



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

# Comportement hygrothermique des matériaux biosourcés et géosourcés

## Phénoménologie

Florence COLLET [florence.collet@univ-rennes1.fr](mailto:florence.collet@univ-rennes1.fr)

Antonin FABBRI [antonin.fabbri@entpe.fr](mailto:antonin.fabbri@entpe.fr)



# INTRODUCTION



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

- Utilisation des matériaux biosourcés dans le bâtiment (hors bois d'œuvre)



Al-environnement.fr



www.eco-aud.com

## isolants

(laines de fibres végétales ou animales, de textile recyclé, ouate de cellulose, chènevotte, anas, bottes de paille, etc.),

## mortiers et bétons

(béton de chanvre, de bois, de lin, etc.),



www.terrevivante.org

## Matériaux bio-sourcés dans le bâtiment

(hors bois d'œuvre)

## matériaux composites plastiques

(matrices, renforts, charges),

## chimie du bâtiment

(colles, adjuvants, peintures, etc.),

## panneaux

(particules ou fibres végétales, paille compressée, etc.),



Peinture Algo



Heraklith

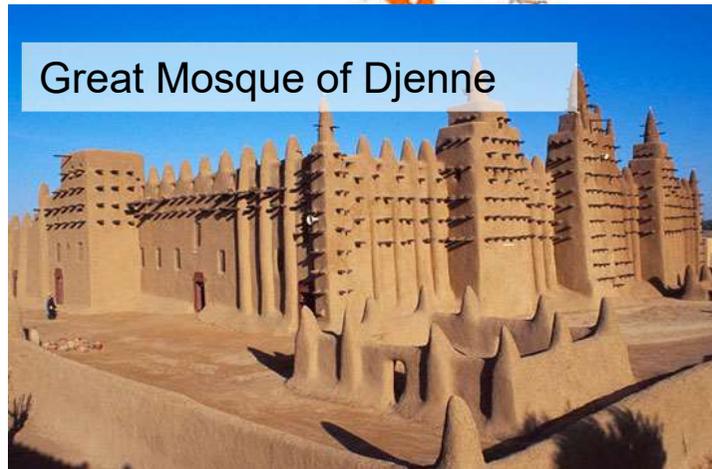
2



# INTRODUCTION



- Utilisation des matériaux géosourcés dans le bâtiment



# INTRODUCTION



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

- Utilisation des matériaux géosourcés dans le bâtiment



L'orangerie – Lyon (France) - 2020  
Masson : Nicolas Meunier  
Architect : Clement Vergely



○ Site du patrimoine mondial  
■ Zone construite en terre



Winner of Terra Award - 2016  
Architect : Edra arquitectura km0

Source : CRATerre, ENSAG

# INTRODUCTION



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## • Principe de fabrication des bétons biosourcés

### Composition



### Mélangeage

malaxeur – bétonnière  
vis mélangeuse...



### Mise en forme

moulage simple  
moulage par compaction  
projection



<http://ak-bois.fr/b%C3%A9ton-de-chanvre.html>



<https://www.solution-biosys.fr>



Construire en chanvre

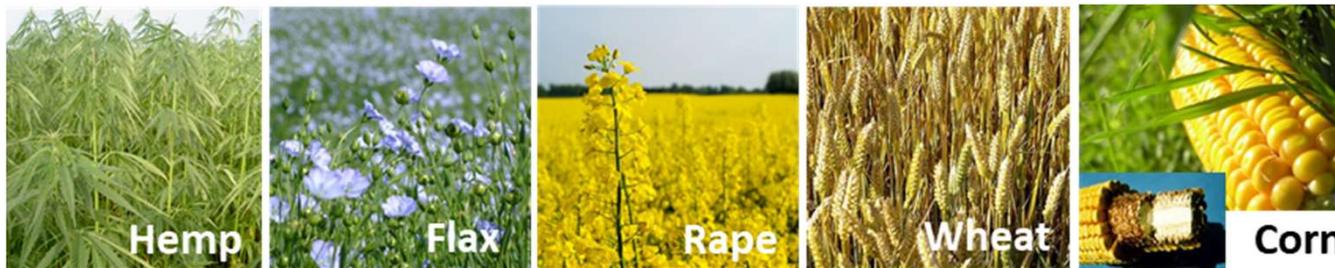
Projection Espace Eco-Chanvre, Noyal sur Vilaine, 17/04/2013

