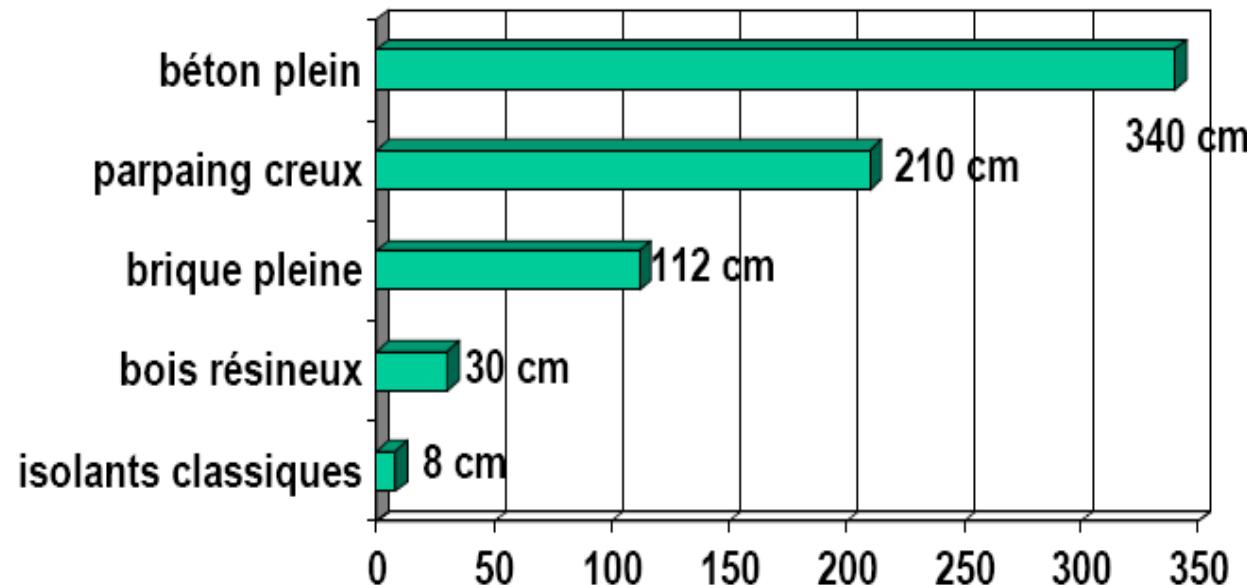
$$R_{th} = \sum_{i=1}^N \frac{e_i}{\lambda_i}$$

- On peut définir **le coefficient de transmission thermique surfacique** (exprimé en  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) par :

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

## Pourquoi isoler?

- Pour obtenir la même isolation, il faut :



Pour une résistance thermique surfacique de 2,2 m<sup>2</sup>·K/W

Dans la RE2020 Les murs extérieurs doivent avoir une résistance thermique élevée (R), généralement supérieure à 4 m<sup>2</sup>·K/W. La toiture doit également avoir une résistance thermique élevée, souvent supérieure à 8 m<sup>2</sup>·K/W, pour minimiser les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été.

## exemple pour les matériaux du Génie civil

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

Pour les bétons végétaux la conductivité thermique varie entre 0,05 et 0,6 selon le liant et le dosage en liant

Conductivité thermique d'un matériau - Energie Plus Le Site

## exemple pour les bétons de chanvre

---

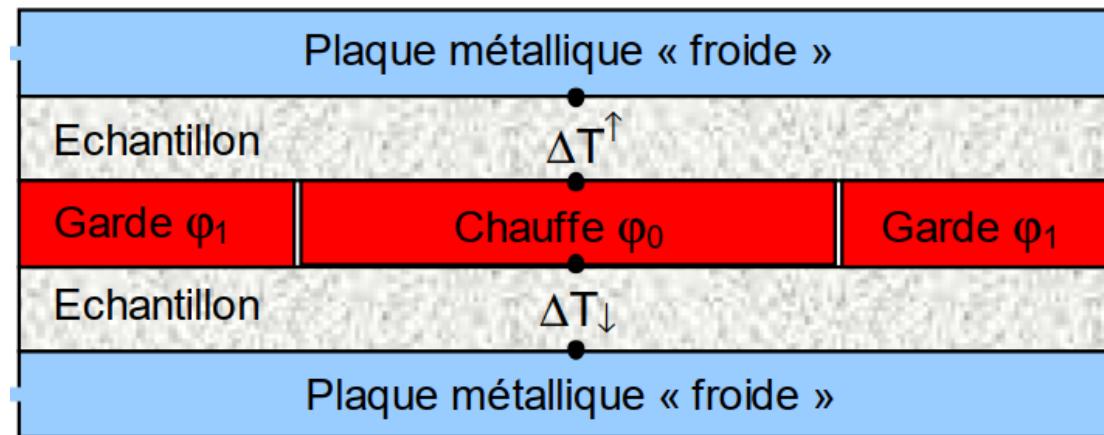
- Mélange gras : 10% de chènevotte en masse
- Mélange maigre : 50% de chènevotte en masse

	Chanvre [kg]	Liant [kg]	Eau [L]	Conductivité [W:mK]	Module d'élasticité [MPa]	Résistance à la compression [MPa]	Masse volumique sèche [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Enduit</b>	100	800	500	0.17	25	0.4	800
<b>Mur</b>		220	350	0.1	20	0.3	420
<b>Sol</b>		275	500	0.1	20	0.3	500
<b>Toit</b>		100	100	0.06	3	0.1	250
<i>Pâte de chaux</i>		1000	500	0.4	4000	10	1200
<i>Bois</i>				0.15	10 000	20	400 à 800
<i>Béton classique</i>	<i>Granulats :</i> <i>1700</i>	<i>Ciment:</i> <i>350</i>	<i>180</i>	<i>1</i>	<i>20 000</i>	<i>30</i>	<i>2500</i> <b>26</b>

# Mesure de la conductivité thermique: méthode la plaque chaude gardée

*Guarded Hot Plate Method*

Un flux de chaleur est généré, par effet joule, au centre d'une plaque chaude gardée. Le pourtour de la zone de chauffage est entouré d'une résistance électrique : la garde. Une régulation maintient un écart de température nul entre la garde et la zone de chauffage. Le flux qui traverse une paire d'éprouvettes, placées de part et d'autre de la plaque chaude, est alors unidimensionnel. Deux plaques froides placées contre les faces extérieures des éprouvettes permettent d'imposer leur température.

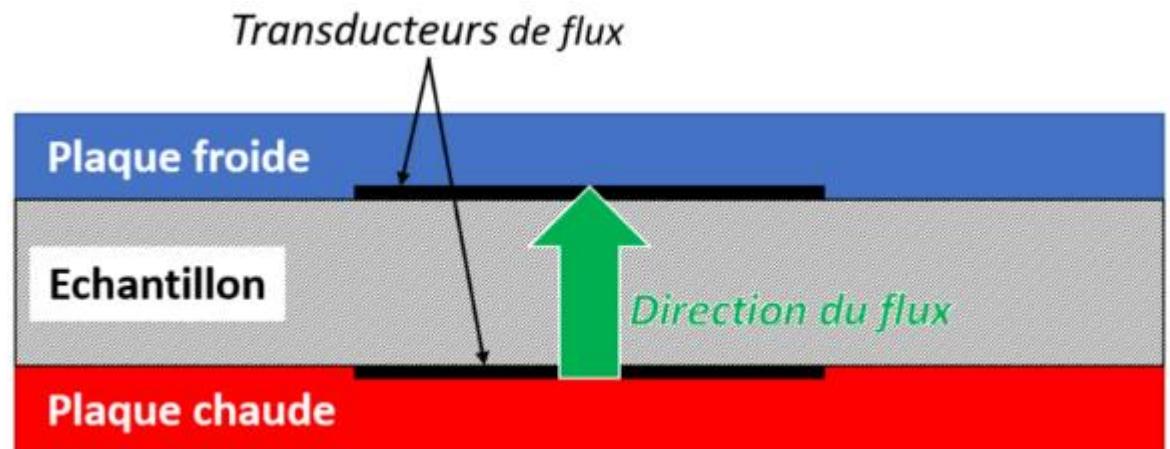


$$\lambda = \frac{e \phi_0}{S (\Delta T_{\downarrow} + \Delta T_{\uparrow})}$$

# Mesure de la conductivité thermique: méthode fluxmétrique

*Heat Flow Meter Method (HFM)*

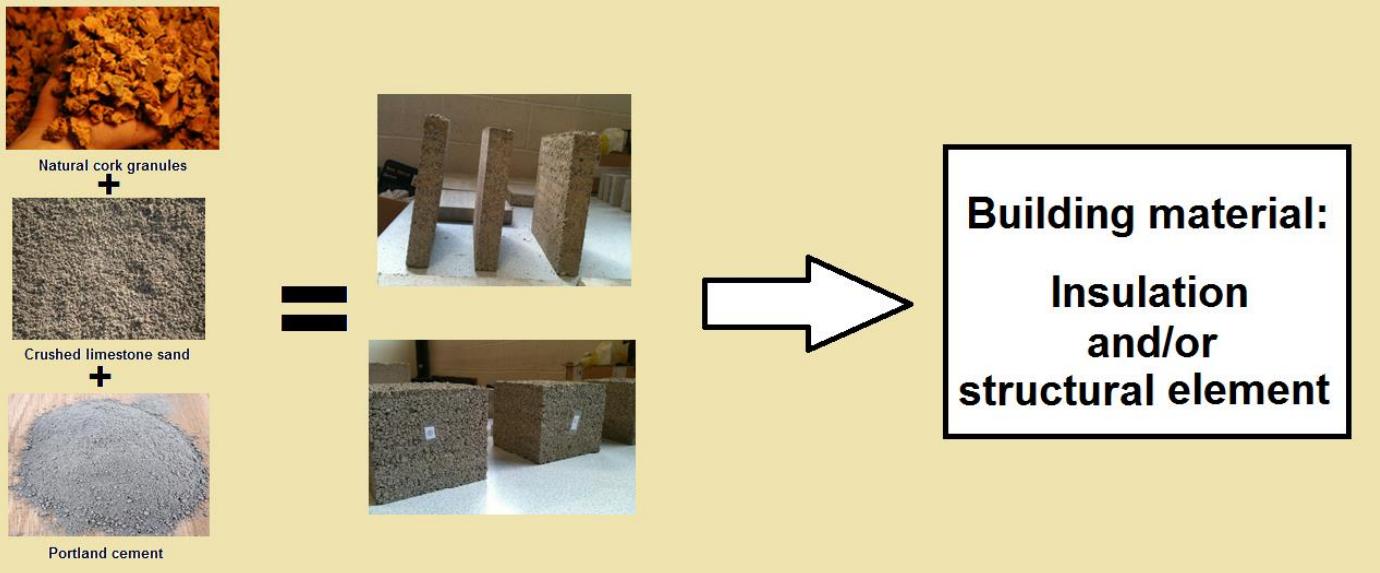
Le principe de cette méthode repose sur la circulation d'un flux thermique au travers de l'échantillon. En effet, l'échantillon à mesurer est insérer entre les deux plaques chaude et froide de l'appareil, au contact. Le gradient de température entre ces deux plaques génère un flux de chaleur qui traverse en régime permanent l'échantillon. Le flux est quantifié de part et d'autre de l'échantillon par des transducteurs de flux.



<https://www.thermoconcept-sarl.com/methodes-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/>

# Mesure de la conductivité thermique: méthode fluxmétrique

*exemple sur un béton de liège*



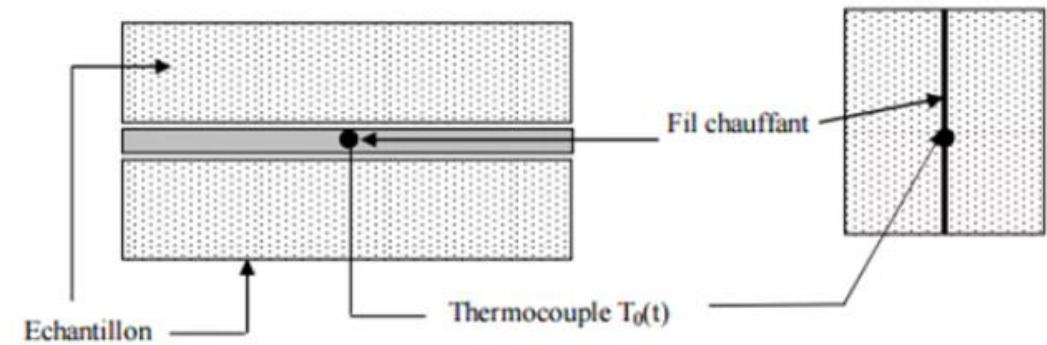
Specimen	Conductivity at 23°C (W/m.K)	Compression strength (MPa)
L75	0,194	0,9
L50	0,349	9,5
L25	0,429	23

Boussetoua, H., Maalouf, C., Lachi, M., Belhamri, A., & Moussa, T. (2017). Mechanical and hygrothermal characterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(4), 456–471. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1397551>

# Mesure de la conductivité thermique: méthode à fil chaud

*Hot Wire Method*

Méthode en régime transitoire. Le principe consiste à placer un élément chauffant qui se présente sous la forme d'un fil entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. Le fil délivre un flux de chaleur sous forme d'échelon afin de produire localement un échauffement de quelques degrés du matériau. Cet échauffement est en règle générale mesuré ponctuellement par thermocouple. C'est l'analyse mathématique de cet échauffement qui permet de déterminer la conductivité thermique.



