

# PERFORMANCES HYGROTHERMIQUES DES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS

ECOLE D'AUTOMNE 2024 – GDR MBS

21/11/2024  
Obernai

# PLAN

- **Performances thermiques**
  - Conductivité et résistance thermiques
  - Diffusivité et déphasage
- **Performances hydriques**
  - L'humidité dans le bâtiment
  - Coefficient de résistance à la vapeur d'eau et lame d'air équivalente
  - Adsorption d'eau et valeur tampon hydrique
  - Comportement hygrothermique
- **Modélisation des transferts hygrothermiques**
  - Potentiels moteurs
  - Modèle de Kunzel
  - Modèle de Liu
  - Modèle de Mendes

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

## Capacité des matériaux à résister au passage de la chaleur : paramètres clés

### CONDUCTIVITÉ THERMIQUE $\lambda$ [W/(m.K)]

Propriété des corps à transmettre la chaleur par conduction.

Flux de chaleur qui traverse en 1 s un matériau d'une surface de 1 m<sup>2</sup> et de 1 m d'épaisseur pour un écart de température de 1°C entre les 2 faces.

Plus la **conductivité thermique est faible**, plus le matériau est isolant.

### RÉSISTANCE THERMIQUE R [m<sup>2</sup>.K/W]

Caractérise la capacité d'un matériau à s'opposer au flux de chaleur susceptible de le traverser.

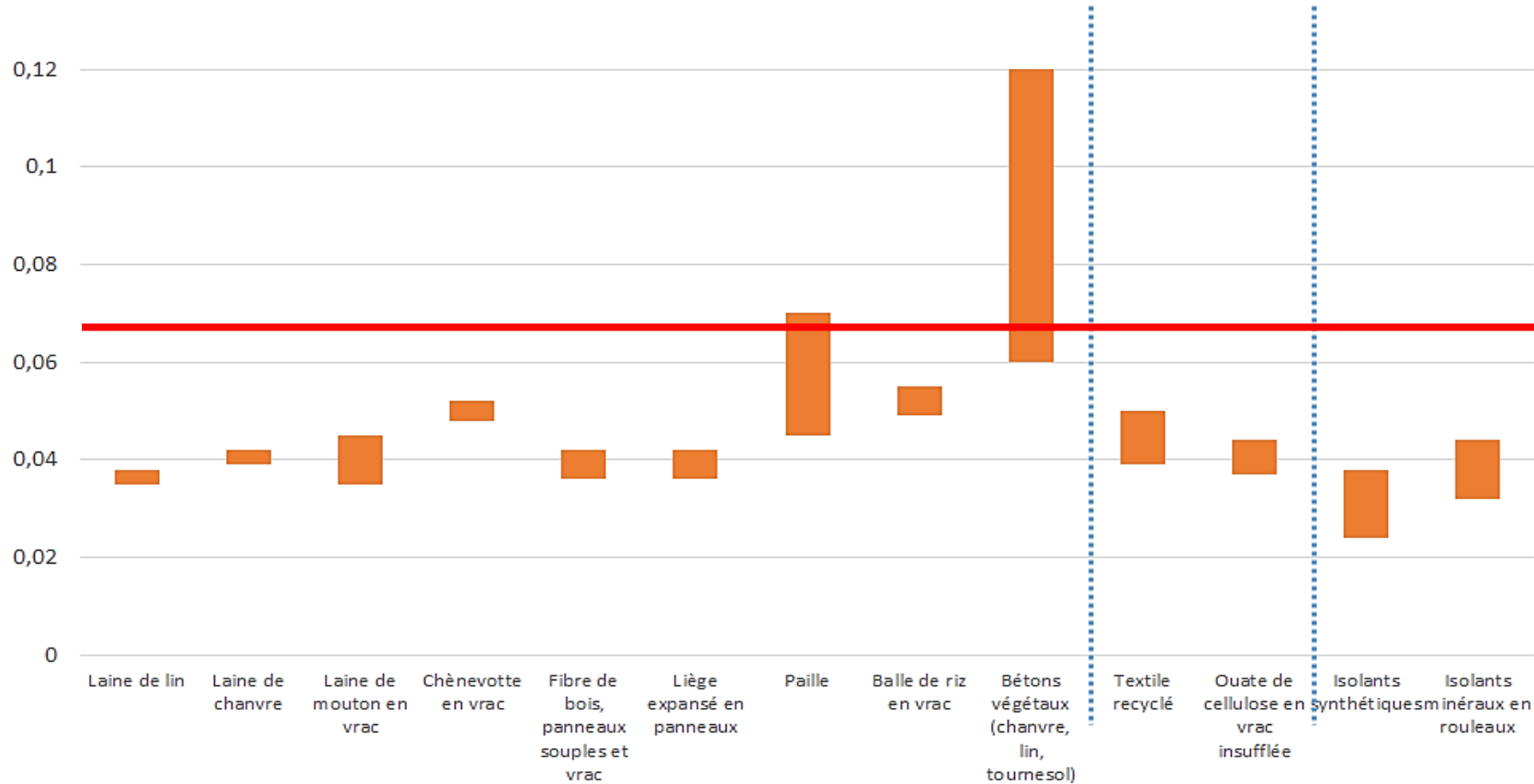
$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Résistance thermique d'une paroi = somme des résistances thermiques de chacune des couches de matériau la constituant.

Plus la **résistance thermique est élevée**, plus la paroi est isolante.

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

## Exemples de conductivités thermiques en W/(m.K)

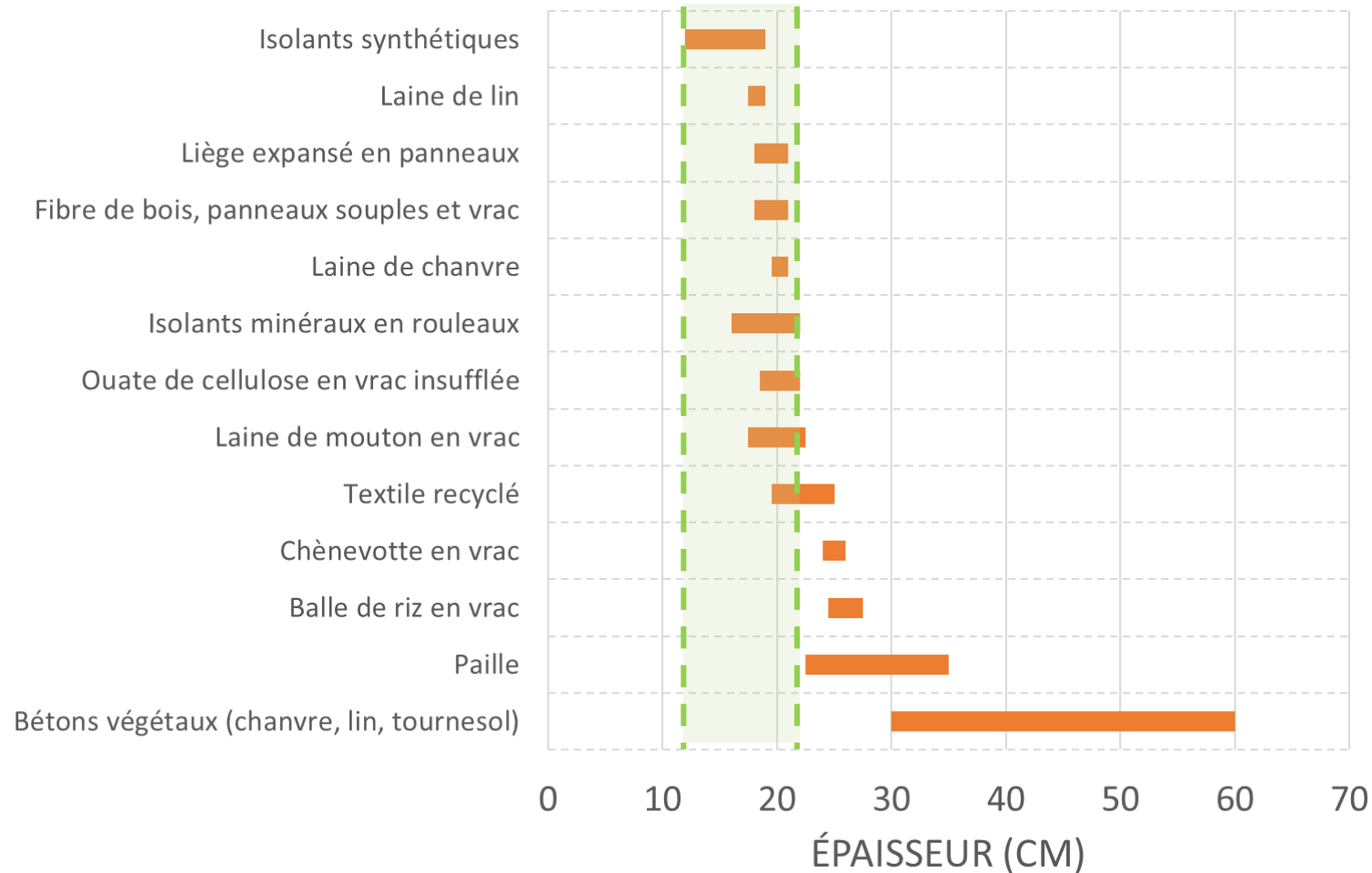


Isolant thermique :  
 $R \geq 0,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$  et  $\lambda \leq 0,065 \text{ W}/\text{m.K}$   
selon norme NFP 75-101