## Inertie thermique

Les trois types d'inertie thermique:

- ❑ Inertie thermique par transmission
- ❑ Inertie thermique par absorption
- ❑ Inertie thermique par changement de phase

## Inertie thermique

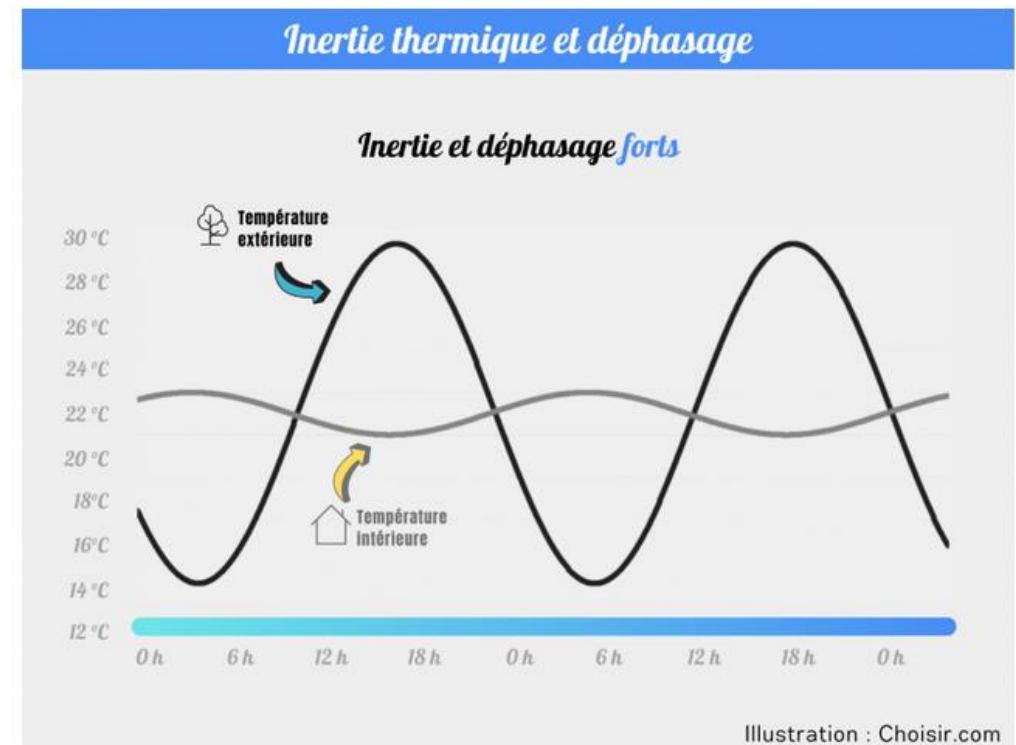
### □ Inertie thermique par transmission

Interaction de la paroi avec les conditions climatiques extérieures.

Elle est caractérisée par la diffusivité thermique  $a$ :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

C'est la vitesse à laquelle le matériau transmet l'énergie thermique d'une face à l'autre d'une même paroi.



### □ Inertie thermique par absorption

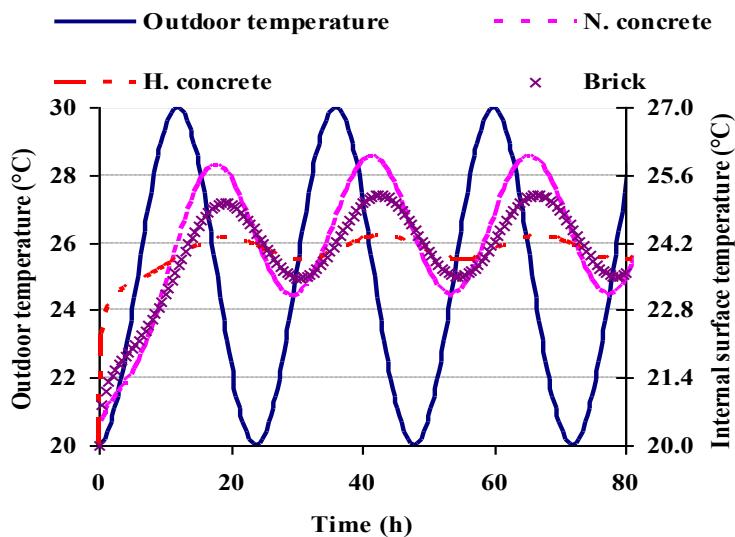
Interaction de la paroi avec les conditions intérieures.

Elle est caractérisée par la effusivité thermique b:

$$b = \sqrt{\lambda \rho C_p}$$

C'est l'aptitude d'un matériau à absorber et à restituer de l'énergie.

## Inertie thermique

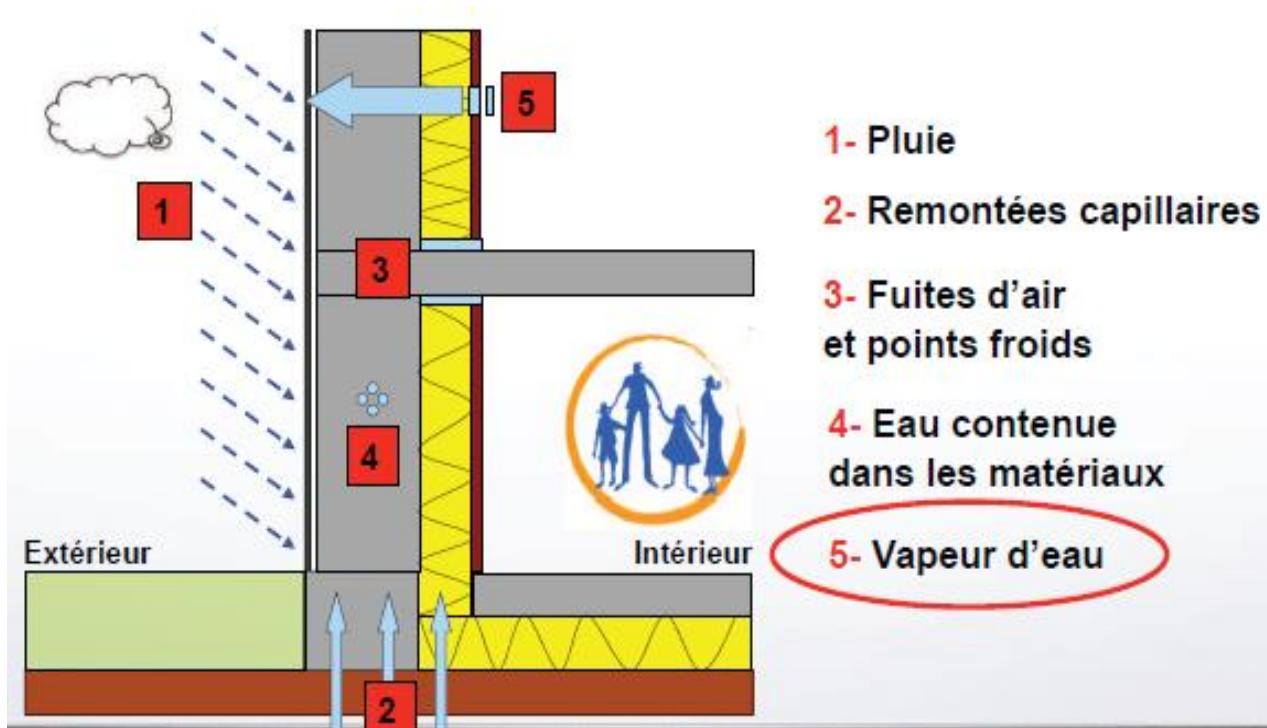


Matériau	Masse volumique	Chaleur spécifique	Conductivité thermique	Diffusivité thermique	Effusivité thermique
	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$
Béton de chanvre (Collet, 2004)	413	1000	0,1057	<b>2,6</b>	<b>206,9</b>
Béton de chanvre (Evrard, 2008)	440	1530	0,1	<b>1,5</b>	<b>267</b>
Béton cellulaire	600	850	0,14	<b>2,7</b>	<b>267,2</b>
Béton C12/25	2200	850	1,60	<b>8,6</b>	<b>1729,7</b>
Brique extrudée	1630	850	0,60	<b>4,3</b>	<b>911,8</b>

Les matériaux à forte inertie par transmission et par absorption ne peuvent pas exister !!!

Maalouf C. et al. (2014). Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France, *Energy and Buildings*, vol. 77, pages 48-57.

# Quelles sont les sources d'humidité?



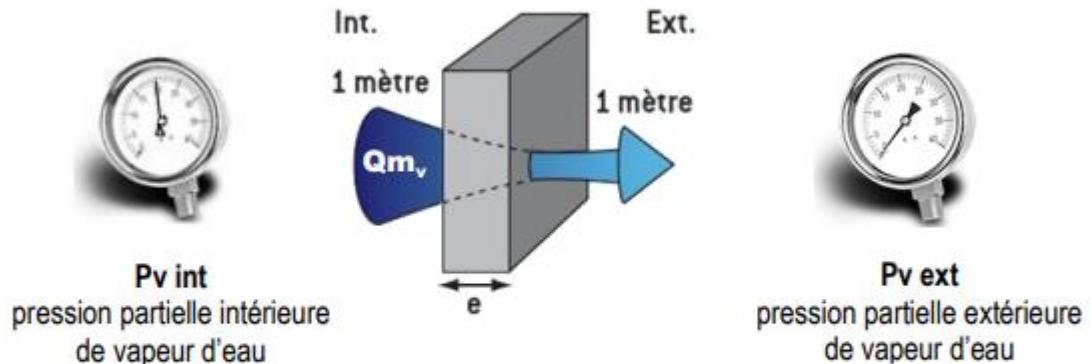
Samuel Courgey,  
Arcanne

Source d'humidité	Production
Personne au repos	40 g/h
Personne en activité modérée	60 g/h
Cuisson	2 kg/jour
Séchage du linge	1,5 kg/jour

Tableau 1 : Production de vapeur d'eau due aux usagers. Source : « Santé et Qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments », Claude-Alain Rouet.

## La diffusion de vapeur dans une paroi

- pour un matériau de perméabilité  $\pi$  (en kg/m.s.Pa) et d'épaisseur  $e$  (m).  
*( $\pi$  ou  $\delta$ )*



$$Qm_v = \frac{(P_{v1} - P_{v2})}{R_d}$$

**En appliquant la Loi de Fick et en supposant la vapeur d'eau comme un gaz parfait**

avec :  $P_{vi}$  (en Pa) : pression partielle de vapeur du milieu i.  
 $Qm_v$  (en  $\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$ ) : débit de vapeur d'eau  
 $R_d$  (en  $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$ ): Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

## La diffusion de vapeur dans une paroi

### Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau ( $\mu$ ) :

La résistance à la diffusion de la vapeur d'eau est la capacité à freiner la migration de la vapeur d'eau. On trouvera cette caractéristique du matériau homogène dans le DTU\* Th-U (réglementation thermique)

*\* (DTU : Document Technique Unifié).*

$$\mu = \frac{\pi_{(\text{air})}}{\pi} \quad (\text{sans unité})$$

Plus le coefficient est faible et plus la vapeur d'eau peut s'évacuer rapidement à travers le matériau.

### Résistance à la diffusion de vapeur d'eau ( $R_d$ ) : dépend de l'épaisseur du matériau

$$R_d = \frac{e}{\pi} = \frac{e \cdot \mu}{\pi_{(\text{air})}} \quad \text{en } (\text{m}^2 \cdot \text{s. Pa})/\text{kg}$$

## La diffusion de vapeur dans une paroi

La perméance est la quantité de vapeur d'eau qui peut traverser une surface de paroi par unité de temps sous une différence de pression donnée.

$$P = \frac{\pi}{e} = \frac{1}{R_d} \text{ en (g/m}^2 \cdot \text{h. mmHg) ou en (kg/m}^2 \cdot \text{s. Pa)}$$

Le coefficient  $S_d$ , exprimé en mètres, représente la résistance du matériau par rapport à celle qui correspondrait à une épaisseur équivalente d'une couche d'air.  $S_d$  est donc défini comme l'épaisseur de la couche d'air ayant une diffusion équivalente en mètre.

$$S_d(m) = \mu \cdot e$$

*Plus la valeur de  $S_d$  est grande, moins le produit laisse passer la vapeur d'eau.*

## La diffusion de vapeur dans une paroi multicouche

- pour l'**ensemble** de la paroi constituée de plusieurs matériaux.

$$Qm_v = \frac{(P_{v \text{ int}} - P_{v \text{ ext}})}{\sum R_d}$$

avec  $\sum R_d = \sum \frac{e_i}{\pi_i}$

Matériaux	M <sub>U</sub>	épaisseur	S <sub>d</sub> (m)	Sources
<b>Air (= référence)</b>	<b>1</b>	<b>1 m</b>	<b>1</b>	<b>NF EN 12524</b>
Plaque de plâtre	4 à 10	1,3 cm	0,05 à 0,13	NF EN 12524
Film pare pluie			< 0,18	NF P21-203 et 204
Enduit à la chaux	6 à 20	2 cm	0,12 à 0,40	Divers (voir note)
Laine de verre	1	40 cm	0,40	NF EN 12524
Produits manufacturés à base de fibres végétales (laine de chanvre, de bois...)	1	40 cm	0,40	NF EN 12524
Enduit au ciment	25 à 80	2 cm	0,50 à 1.60	Divers (voir note)
Panneaux OSB	≈ 150 à 250	0,9 cm	≈ 1,35 à 2,25	Divers (voir note)
Terre cuite	10 à 16	20 cm	2 à 3,2	NF EN 12524
Béton cellulaire	6 à 10	37 cm	2,2 à 3,7	NF EN 12524
Calcaire tendre	25 à 40	40 cm	10 à 16	NF EN 12524
Polystyrène	60 à 150	15 cm	9 à 23	NF EN 12524
Pare vapeur			> 18 m	NF P21-203 et 204
Béton armé	80 à 130	20 cm	16 à 26	NF EN 12524
Film polyéthylène 150 micron			50	NF EN 12524
Bitume	50 000	1cm	500	NF EN 12524
Granit	10 000	40 cm	4000	NF EN 12524
Verre, métaux, faïence	+∞		+∞	NF EN 12524

### Résistance à la vapeur d'eau de divers matériaux

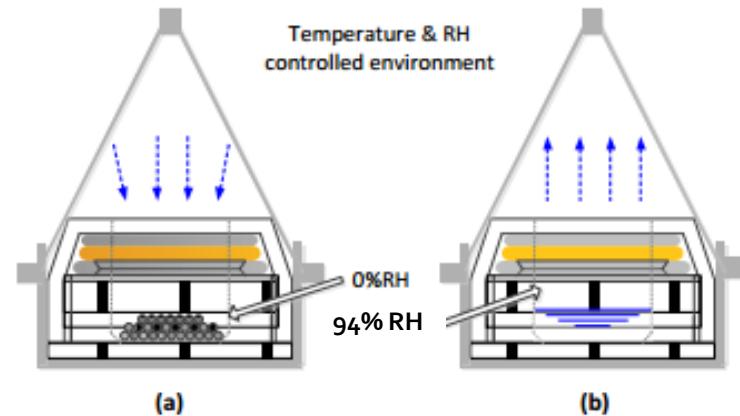
En vert, les matériaux très ouverts à la migration de vapeur d'eau, en orange ceux qui se comportent plus comme des «freins de vapeur», et en rouge ceux qui stoppent quasiment tout déplacement de vapeur d'eau.