Source : Cerema Est

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

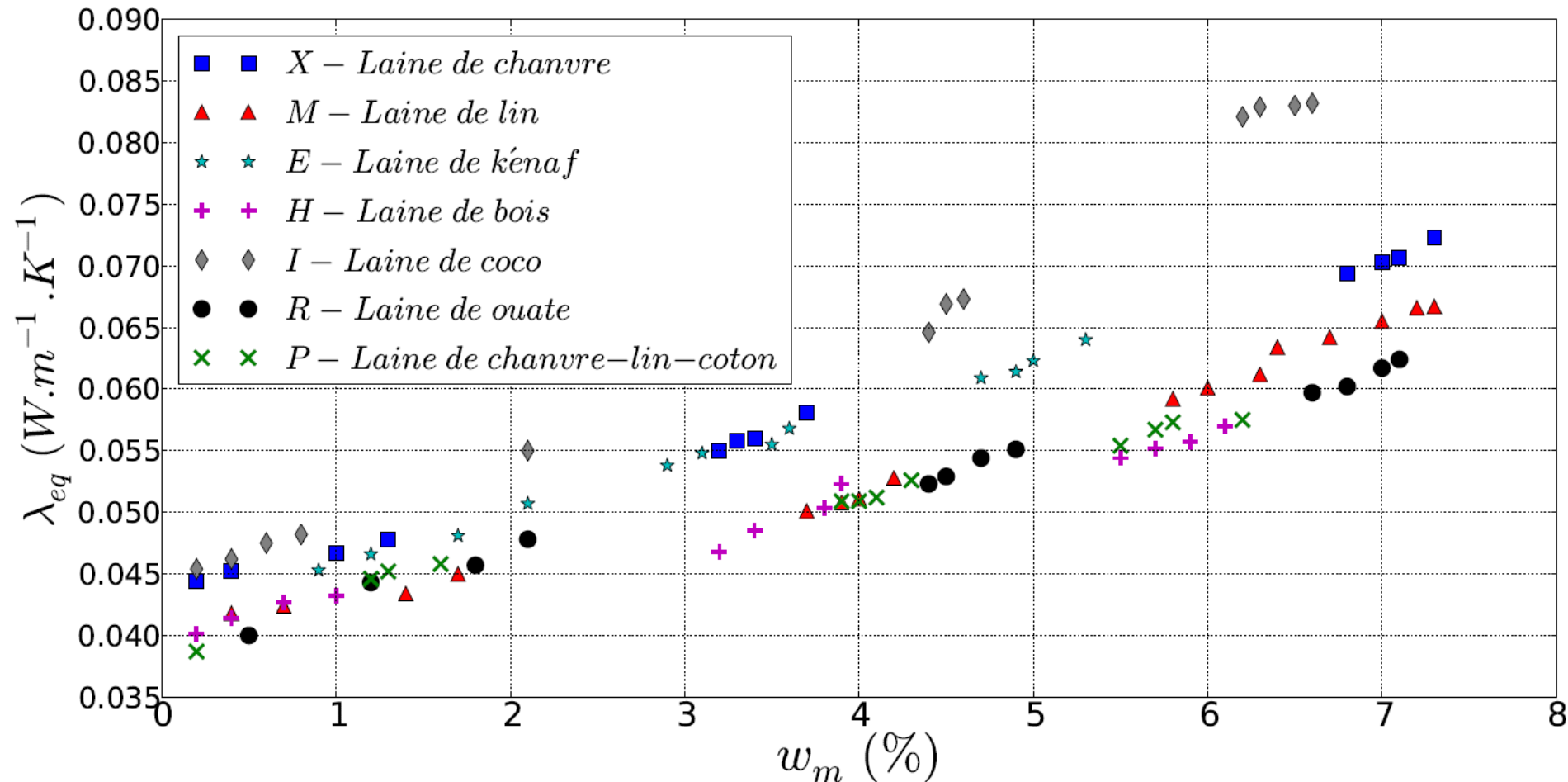
Épaisseurs pour une résistance de  $R = 5 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$



Source : Cerema Est

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

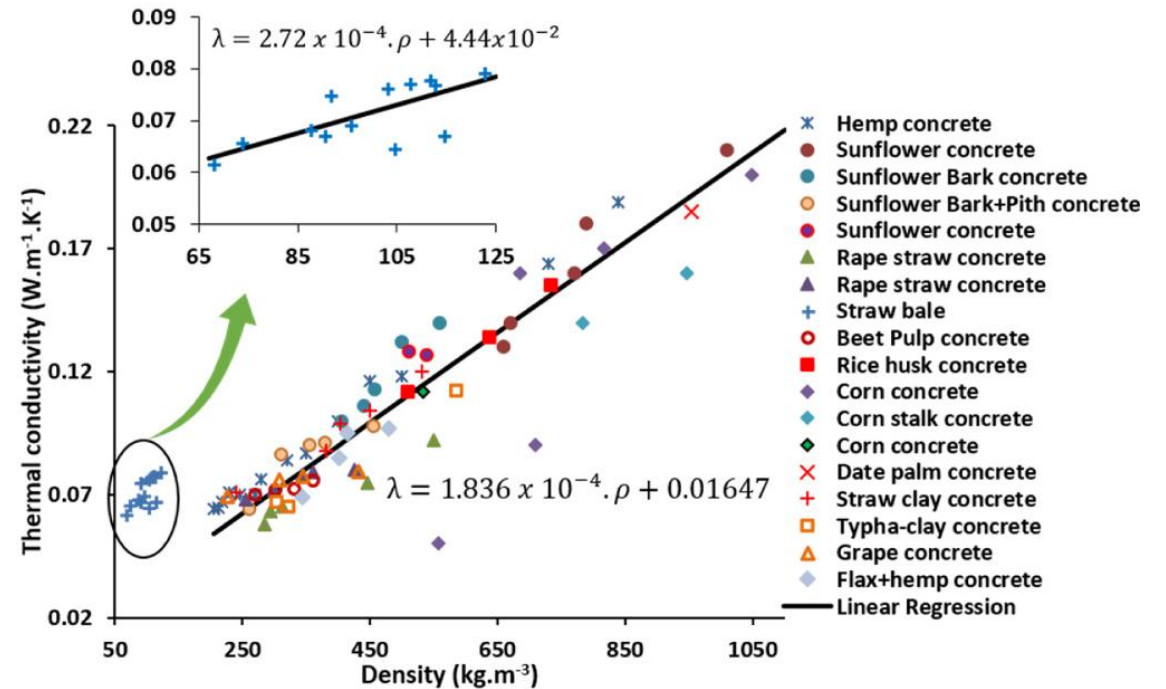
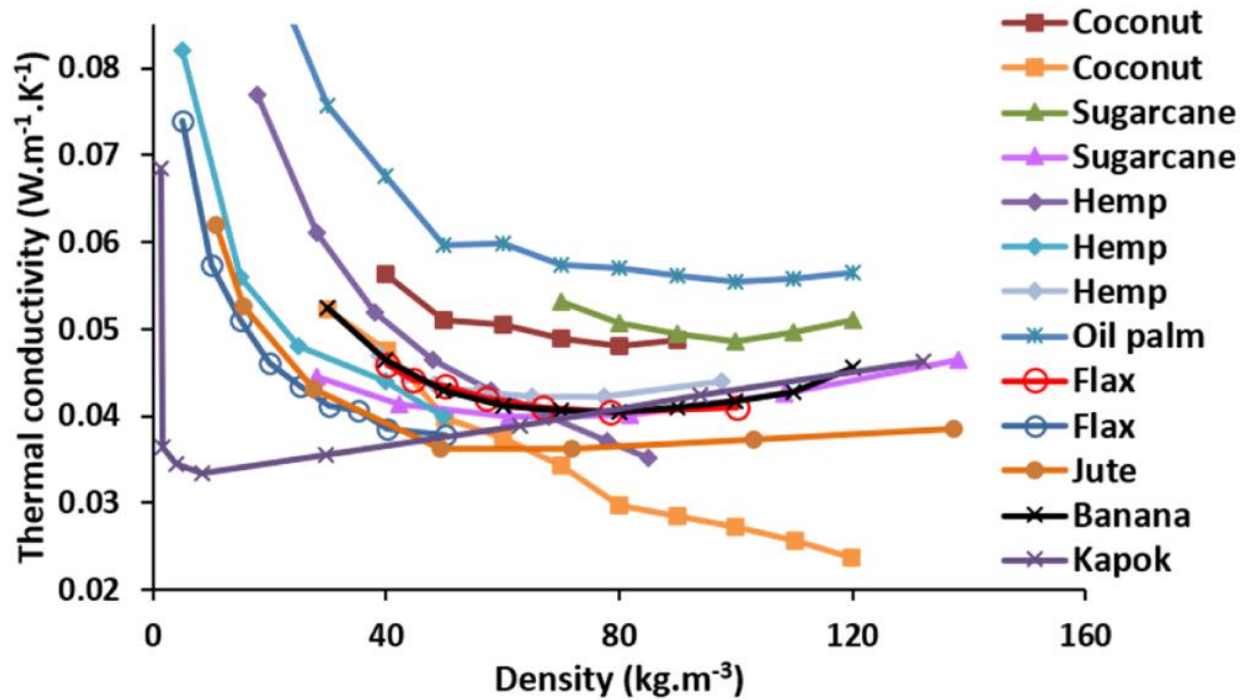
## Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique



Source : Thèse Clément Piégay 2019

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

## Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique



Source : Bakkour et al. 2024



# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

## L'inertie thermique d'un matériau

### L'INERTIE THERMIQUE

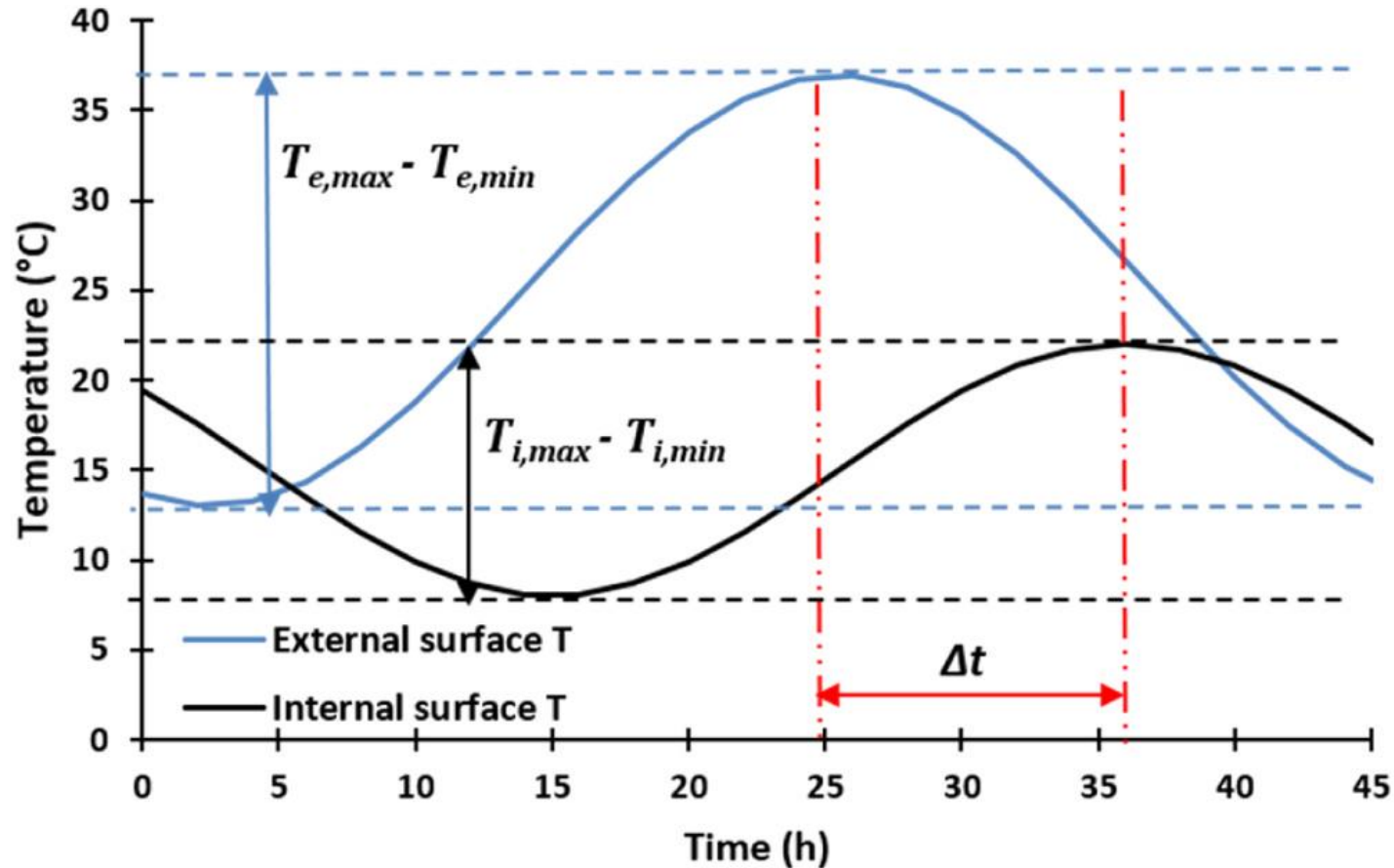
Capacité d'un matériau à accumuler des calories (chaleur ou fraîcheur) et à les restituer plus tard.

Dépend principalement de la **masse volumique** et de la **capacité thermique massique du matériau**.  
Capacité thermique massique  $C_p$  (J/kg.K) : quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1°C, 1kg de matériau.

Plus ces dernières sont élevées, plus l'inertie du matériau est importante.

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

## Déphasage et amortissement



Source : Bakkour et al. 2024

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

## Régulation de la chaleur : diffusivité et déphasage thermique

### LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE

D (m<sup>2</sup>/s)

Vitesse à laquelle la chaleur se propage dans un matériau.

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau (W/m.K)

$\rho$  : masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

$c$  : chaleur spécifique (J/kg.K)

Plus la *diffusivité thermique est faible*, plus *le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau*.

Le temps entre le moment où la chaleur arrive sur une face de la paroi et le moment où elle atteint l'autre face (déphasage) s'en trouve augmenté.

### LE DÉPHASAGE THERMIQUE

d (s)

Retard avec lequel la paroi va émettre la chaleur transmise.

Le temps de déphasage est proportionnel à l'épaisseur de la paroi et est inversement proportionnel à sa diffusivité thermique :

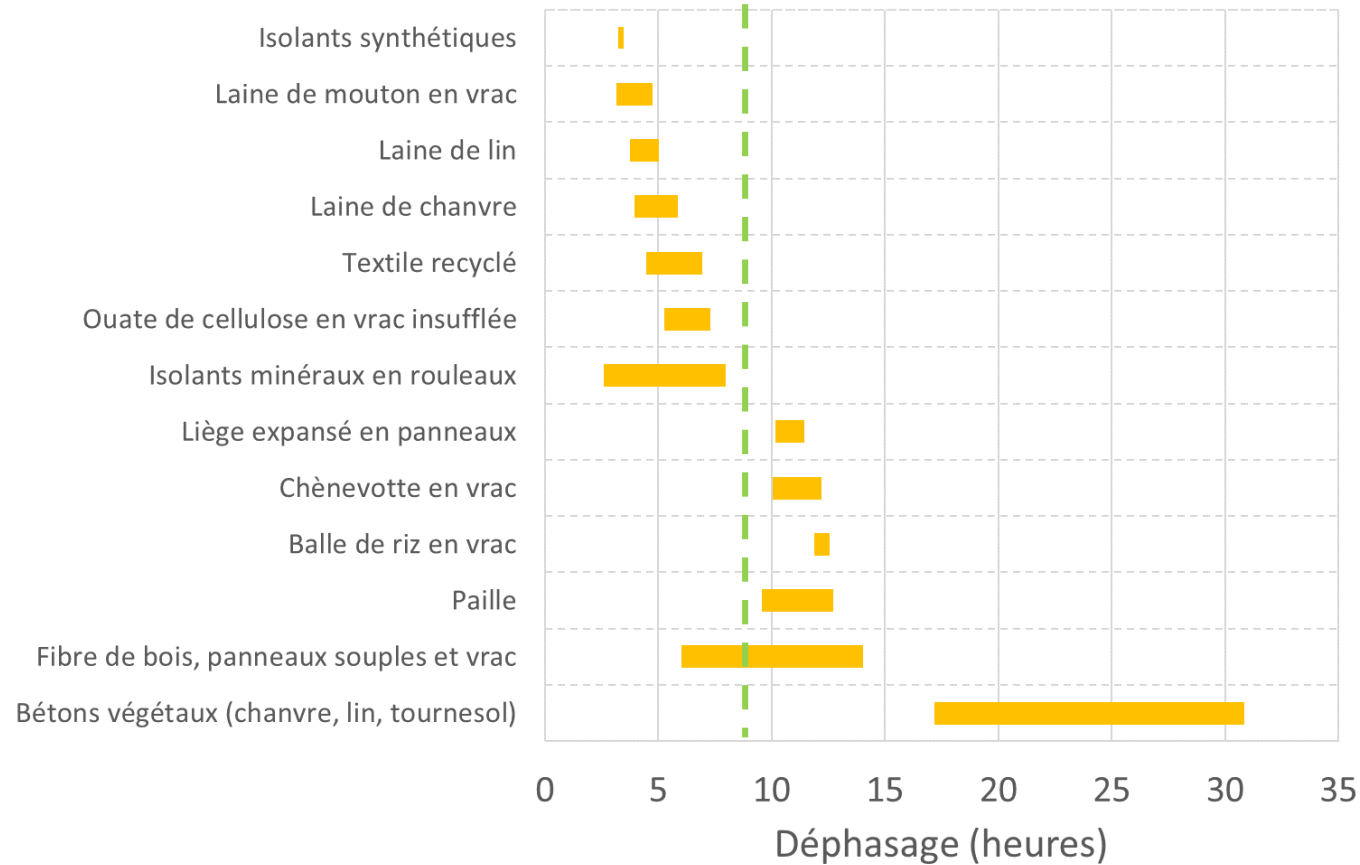
$$d = \frac{1,38e}{\sqrt{D}}$$

$e$  : épaisseur du matériau (m)

$D$  : diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s)