Ce tableau montre également que :

- le  $\mu$  varie pour un même matériau (il peut par exemple évoluer en fonction du taux d'humidité),
- pour les membranes, seul le S<sub>d</sub> est renseigné.

## Mesure de la perméabilité à la vapeur

- La perméabilité à la vapeur d'eau  $\delta_m$  ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ) décrit la capacité d'un matériau à transférer l'humidité sous un gradient de pression de vapeur.
- Application de la méthode de la coupelle selon la norme européenne EN ISO 12572:2016.



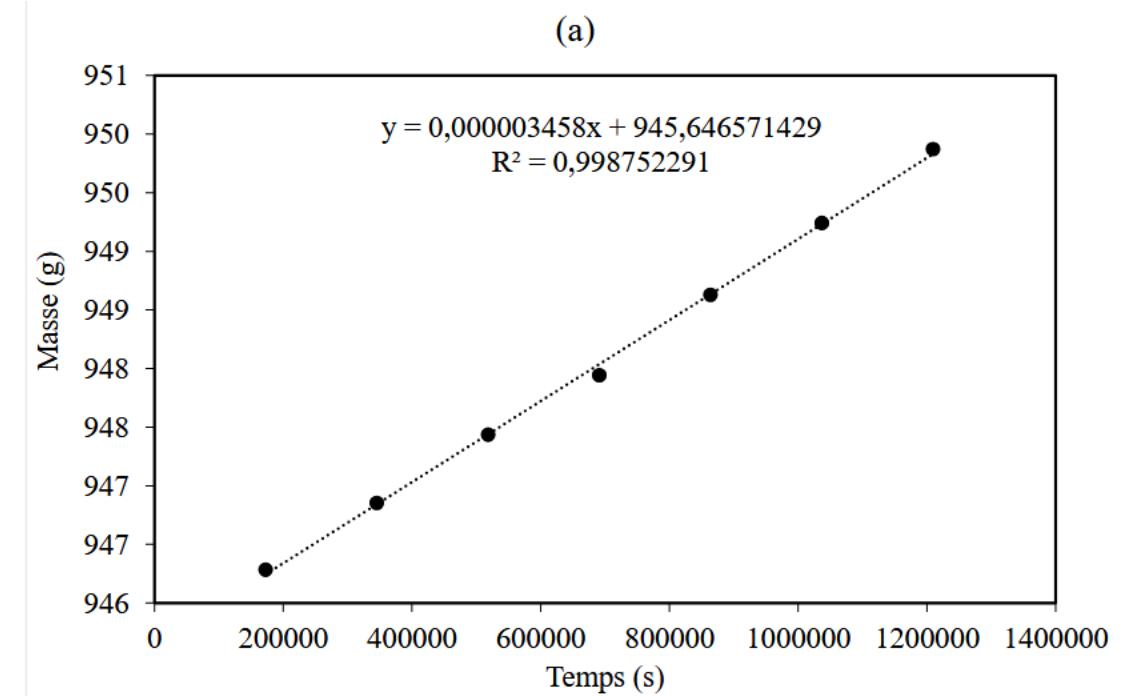
## Mesure de la perméabilité à la vapeur *coupelle sèche sur un composite pulpe de betterave -amidon*



$$g = \frac{G}{A}$$

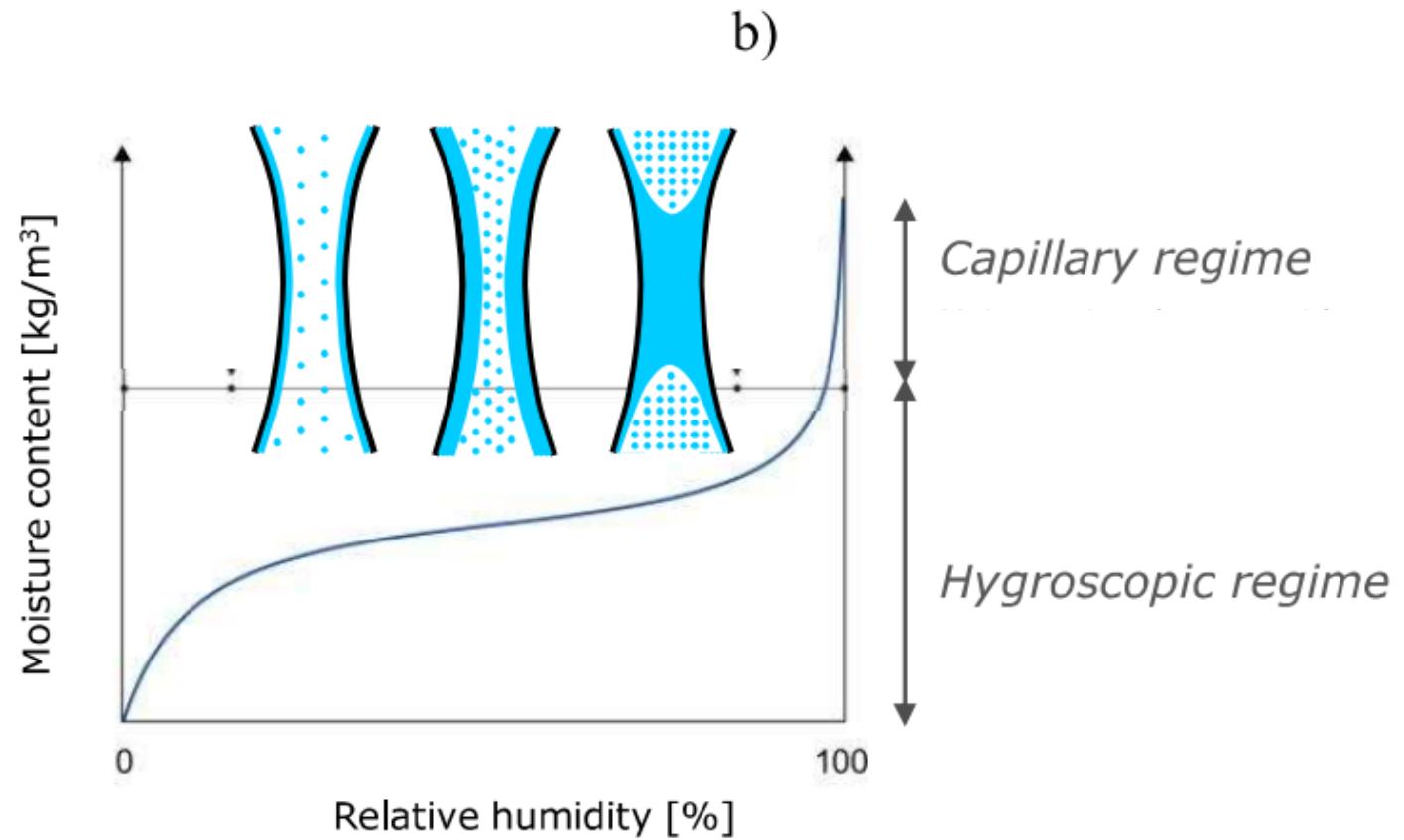
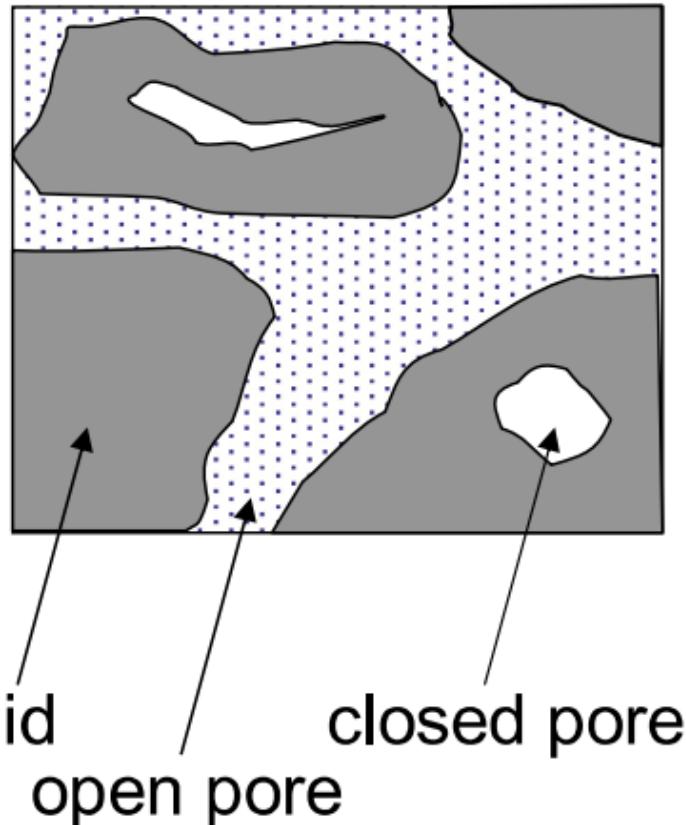
$$W = \frac{G}{A \times \Delta P_v}$$

g la densité de flux de la vapeur g ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 A ( $\text{m}^2$ ) est la surface de l'éprouvette exposée.  
 W= perméance  $P = 1/R_d = \pi/e$  (ou aussi  $\delta/e$ )



<https://theses.fr/2018REIMS019>

# Stockage d'humidité : l'isotherme de sorption



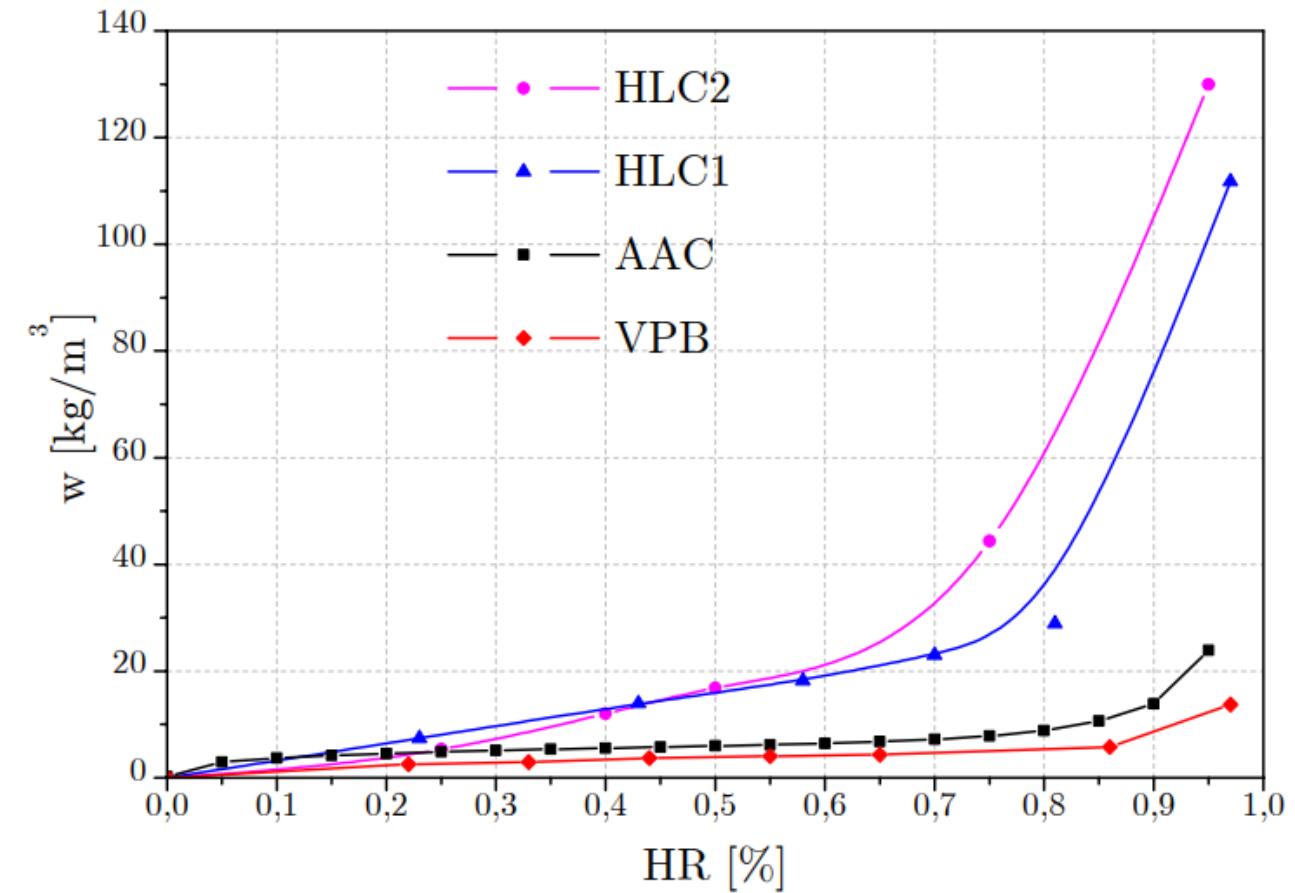
# Stockage d'humidité: l'isotherme de sorption

$$u = \frac{m_m}{m_{dry}} = \frac{m_{moist} - m_{dry}}{m_{dry}}$$

$$w = u \cdot \rho_{dry}$$

$$\theta = u \cdot \rho_{dry} / \rho_{eau}$$

Méthode gravimétrique  
Méthode dynamique



<https://theses.insa-lyon.fr/publication/2008ISAL0067/thesis.pdf>

# Méthode gravimétrique

$$p_v = HR \ p_{\text{sat}}(T)$$

LiBr	LiCl	KCH <sub>3</sub> O	KF	MgCl <sub>2</sub>	KCO <sub>3</sub>
6,4	11,3	22,5	30,9	32,8	43,2
NaBr	CuCl <sub>2</sub>	CoCl <sub>2</sub>	NaCl	KCl	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
57,6	68,5	64,9	75,3	84,3	97,3

Tableau 1 : Valeur de HR (%) en fonction de la nature du sel et de la température.



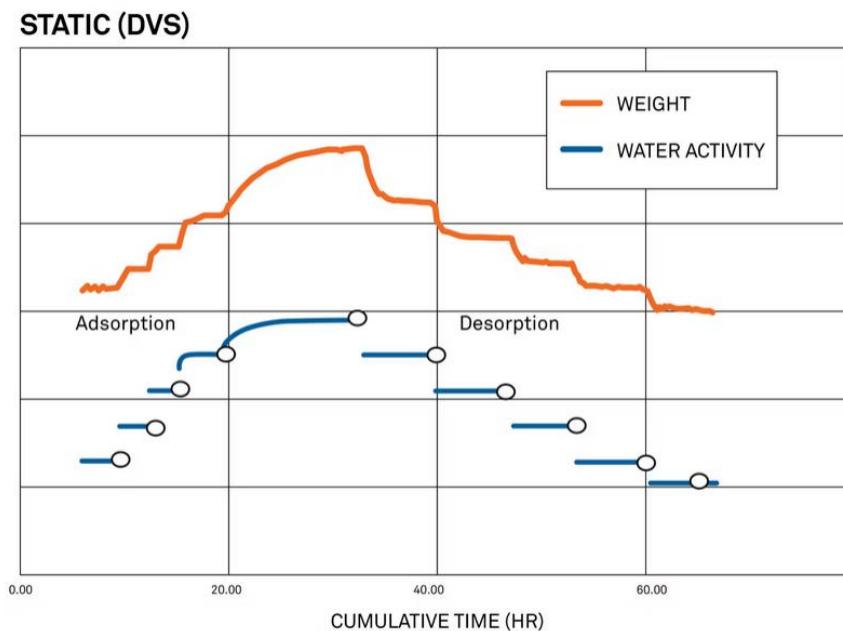
OU



Attention aux conditions de séchage initial!

# Méthode dynamique

Un dispositif typique de sorption dynamique de vapeur maintient un échantillon dans une chambre à température contrôlée. Il utilise ensuite de l'air humidifié ou desséché pour amener la chambre à un niveau d'humidité relative défini. Une fois que l'échantillon atteint l'équilibre (supposé par le poids) avec le niveau d'humidité relative de la chambre, son changement de masse est enregistré. L'appareil répète ensuite le processus en augmentant ou en diminuant le niveau d'humidité relative et enregistre d'autres changements. Une fois que les points de données nécessaires ont été collectés, certains appareils DVS les utilisent pour générer une isotherme.

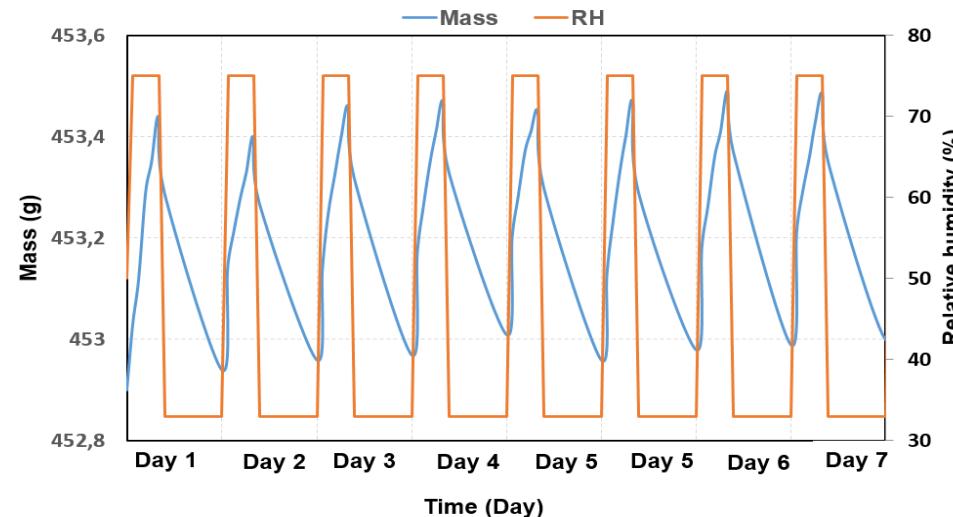
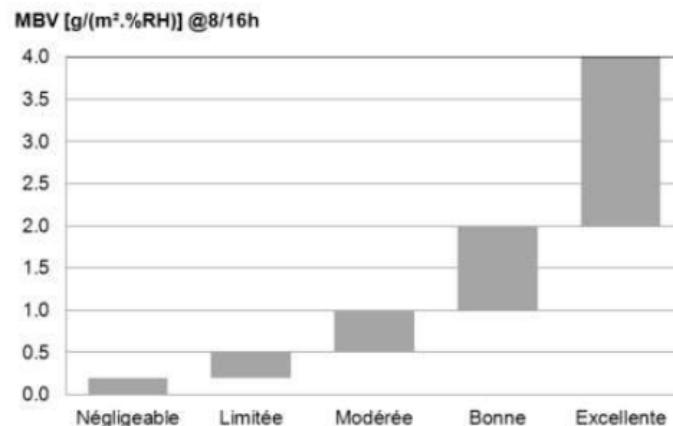


# Inertie hydrique: capacité tampon hydrique ou MBV

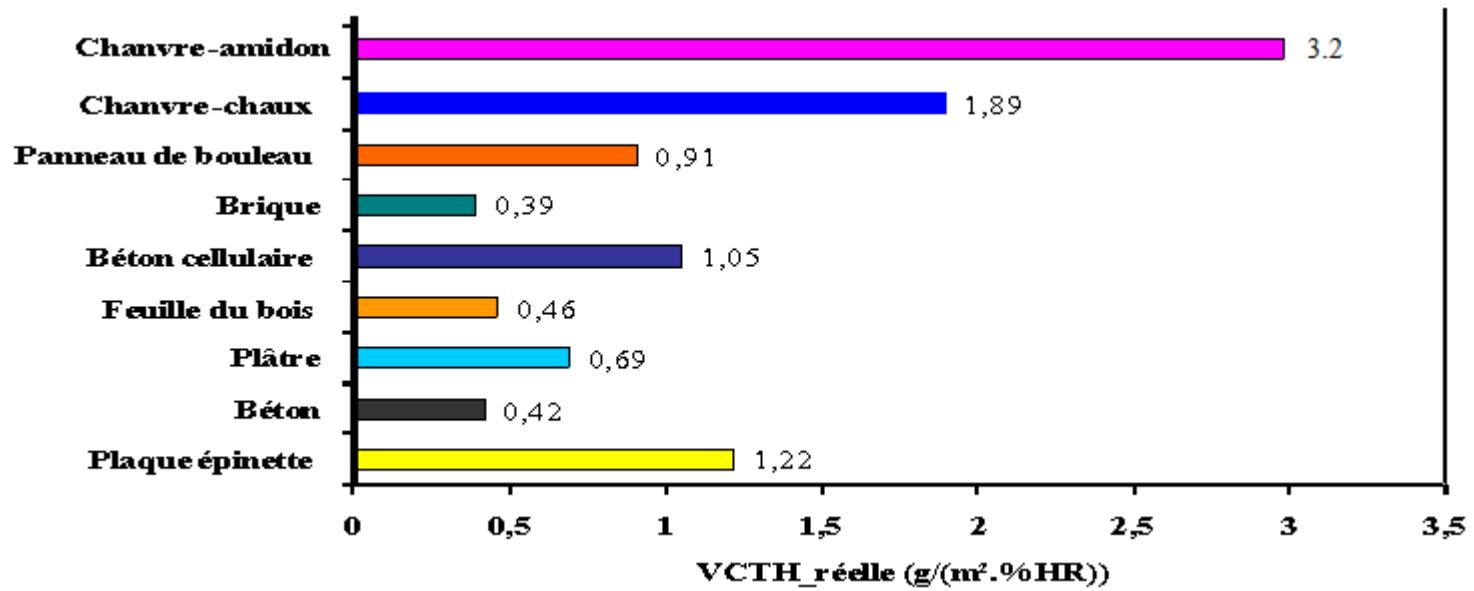
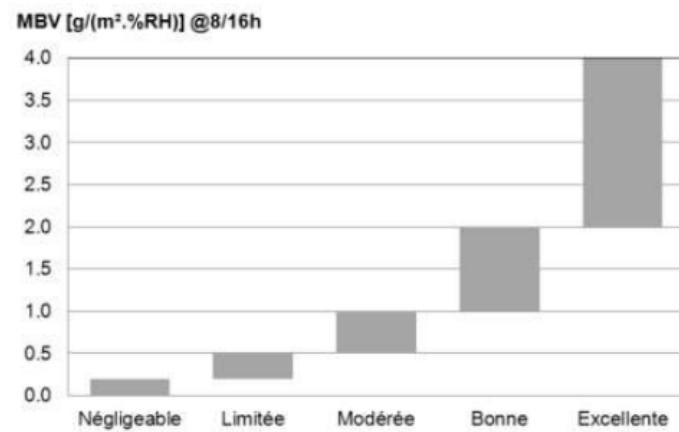
**MBV (g/m<sup>2</sup>.HR): protocole Nordtest**

8 hrs à 75% + 16 hrs à 33%

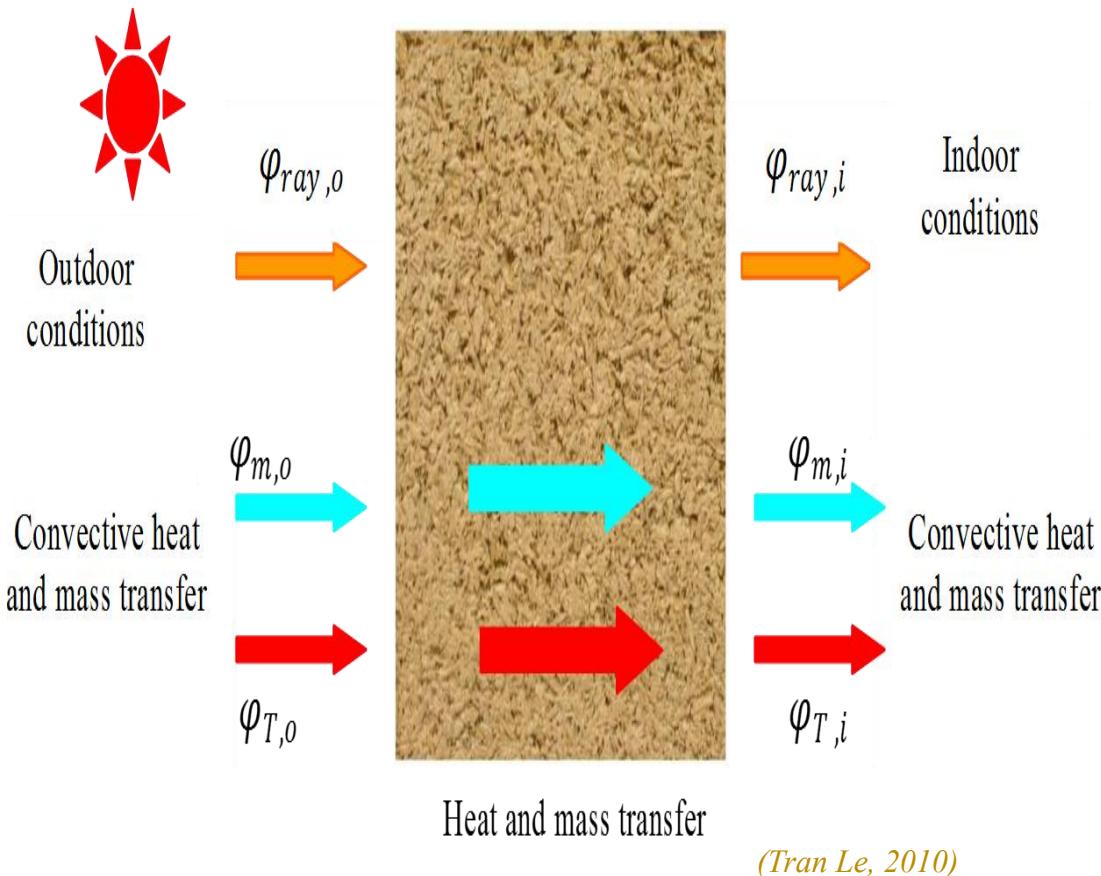
$$MBV = \frac{\Delta m}{S.(HR_{high} - HR_{low})}$$