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

Temps de déphasage pour une résistance thermique de 5 m<sup>2</sup>.K/W



Source : Cerema Est

# PERFORMANCES THERMIQUES DES BIOSOURCÉS

Temps de déphasage et amortissement en fonction de l'épaisseur de mise en œuvre

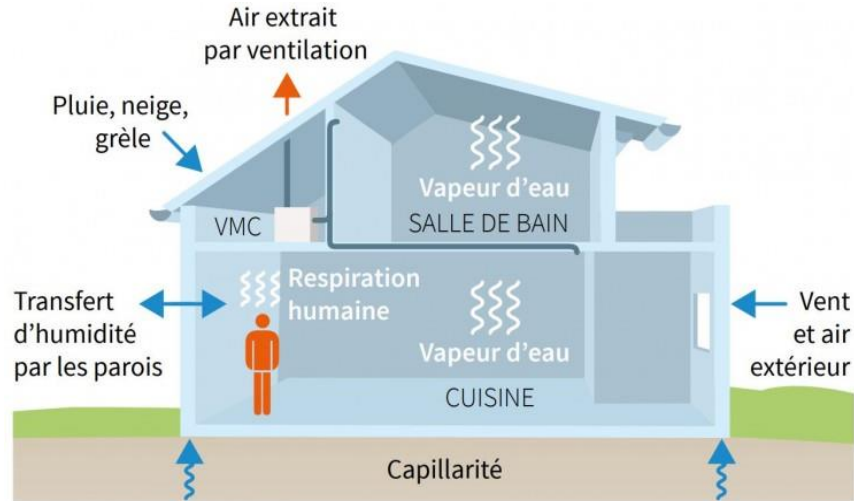
	Epaisseur (cm)	Déphasage (h)	Amortissement
Béton chanvre	30	17	98%
Fibre de bois semi-rigide	20	7,86	75%
Paille de blé	37	14,46	95%
Chènevotte en vrac	27	7	68%
Liège expansé en panneaux	20	10,1	86%
Isolants minéraux en rouleaux	20	7,53	72%
Ouate de cellulose en vrac insufflée	27	7,6	73%
Textile recyclé	20	4,17	33%
Laine de chanvre, lin, coton	20	5,49	53%
Fibres de bois rigide	20	10,54	87%

Source : Guide sur la réhabilitation en centre-bourg : adapter le bâti ancien aux enjeux climatiques

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

## Les sources d'humidité dans un bâtiment



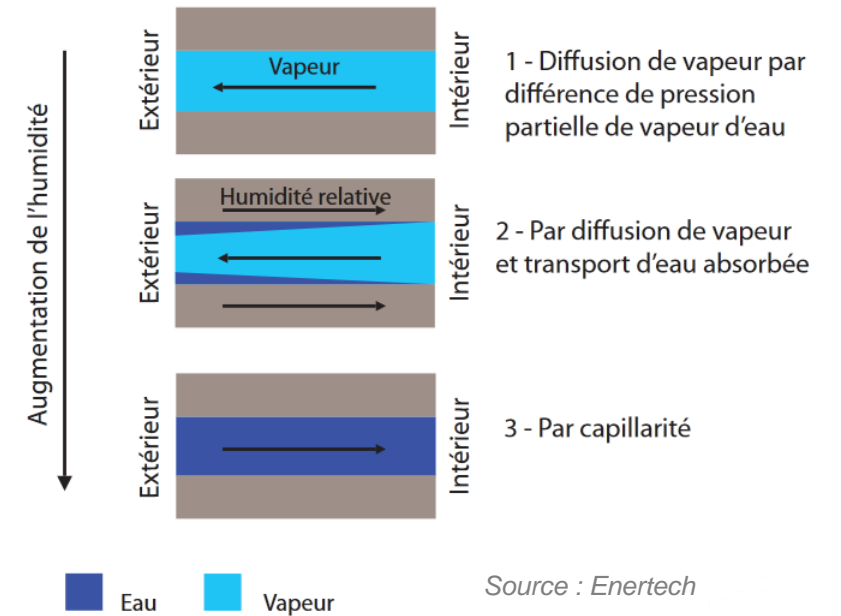
Source : <https://www.infoenergie-bfc.org>

**Les sources extérieures** au bâtiment : la pluie et les remontées capillaires

**Les sources provenant du bâtiment lui-même** : l'humidité contenue dans les matériaux (neufs ou existants).

**Les sources liées aux usagers** : la respiration, la sudation, les activités (cuisine, salle de bain,...).

## Transferts d'eau au sein du matériau



L'eau coexiste sous deux formes : **vapeur** et **liquide**

Paramètres d'influence : porosité, morphologie des pores, le réseau poreux, la nature du matériau.

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

Résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau

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



Gore-Tex



K-Way



# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

## Résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau

LE COEFFICIENT DE RÉSISTANCE A LA DIFFUSION  
DE LA VAPEUR D'EAU  
 $\mu$

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  indique dans quelle mesure un matériau s'oppose à la progression de la vapeur d'eau.  
Par convention,  $\mu = 1$  pour l'air immobile.

**Plus  $\mu$  est élevé, plus le matériau est étanche à la vapeur d'eau.**

Un matériau peu résistant à la diffusion de vapeur d'eau est dit « perspirant »

L'ÉPAISSEUR DE LAME ÉQUIVALENTE  
Sd (m)

L'épaisseur de lame équivalente indique dans quelle mesure une couche de matériau s'oppose à la progression de la vapeur d'eau.

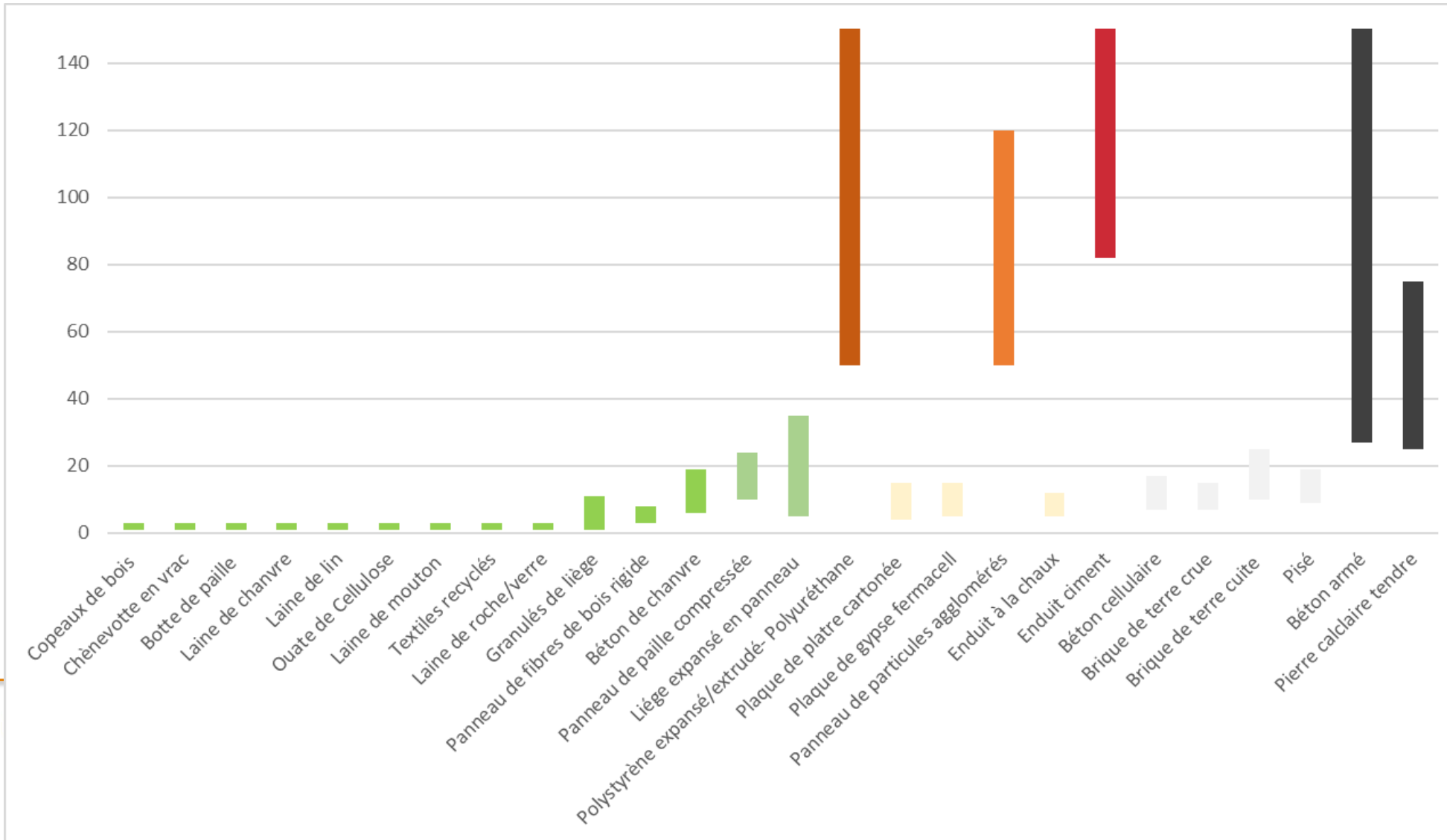
**Sd =  $\mu \cdot d$**  où d : épaisseur en mètres

**Plus  $\mu$  et Sd sont faibles, plus la vapeur d'eau se déplace facilement.**

On parle de paroi perspirante.