# Inertie hydrique: capacité tampon hydrique ou MBV



# Modélisation à l'échelle de la paroi



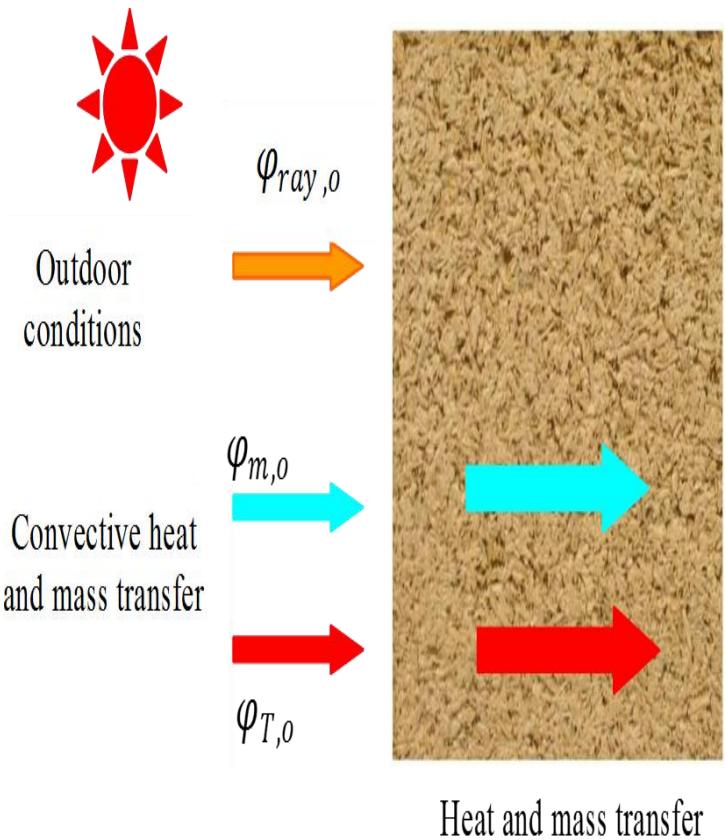
Modèle de Phillip et De Vries (1957) et Mendes (1997)

Modèle de Luikov

Modèle de Kunzel (1995)

Ces modèles ont été développés à partir des équations de conservation de masse et d'énergie. La différence majeure entre ces modèles réside dans les potentiels de calculs choisis et les hypothèses simplificatrices adoptées

# Modélisation à l'échelle de la paroi: approche de Philip et De Vries



- Conservation de masse

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$$

- $D_T = D_{Tl} + D_{Tv}$

- $D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v}$

- $D_\theta = \frac{\delta_a P_{vs}}{\mu \rho_0 \xi} \frac{1}{\xi}$

- $D_{Tv} = \Phi \frac{\delta_a}{\rho_l \mu} \frac{dP_{vs}}{dT}$

(Crausse et al, 1996)

- Conservation d'énergie

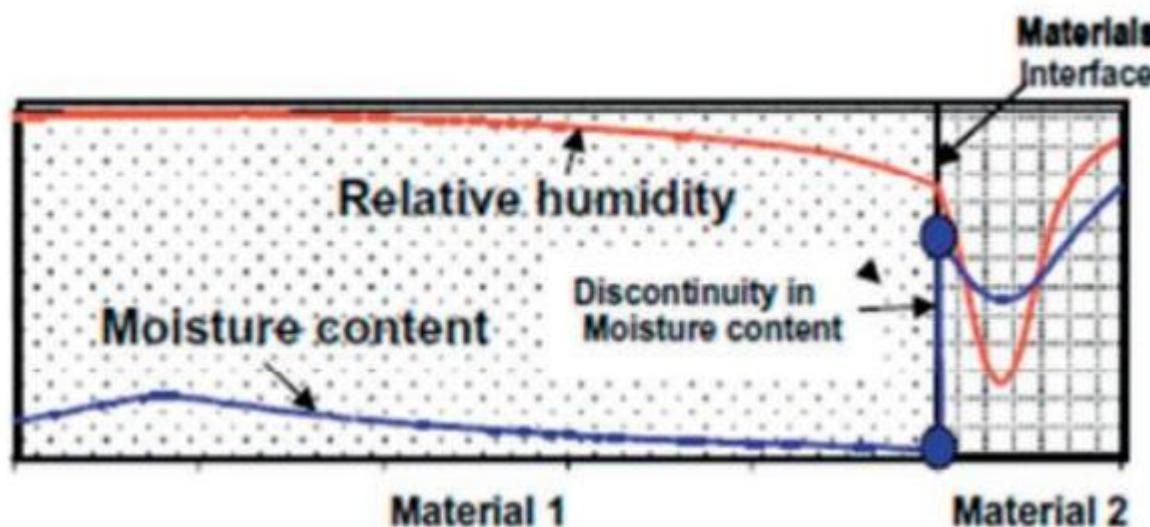
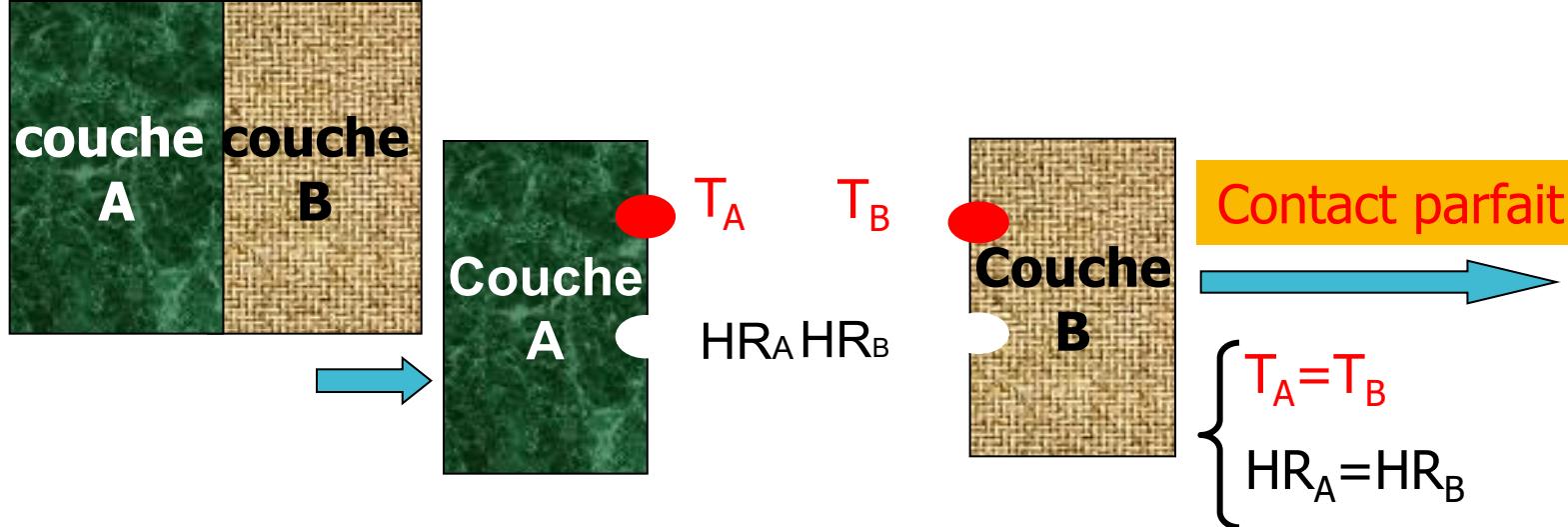
$$\rho C p_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \rho_l \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{T,v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\theta,v} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right)$$

- ✓  $C p_m = C p_0 + C p_l \frac{\rho_l}{\rho_\theta} \theta$

- Conditions aux limites

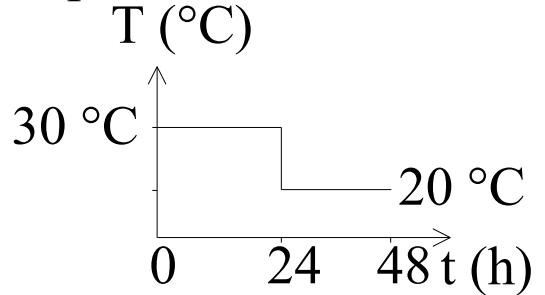
- ✓ Convection massique entre l'air avoisinant et les surfaces intérieure et extérieure
- ✓ Echanges convectifs et radiatifs ainsi que la chaleur générée par changement de phase

## 2.1 Cas des interfaces

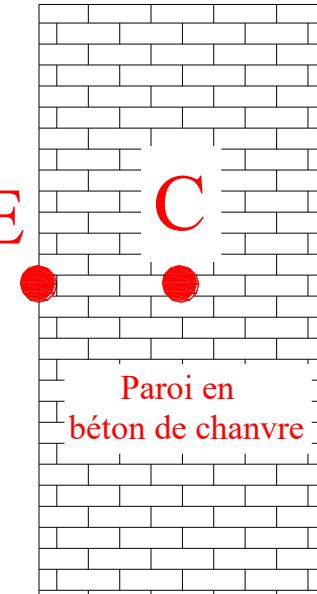
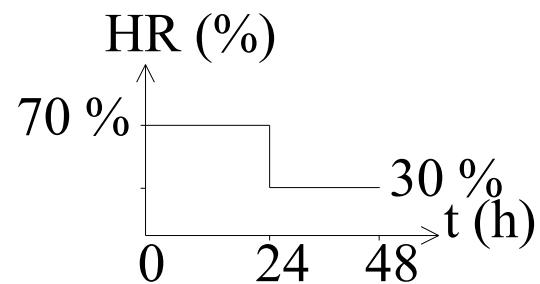


# Etude d'une paroi en béton de chanvre

Température en E



Humidité relative en E



$h_{Ti}$

$h_{Mi}$

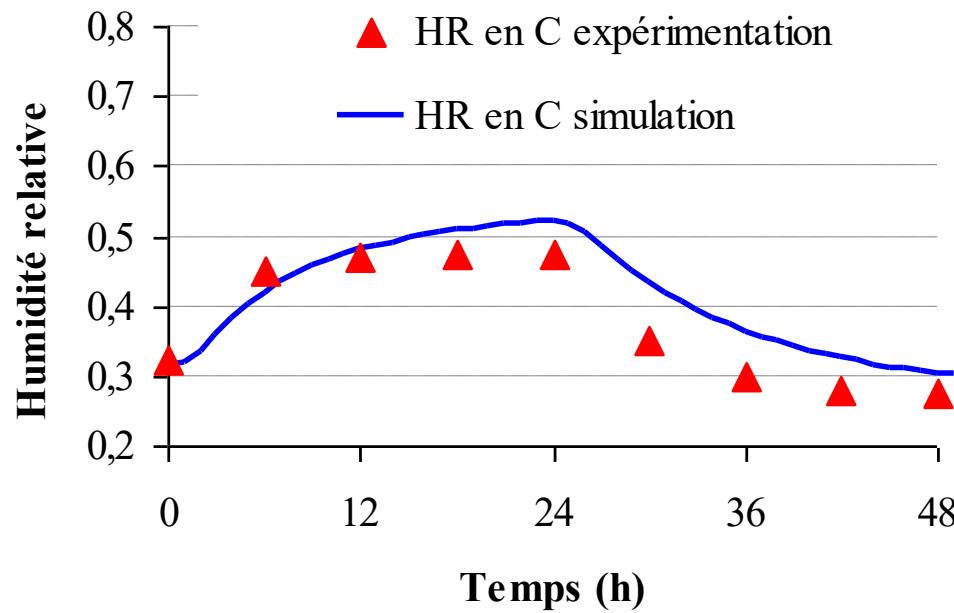
I

$T_i$

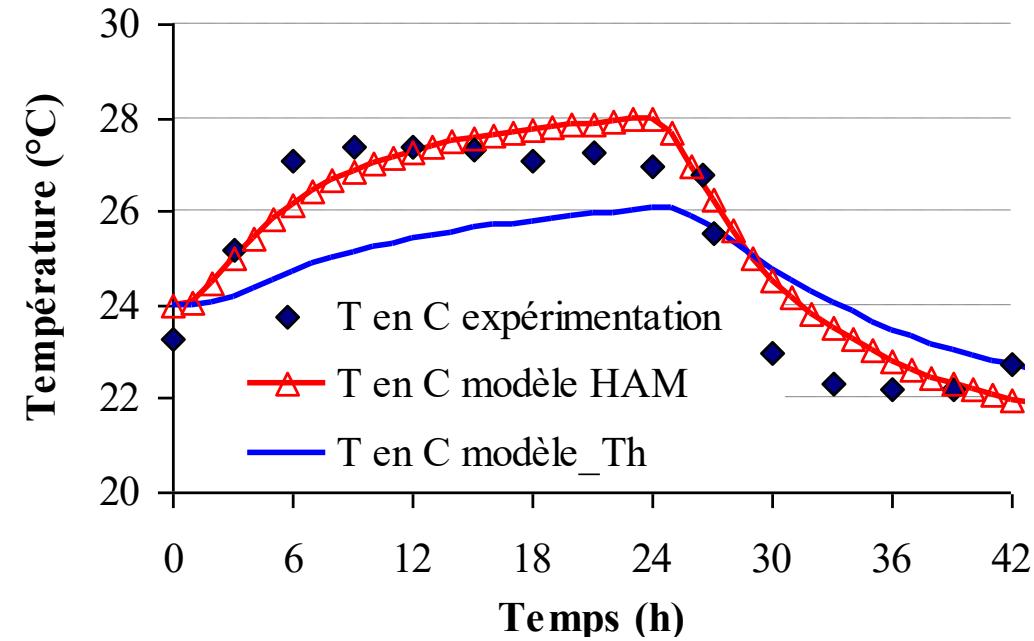
$HR_i$

- Température et humidité relative imposées en E.
- Pour la surface intérieure:  $h_{Ti} = 15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  et  $h_{Mi} = 0,015 \text{ m.s}^{-1}$ .
- La paroi est discrétisée en 50 nœuds.