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

Exemples de coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$

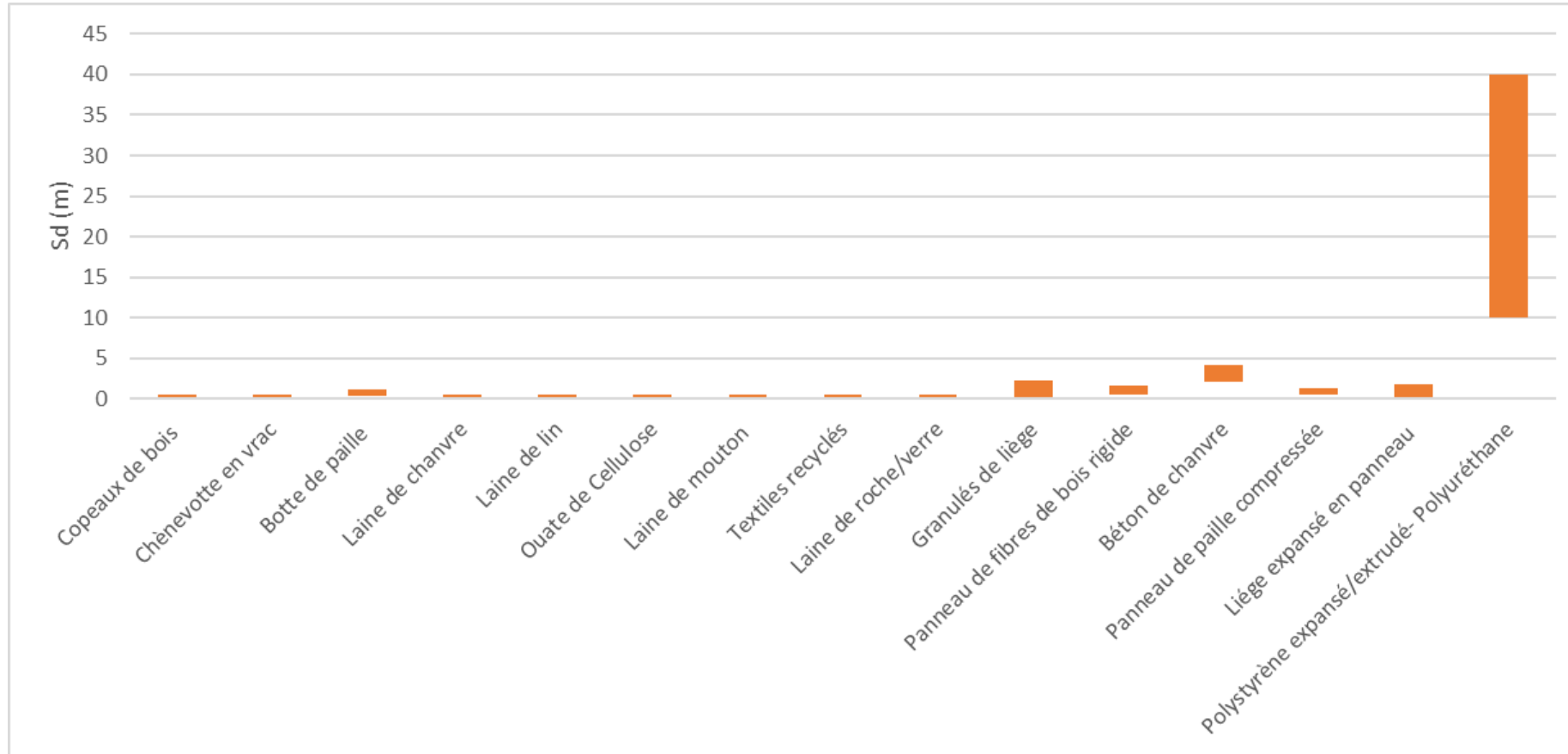


Isolants synthétiques  
(polystyrène,...) :  
 $20 < \mu < 200$

Source : Cerema Est

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

Exemples de résistances à la diffusion de vapeur d'eau Sd :



Source : Cerema Est

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

Exemples de pathologies causées par une mauvaise prise en compte des propriétés de résistance à la diffusion de vapeur d'eau des matériaux :

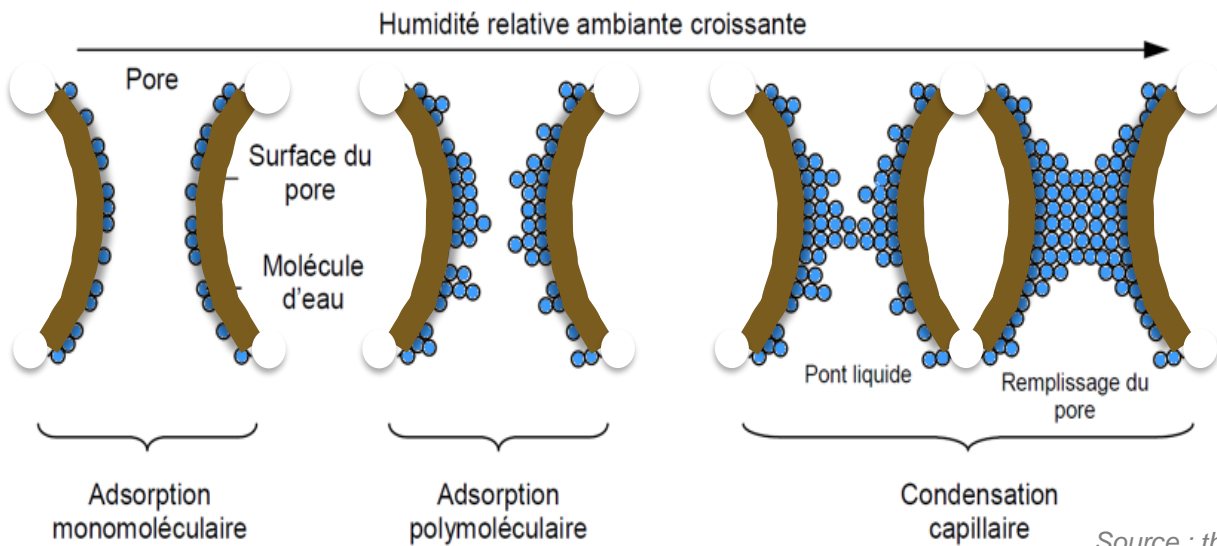


Source : CODEM Picardie

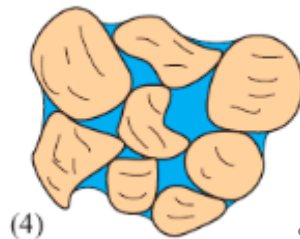
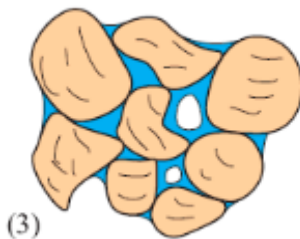
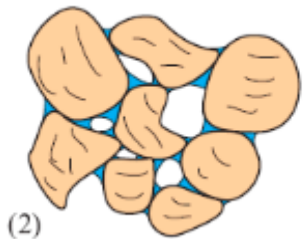
# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

## Adsorption et désorption de vapeur d'eau

Un matériau hygroscopique est un matériau possédant la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air ambiant.



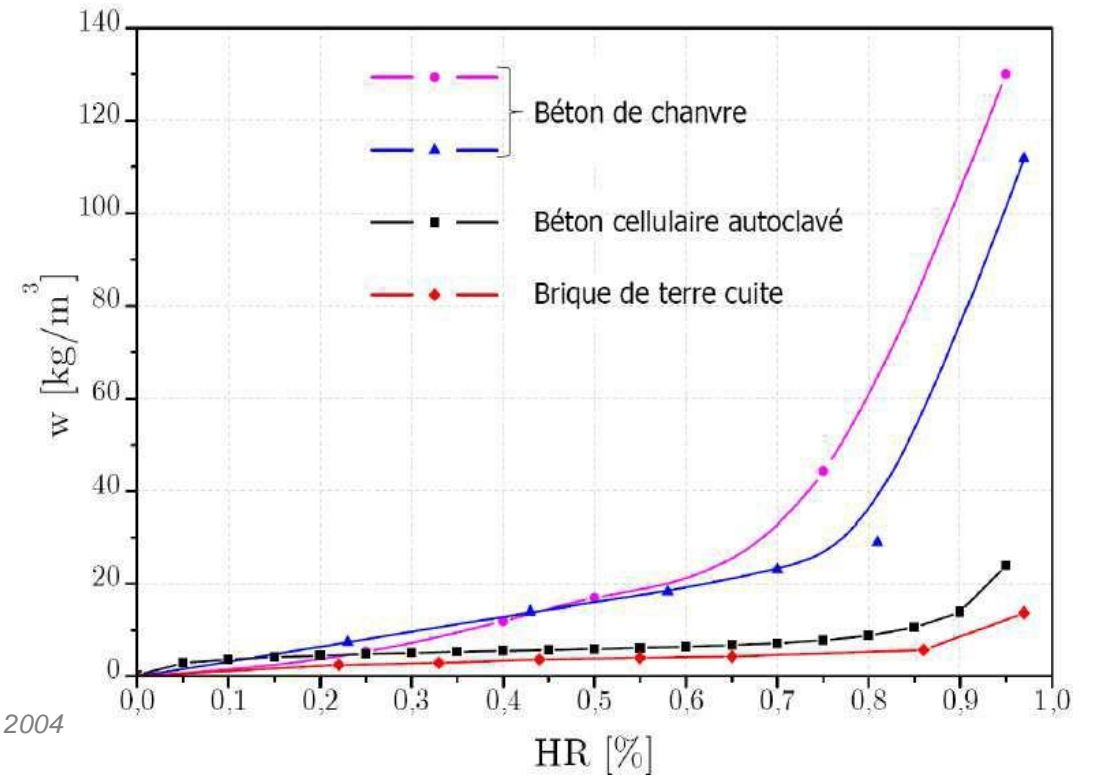
Source : thèse Collet 2004



Source : Lai 2016

Matériaux biosourcés

Isotherme d'adsorption de vapeur d'eau



Source : thèse D. Samri, 2008

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

## Valeur tampon hydrique MBV (Moisture Buffer Value)

Le MBV indique la *quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à une variation d'humidité* pendant un temps donné.

Il caractérise la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air intérieur ambiant

$$MBV = \frac{\Delta m}{A(HR_{haute} - HR_{basse})}$$

Avec :

m est la masse du matériau en kg.

A est la surface exposée de l'éprouvette en m<sup>2</sup>.