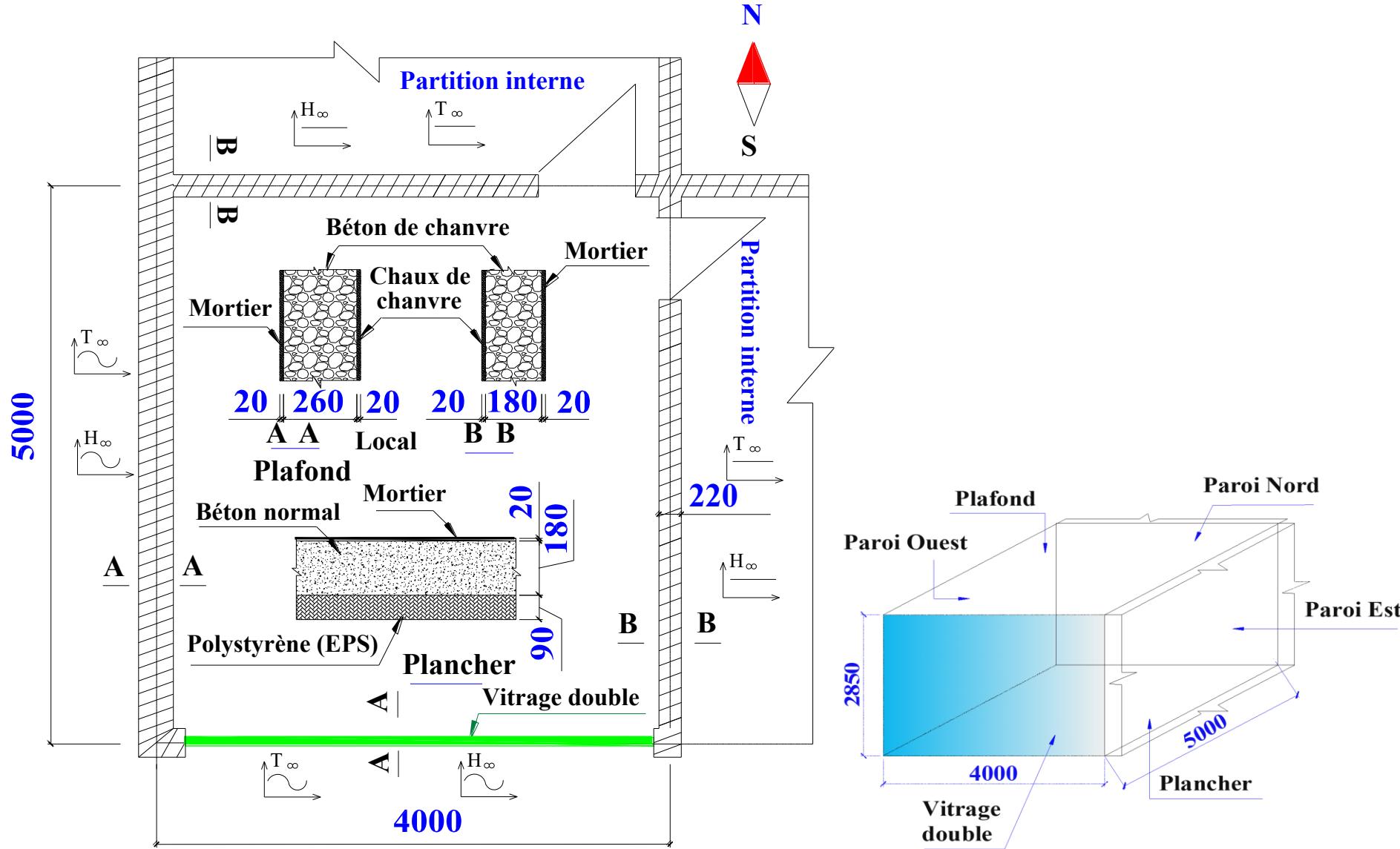
# Etude d'une paroi en béton de chanvre

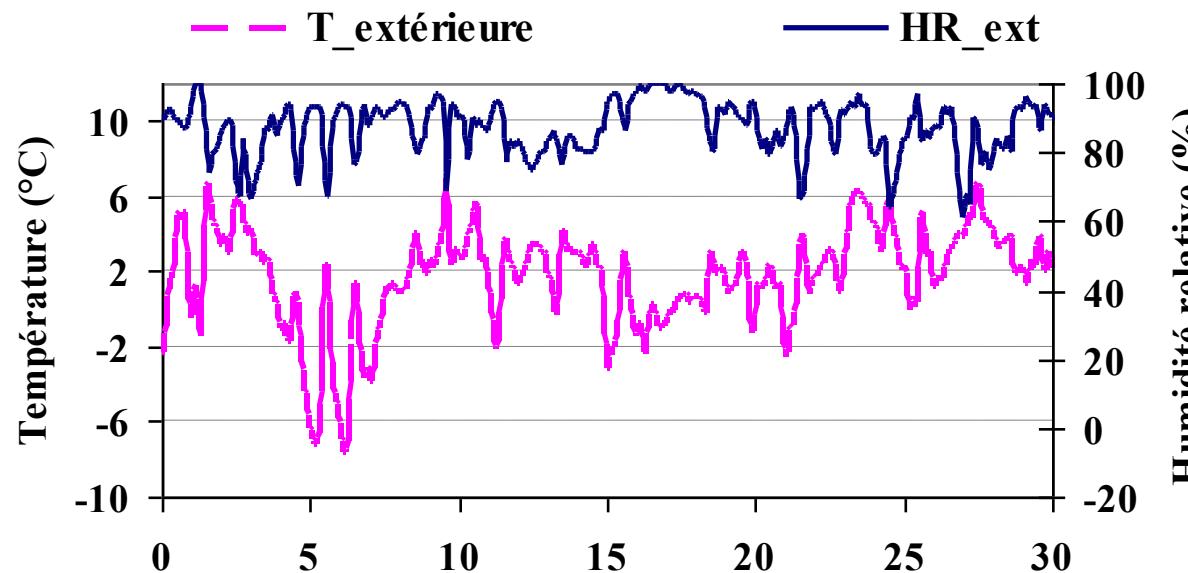


**HAM** : prise en compte de transfert couplé de chaleur et de masse dans la paroi ;  
**Th** : on ne considère que le transfert de chaleur (le phénomène de transfert de masse dans la paroi est ignoré).

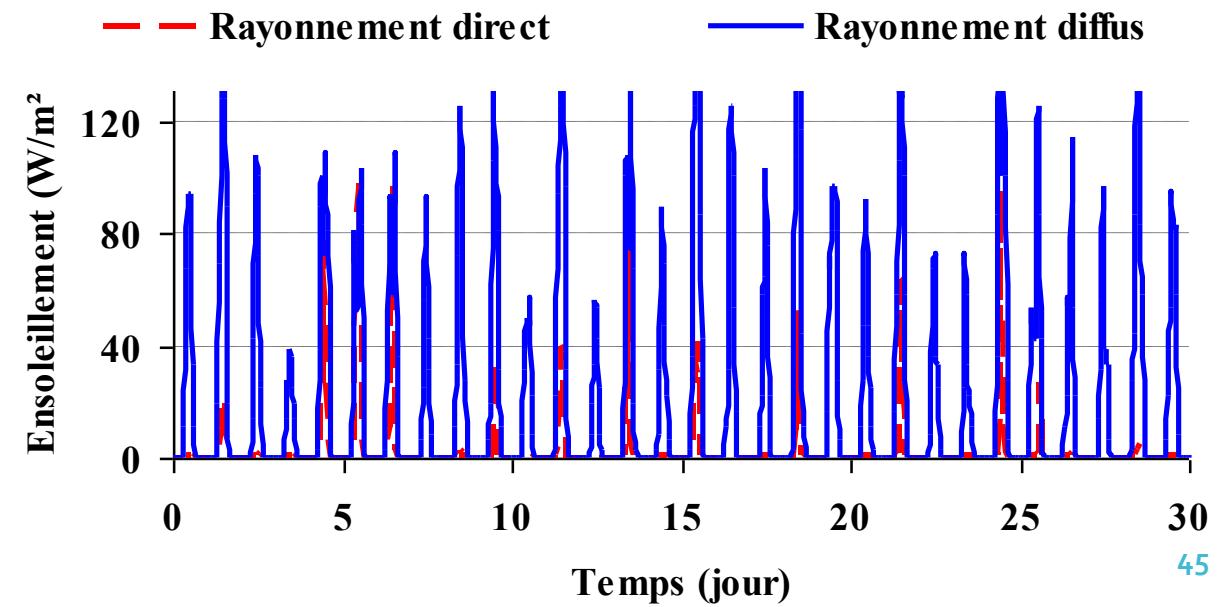


# Etude à l'échelle d'un local





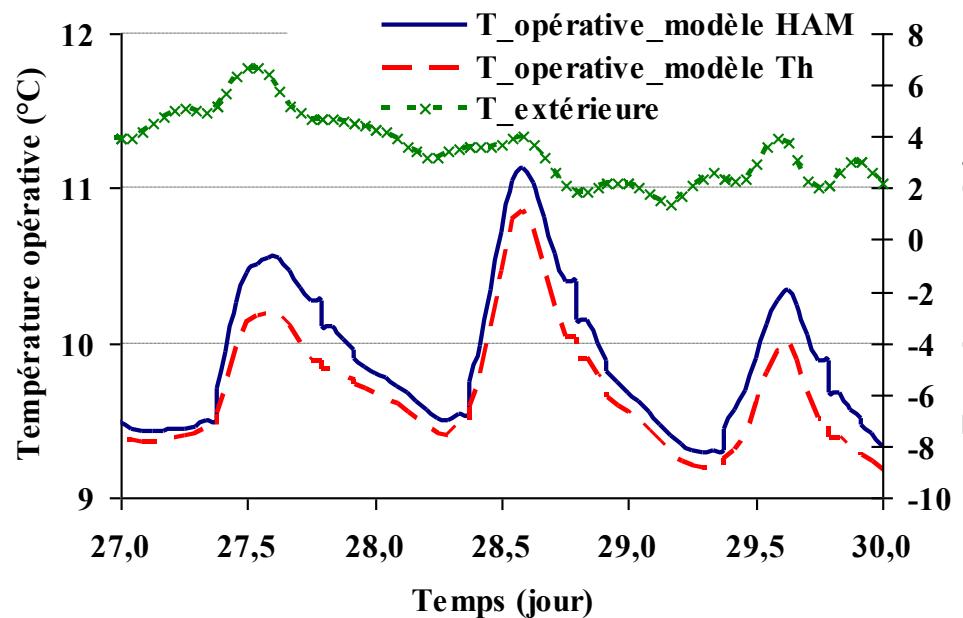
Conditions  
climatiques en hiver



- Initialement, la température et l'humidité relative de la paroi et du local sont de 20° C et 50 % respectivement;
- On suppose le bureau occupé par deux personnes de 8 h à 18 h et que les charges intérieures sont aussi dues à deux ordinateurs et à l'éclairage.
- Coefficients de convection thermique intérieur et extérieur: 8 et 25 W/(m<sup>2</sup>.K). Le nombre de Lewis =1;
- La simulation est effectuée pour un mois.

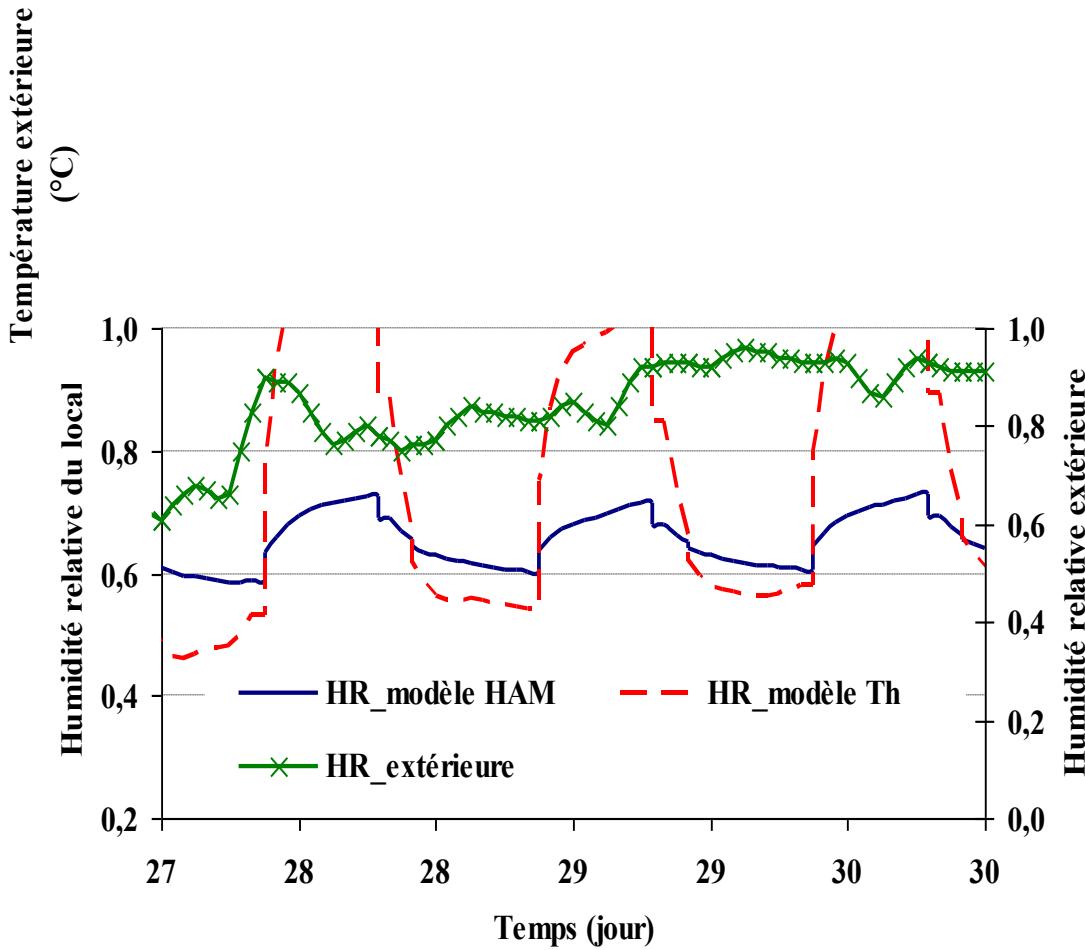
## Local non chauffé: Comparaison entre les modèles Th et HAM