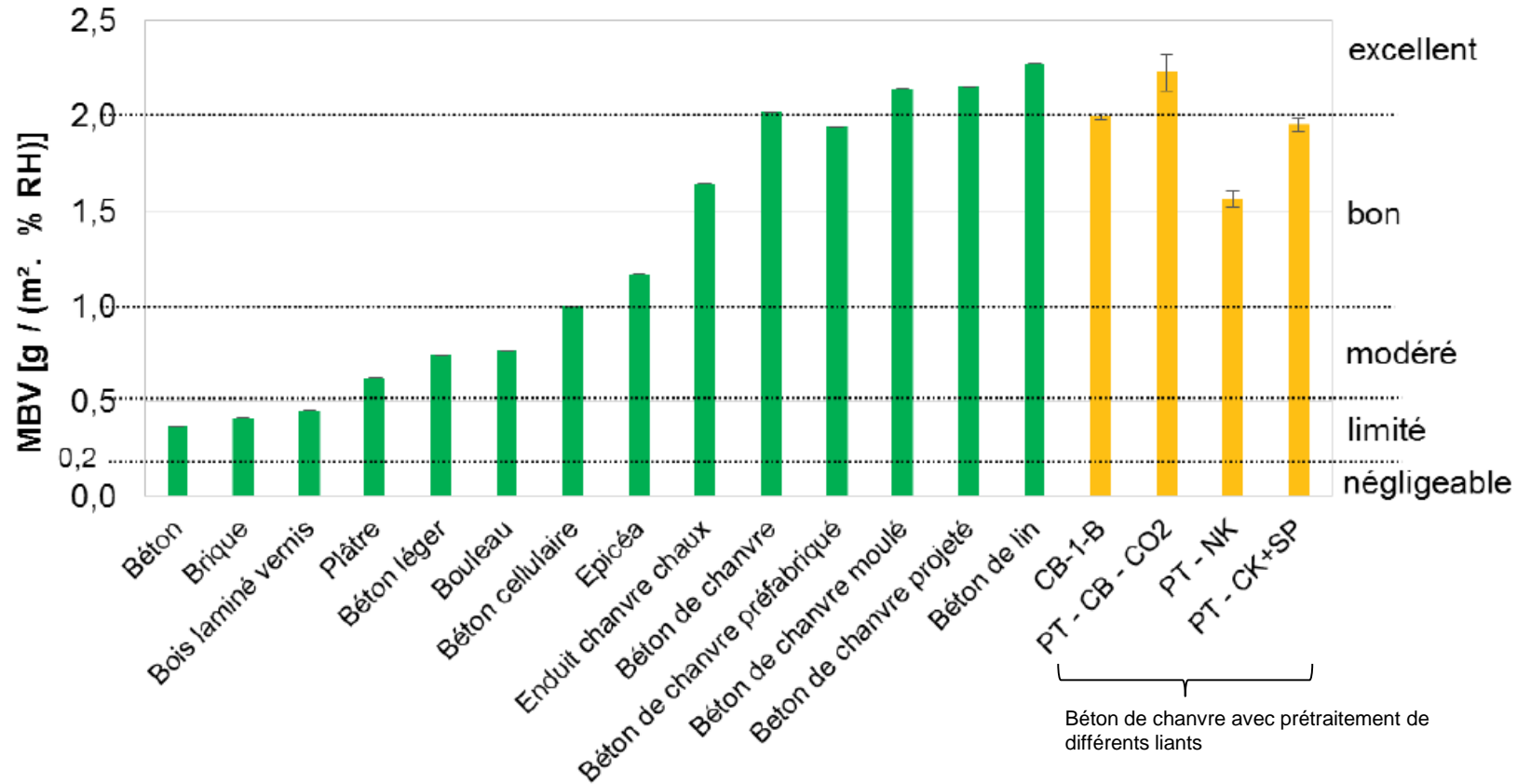
HR<sub>haute</sub> et HR<sub>basse</sub> sont les valeurs humidité relative hautes et basses en %.

Classification des MBV pratiques<sup>6</sup>

MBV expérimentale	Minimum du niveau	Maximum du niveau
	[g/(m <sup>2</sup> %HR)] à 8h/16h	
Négligeable	0	0,2
Limitée	0,2	0,5
Moyenne	0,5	1
Bonne	1	2
Excellente	2	>2

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

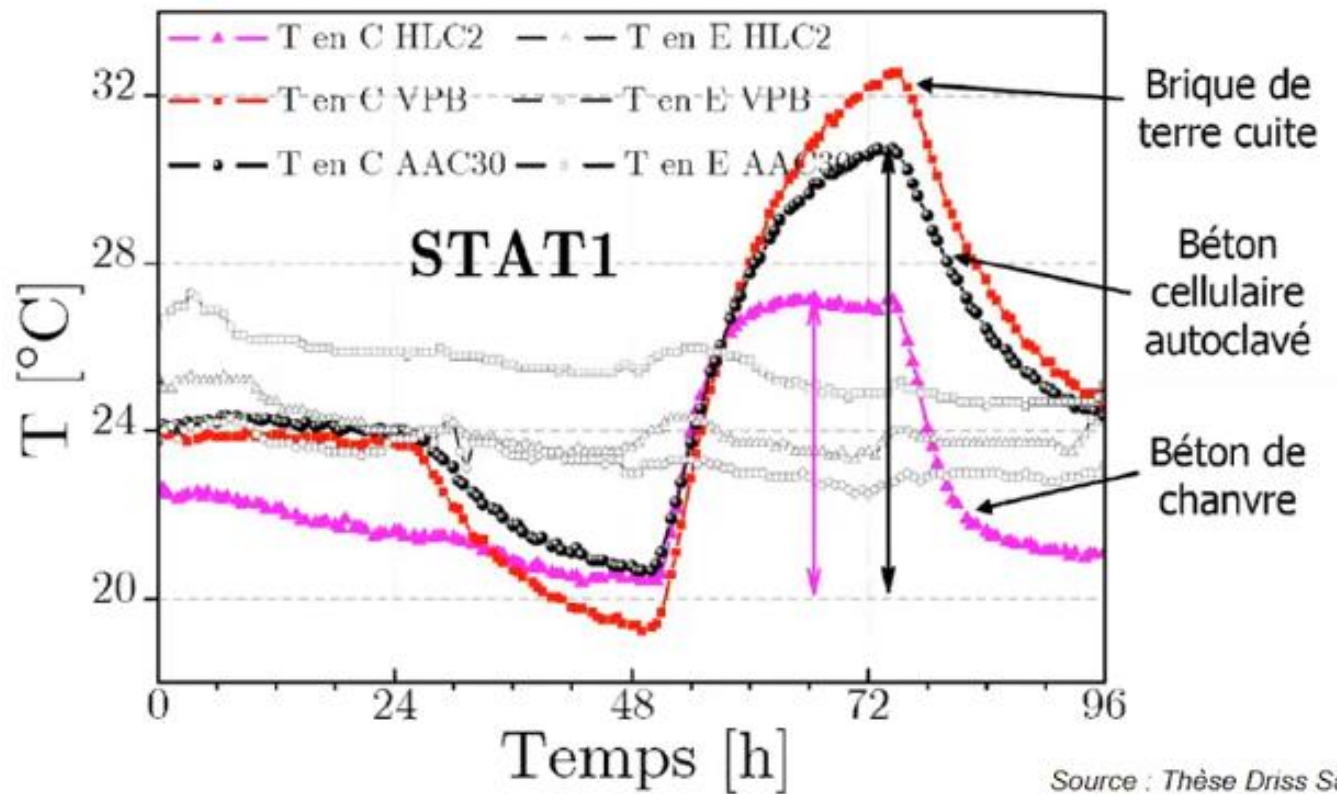
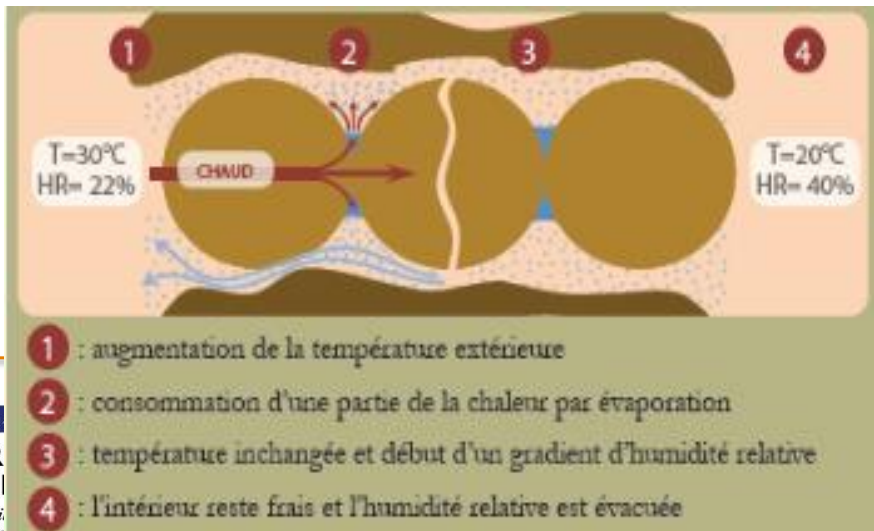
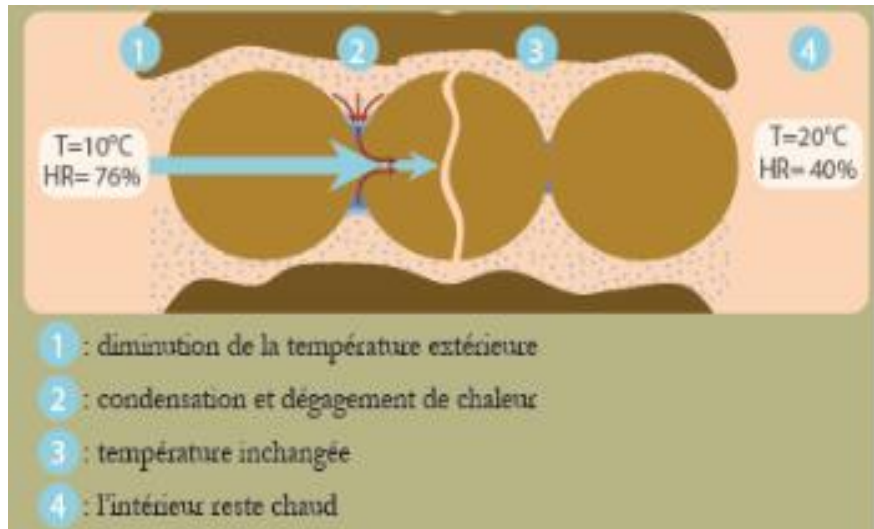
Valeur tampon hydrique MBV (Moisture Buffer Value)



Source : LMDC, Université de Toulouse, 2018

# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

Comportement hygrothermique : les effets du changement d'état de l'eau



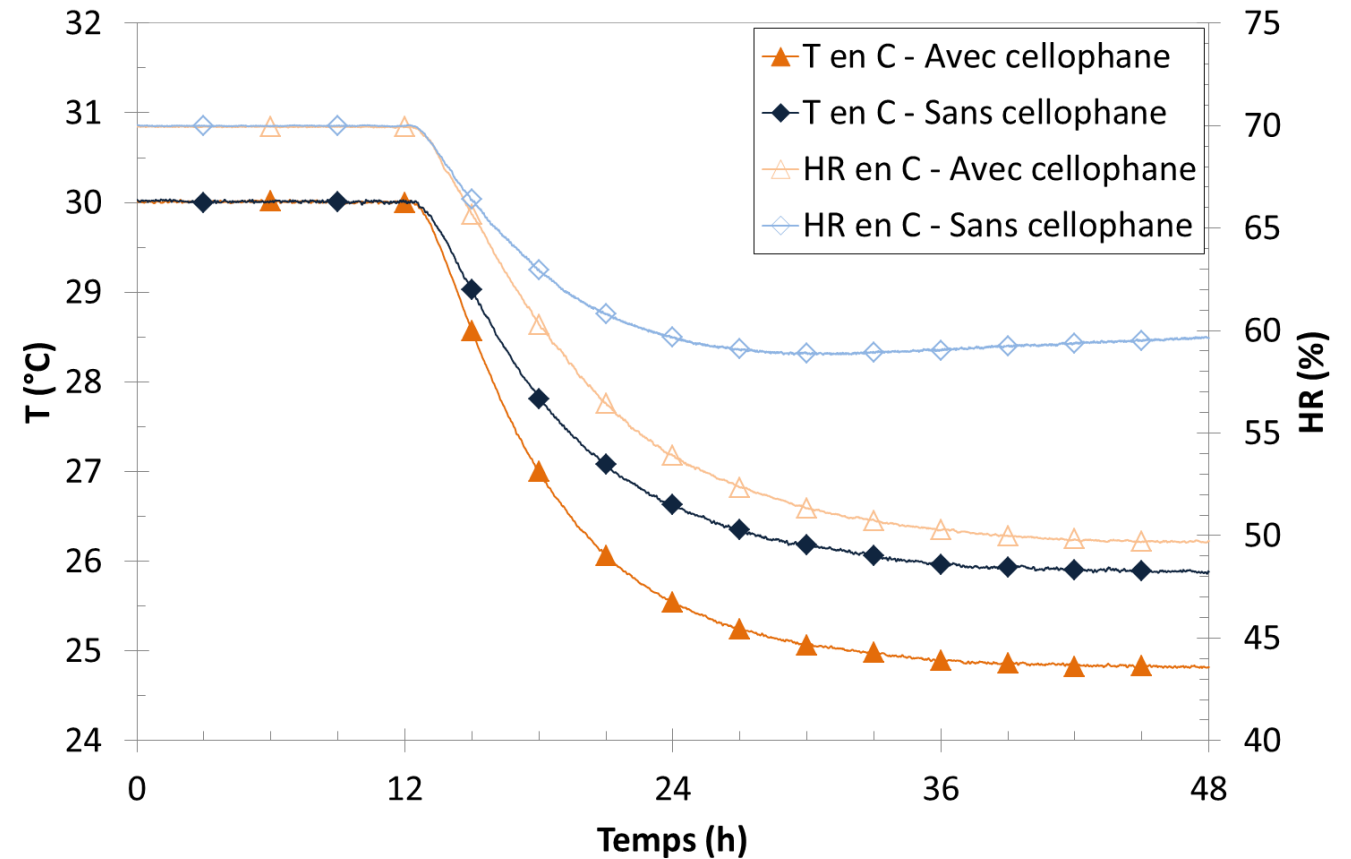
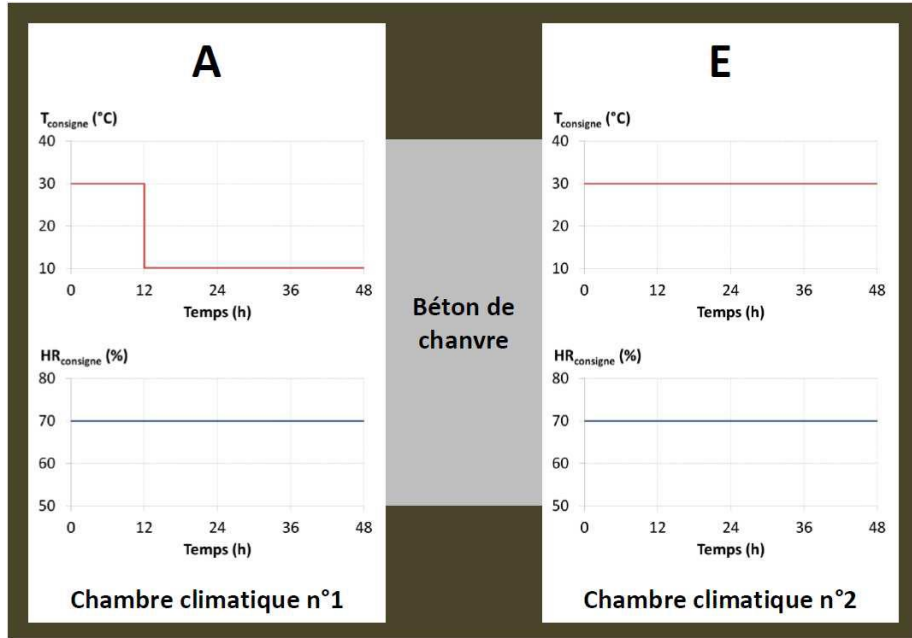
Comportement hygrothermiques des matériaux biosourcés

Source : Antonin Fabbri



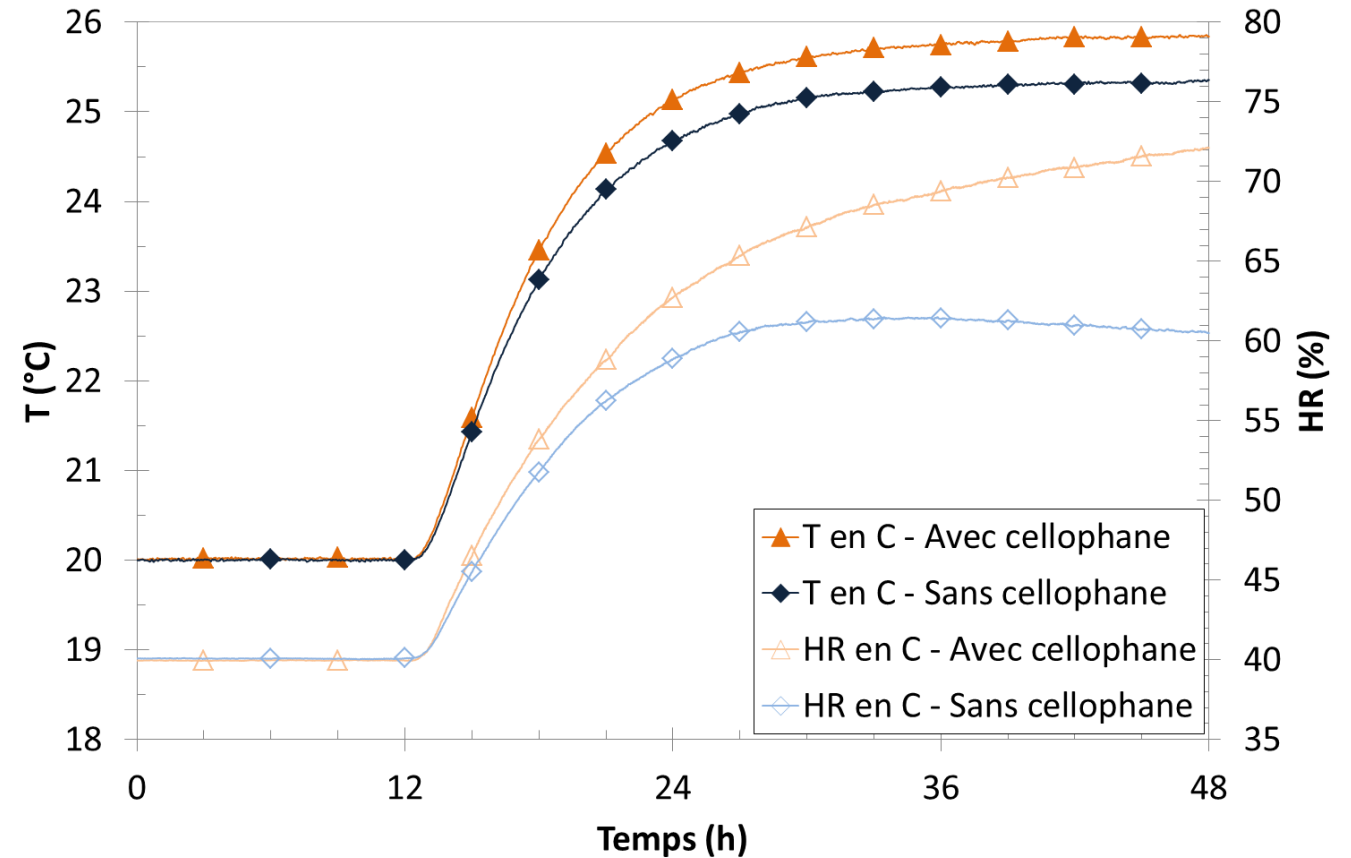
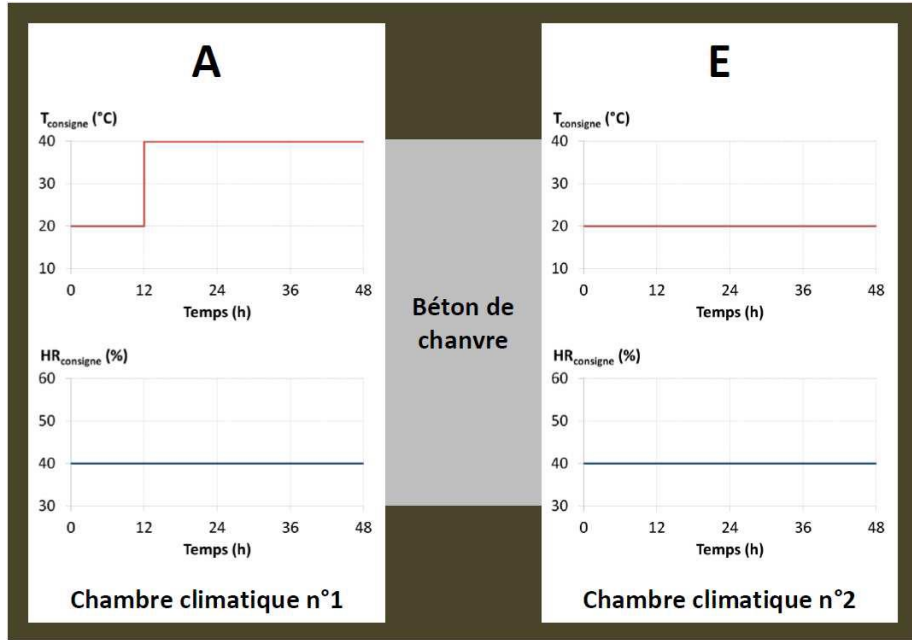
# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