Etudes numériques

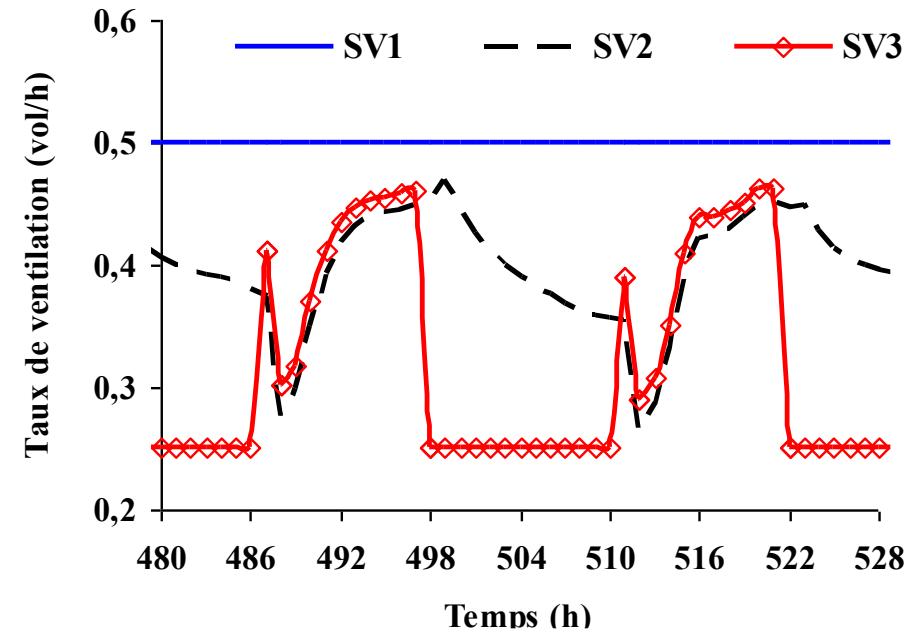
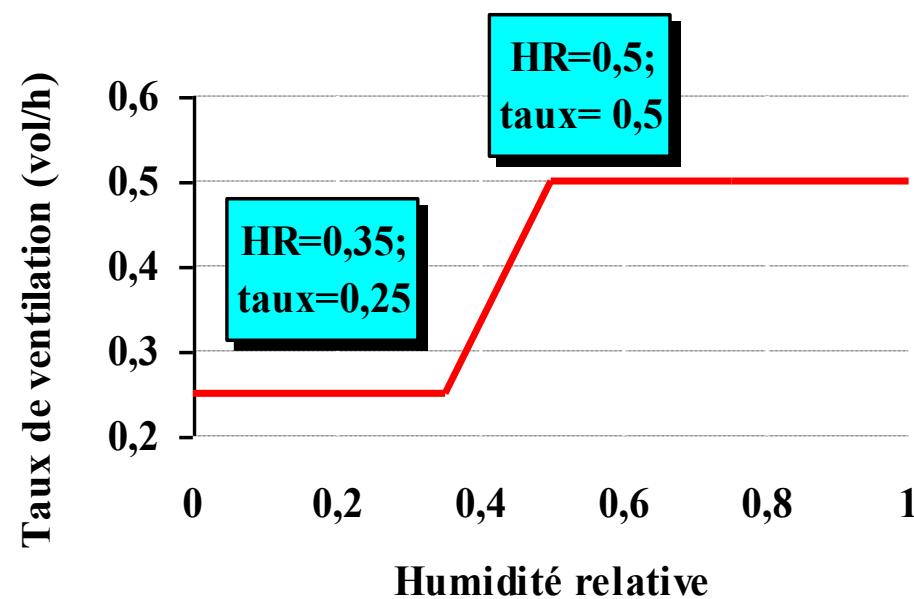


**HAM** : prise en compte de transfert couplé de chaleur et de masse dans la paroi ;

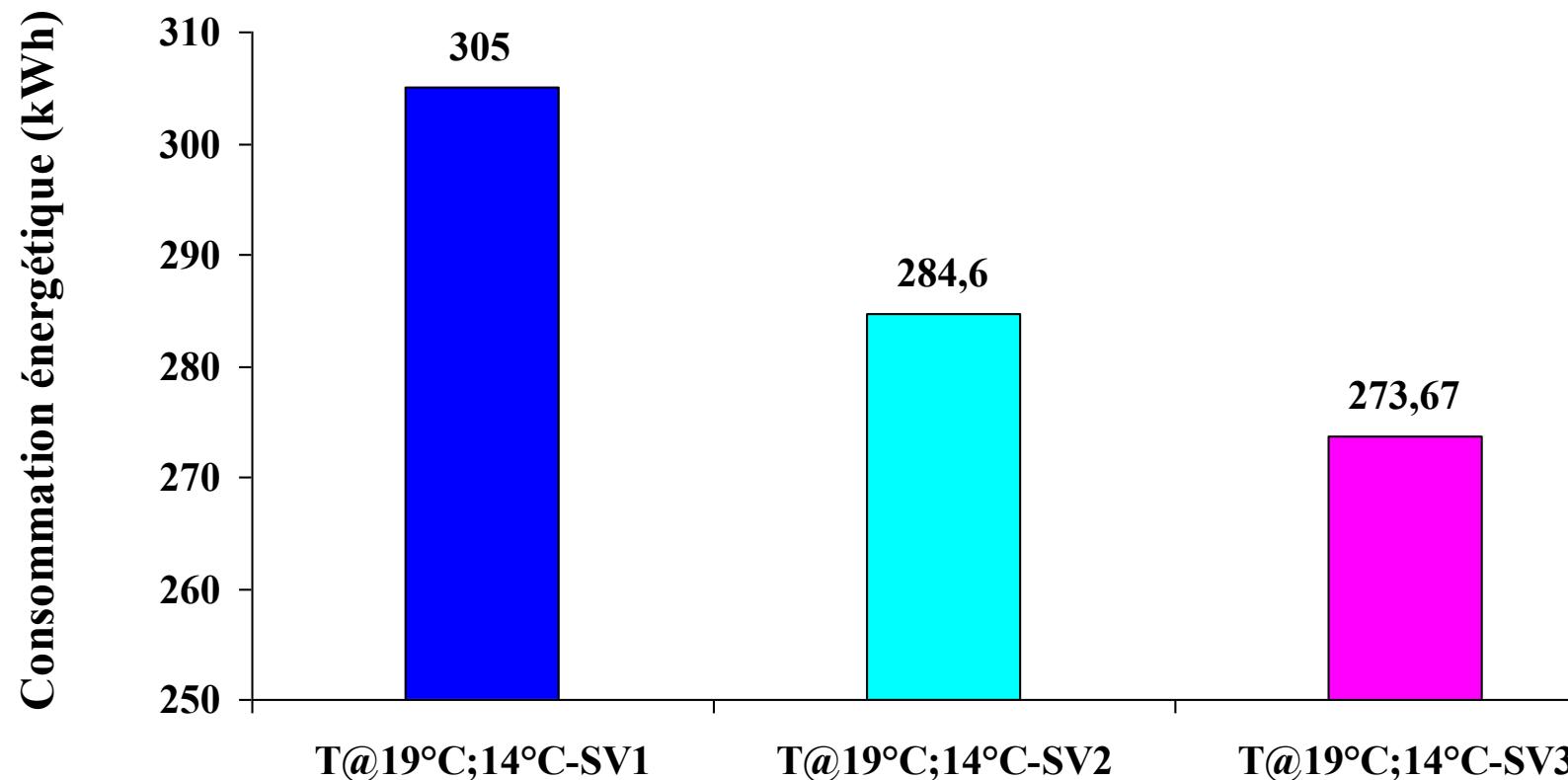
**Th** : on ne considère que le transfert de chaleur (le phénomène de transfert de masse dans la paroi est ignoré).



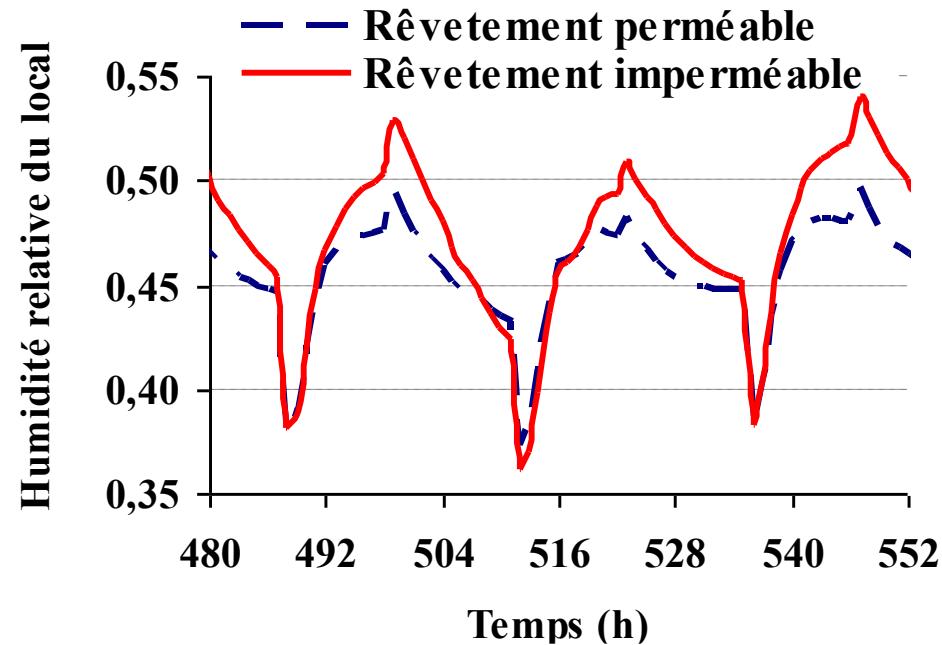
<b>Stratégie de ventilation</b>	<b>Description</b>
<b>SV1</b>	Le taux de ventilation est constant et de 0,5 vol/h toute la journée
<b>SV2</b>	La ventilation est hygroréglable toute la journée
<b>SV3</b>	La ventilation est hygroréglable comme SV2 de 7h à 18 h et après le taux est constant de 0,25 vol/h.