## Comportement hygrothermique : impact des transferts convectifs

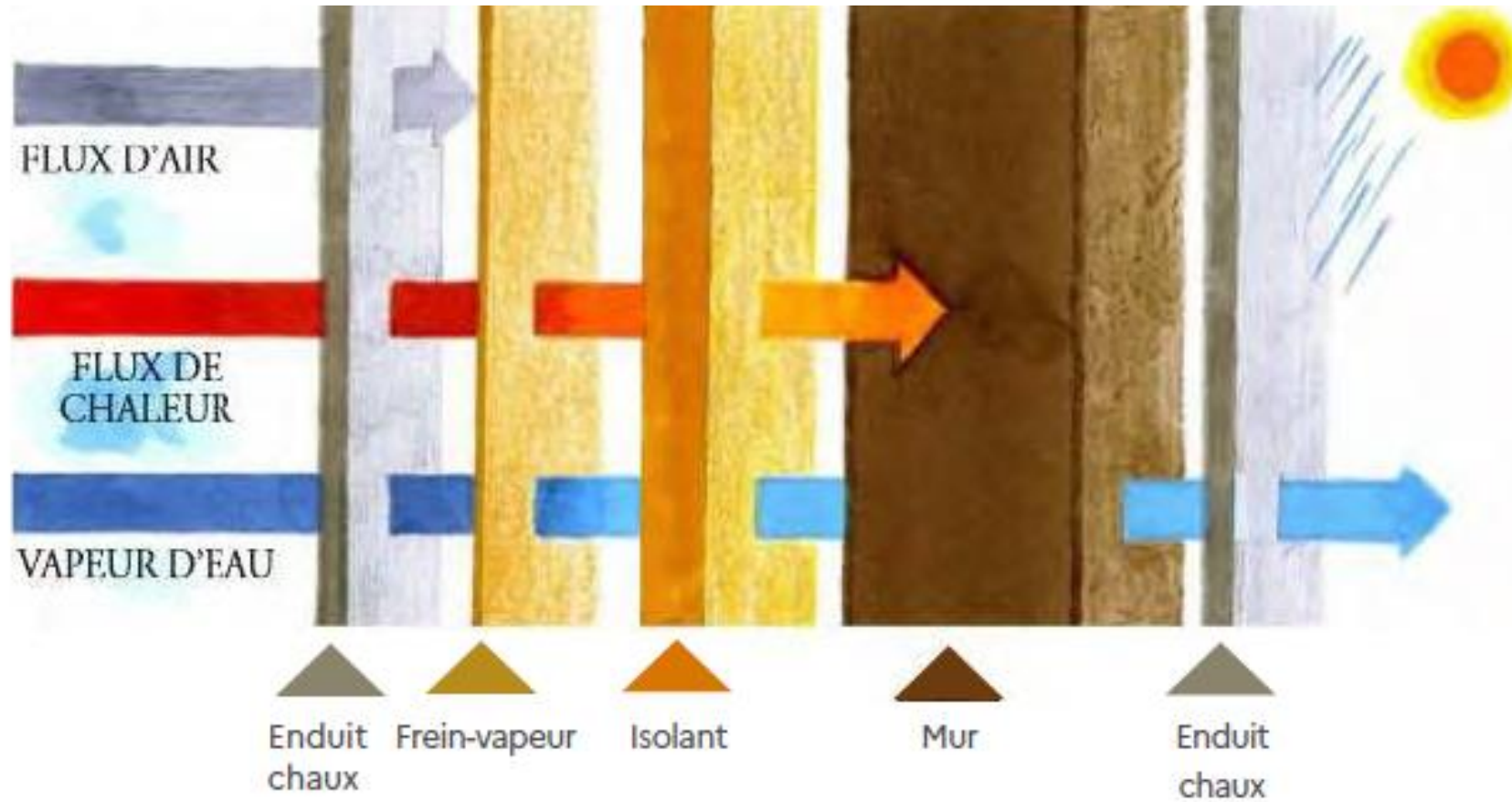


# PERFORMANCES HYDRIQUES DES BIOSOURCÉS

## Comportement hygrothermique : impact des transferts convectifs



# BILAN : UNE BONNE CONNAISSANCE DES MATÉRIAUX POUR UNE BONNE GESTION DES FLUX



Source : ATHEBA – Amélioration Thermique du Bâti Ancien

# MODÉLISATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES

Source : Dujardin et al. 2024

# MODÉLISATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES

Potentiels moteurs à l'origine des transferts couplés de chaleur et de masse

Driving potential	Model's name
Partial pressure	Hagenhoft [15]
Moisture content	Kong [16], Philip and de Vries [11], Whitaker [17], Mendes [13,18]
Capillar pressure	Pedersen [19], Qinru Li [20], Luikov [21]
Relative humidity	Künzel [6], Liu [22]
Humidity in the air	Budaiwi [23], Guo
Vapour density	Qin [24,25]
Logarithm of vapour pressure	Uittenbosch

# MODÉLISATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES

## Modèle de Kunzel (implémenté dans WUFI)

Potentiel moteur : température et humidité relative  
Transferts liquide et vapeur décrits par la loi de Fick

Capacité de stockage de chaleur

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla(\delta_P \nabla(\varphi P_{sat}))$$

Chaleur latente de vaporisation de l'eau

Perméabilité à la vapeur d'eau

Capacité de stockage d'humidité

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi) + \delta_P \nabla(\varphi P_{sat})$$

Coefficient de conduction liquide

Pression de vapeur saturante de l'eau

# MODÉLISATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES

## Modèle de Liu

Potentiels moteurs : température et humidité relative

Transferts liquide décrit par la loi de Darcy et vapeur décrit par la loi de Fick

$$(\rho_m c_{p,m} + c_{p,l} w) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \left( \lambda + h_{lv} \delta_P \phi \frac{dP}{dT} \right) \nabla T + h_{lv} \delta_P P_{sat} \nabla \phi \right)$$

Capacité de sorption

Perméabilité à la vapeur d'eau

$$\xi \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \left( \delta_P \phi \frac{dP_{sat}}{dT} + K_l \rho_l R_D \ln(\phi) \right) \nabla T + \left( \delta_P P_{sat} + K_l \rho_l R_D \frac{T}{\phi} \right) \nabla \phi \right)$$

Perméabilité à l'eau liquide

Densité de l'eau liquide

# MODÉLISATION DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES

## Modèle de Mendes

Basé sur le modèle de Philip et de Vries (1957) : premier modèle de transferts couplés de chaleur et de masse dans les sols

Masse volumique

Chaleur latente de vaporisation de l'eau

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + L \cdot \nabla (D_{T,vap} \nabla T + D_{\theta,vap} \nabla \theta)$$

Capacité thermique

Coefficient de diffusion de vapeur d'eau sous gradient thermique

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (D_T \nabla T + D_\theta \nabla \theta)$$

Coefficient de conduction liquide sous gradient thermique



*Merci de votre attention*

Etienne GOURLAY  
Responsable d'études scientifiques « Performances des Matériaux Biosourcés »  
etienne.gourlay@cerema.fr

---