### Influence de la stratégie de ventilation



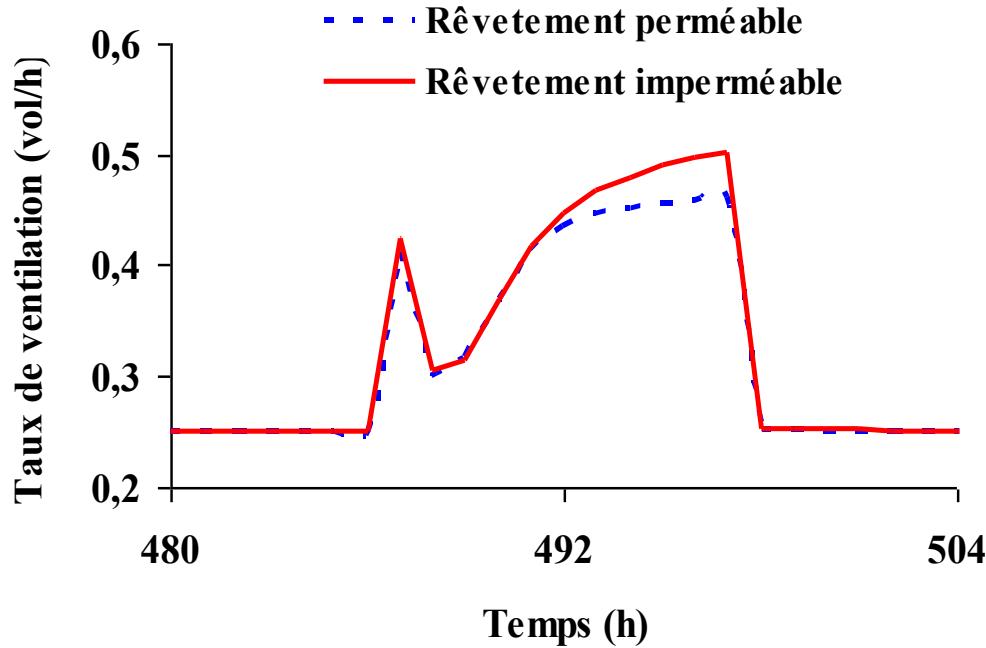
## Influence de l'enduit



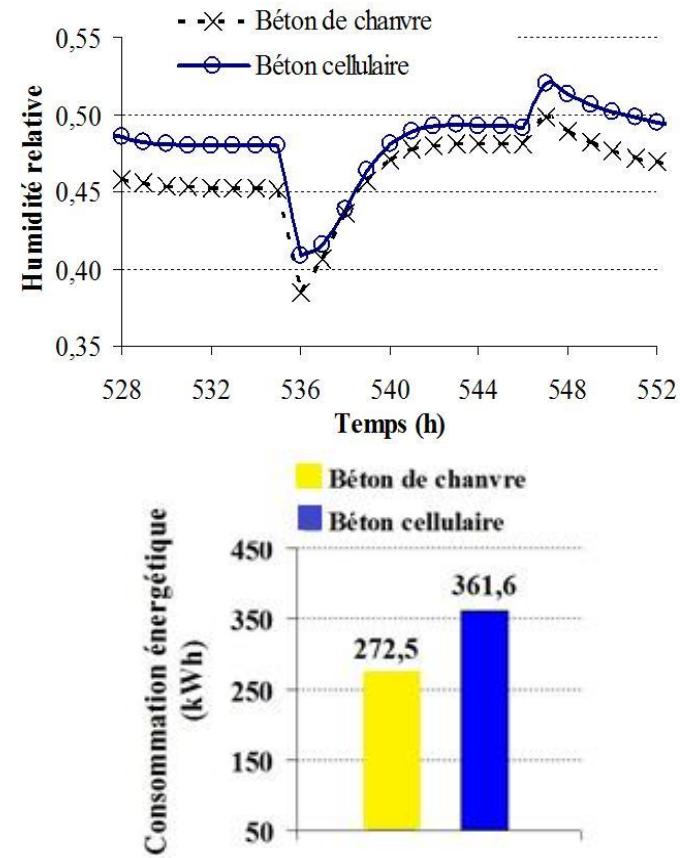
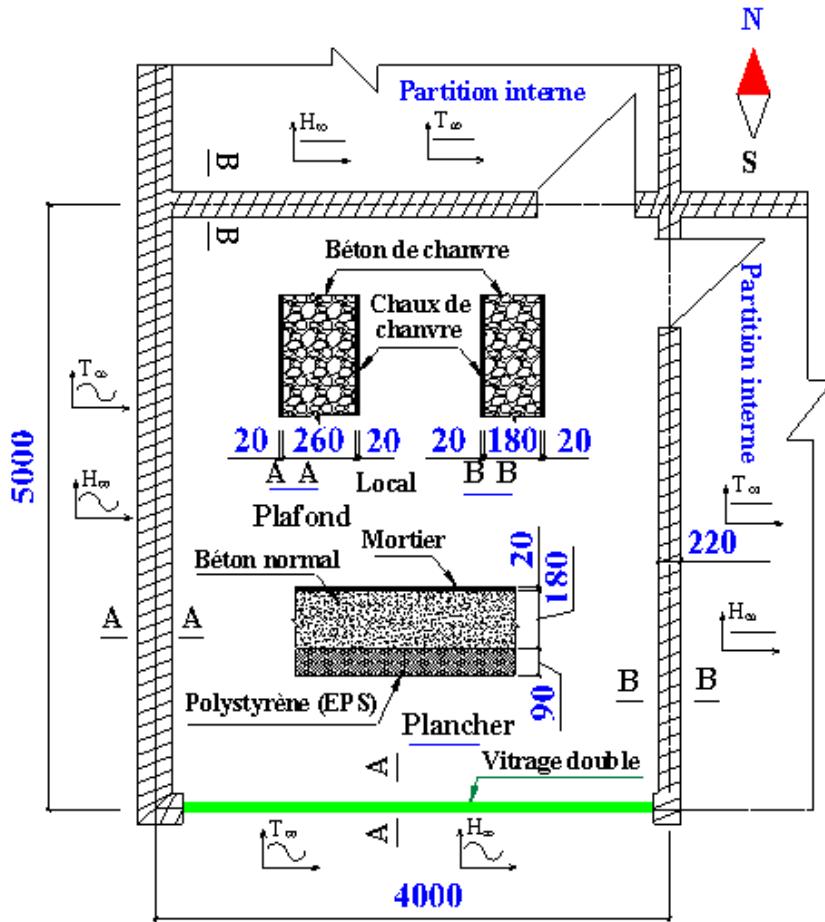
**2 cas de revêtements intérieurs:**  
➤ Revêtement perméable  
➤ Revêtement imperméable

## Etudes numériques

*Le cas avec revêtement perméable permet de réduire la consommation énergétique de 4% et par rapport aux cas imperméable (SV3)*



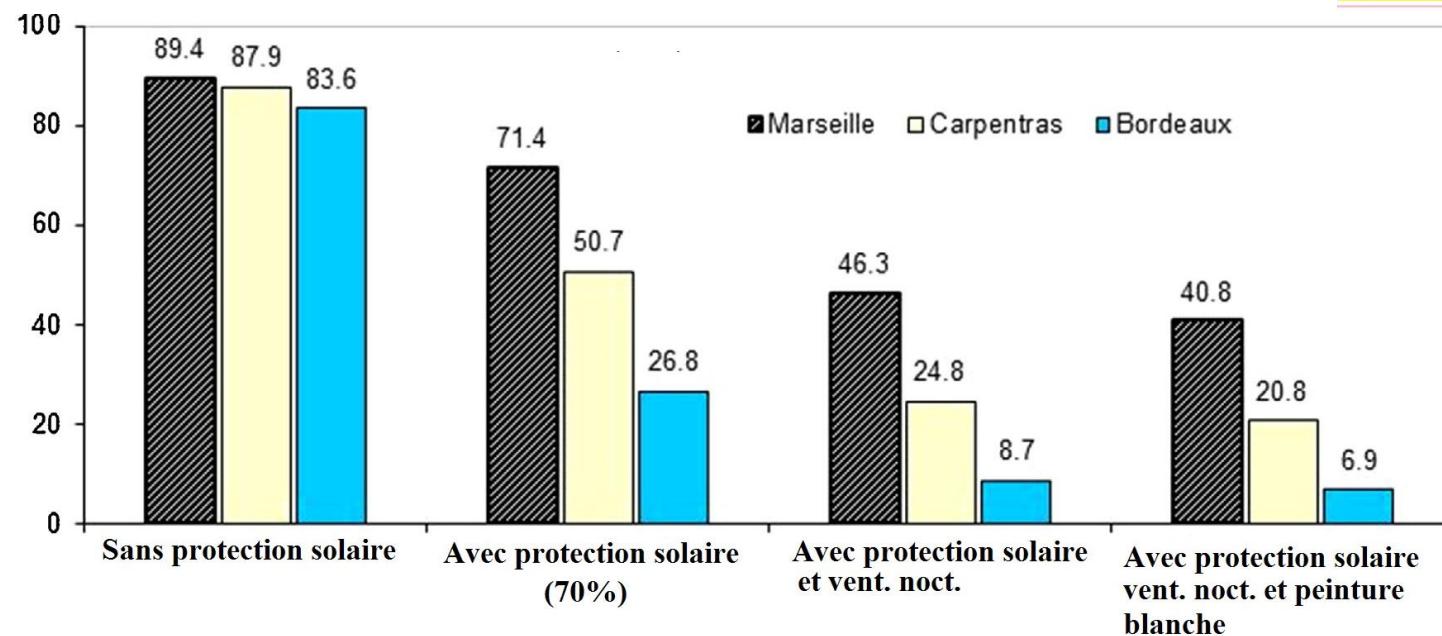
### Etude à l'échelle d'un local: en hiver



Tran Le A.D. et al. (2010). Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy and Buildings*, 42: 1797-1806.

### Etude à l'échelle d'un local: en été

Pourcentage d'heures où la température opérative dépasse 27°C



Maalouf C. et al. (2014). Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France, *Energy and Buildings*, vol. 77, pages 48-57.

bâtiment à isolation extérieure en béton de

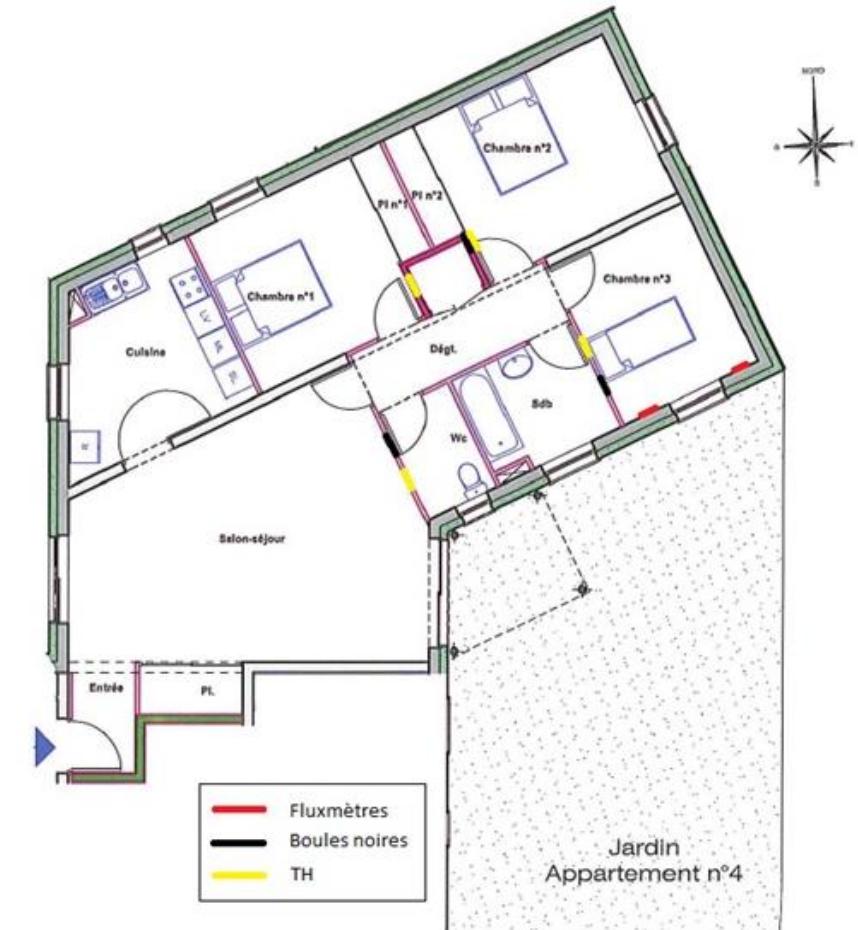
# LE FOYER REMOIS

Groupe GLOBAL HABITAT

Situé à Fleury-la-Rivière, Grand-Est



- A- gypse: 1,5 cm
- B- Optibric® : 20 cm
- C- Béton de chanvre: 13 cm
- D- Sable-chaux: 2 cm



- Famille de 3 personnes
- Présence de 2 chiens

## Instrumentation de l'appartement

Station-météo



- **Boule noire**  
**Mesure de la température rayonnante**
- **Thermo-hygromètre:**  
**Mesure de la température et humidité relative intérieures**



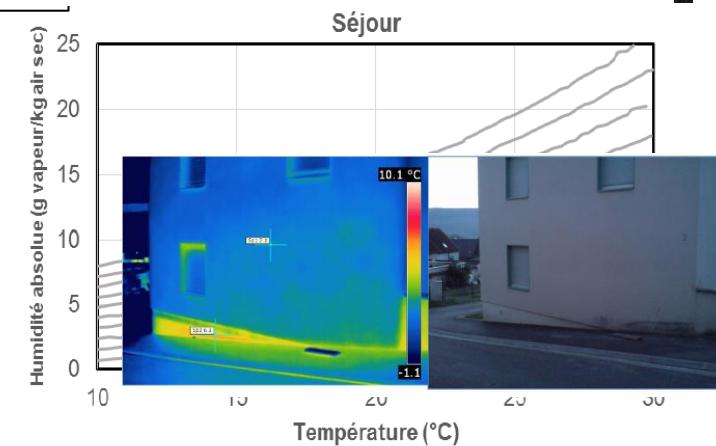
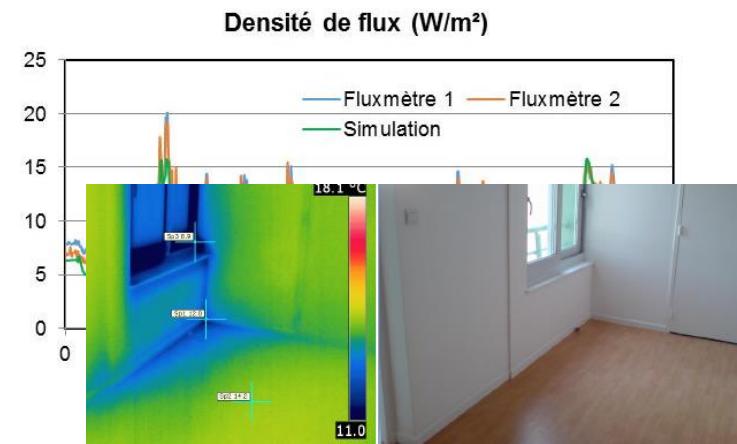
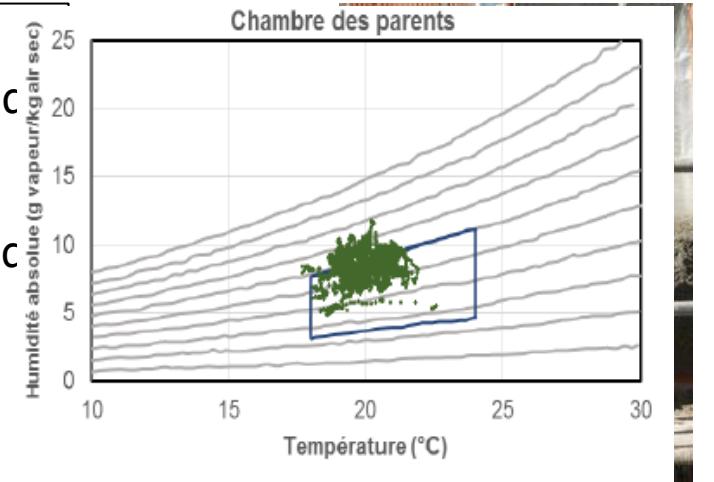
- **Fluxmètre:**  
**Mesure des déperditions thermiques sur la paroi sud du bureau**

## Objectifs

- ✓ Évaluation de la performance thermique du béton cimenté par les étiquettes in situ et l'analyse thermique (à l'intérieur) par:
- Thermométrie
- Instrumentation et analyse confort
- Enquête sur les usages et comportements des occupants
- ✓ Confrontation valeurs expérimentale et numérique



et évaluation confort et évaluation comportement des occupants



## Références bibliographiques

<https://www.staff.dtu.dk/-/media/staff/menqin/heat-and-mass-transfer-in-buildings.pdf>

[http://www.lamaisonpassive.fr/forum/Guide\\_Technique\\_Transferts\\_d%27humidite.pdf](http://www.lamaisonpassive.fr/forum/Guide_Technique_Transferts_d%27humidite.pdf)

[http://jeanpaul.bousquet.free.fr/cours%20pdf/BTS\\_FED/Cours04-Transfert%20vapeur%20d'eau%20-%20Parois.pdf](http://jeanpaul.bousquet.free.fr/cours%20pdf/BTS_FED/Cours04-Transfert%20vapeur%20d'eau%20-%20Parois.pdf)

<https://www.asder.asso.fr/wp-content/uploads/2018/04/12062012-5a7-Courgey.pdf>

<https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/proprietes-materiaux/grandeurs-hygrometriques/>

<http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Cours/Condensation/Condensation.htm>

<http://talbourdel.yves.free.fr/resources/DOC/v3-diagramme-de-lair-humide.pdf>

[https://theses.hal.science/tel-00590819/file/These\\_TRAN%20LE.pdf](https://theses.hal.science/tel-00590819/file/These_TRAN%20LE.pdf)