# INTRODUCTION



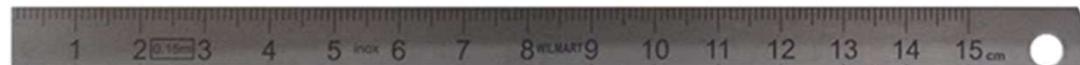
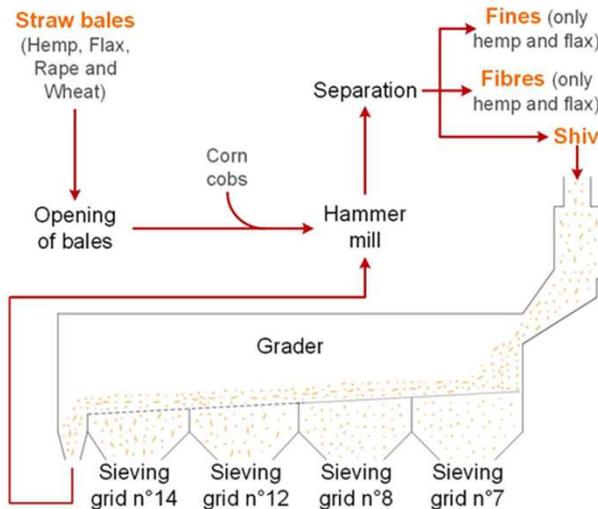
- Une grande variété de matériaux biosourcés

Exemple d'agro-ressources :



■ ■ ■

## Différentes granulométries



[Viel et al., 2018]

# INTRODUCTION



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## • Les matrices liantes

Sur le marché

- Ciment Portland
- Ciment Prompt
- Chaux aériennes ou hydrauliques  
Le + souvent associées à des additions pouzzolaniques
- Liants commerciaux développés spécifiquement pour le béton de chanvre  
(ex. 70% chaux aérienne, 15% chaux hydraulique, 15% pouzzolane)
- Plâtre (applications protégées de l'humidité)



Recherche

- Terre, valorisation de fines de lavage
- Métakaolin
- Amidon de blé...



# INTRODUCTION

- Principe de fabrication des murs en terre crue



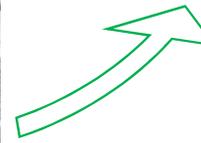
GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Récupération de la terre...  
près du site de construction !



Conditionnement  
(si nécessaire)



Bauge



Adobe



Pisé

Fabrication



Résultat



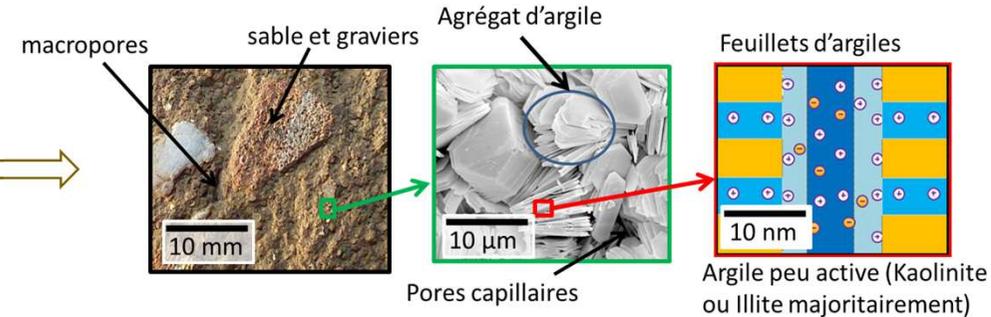
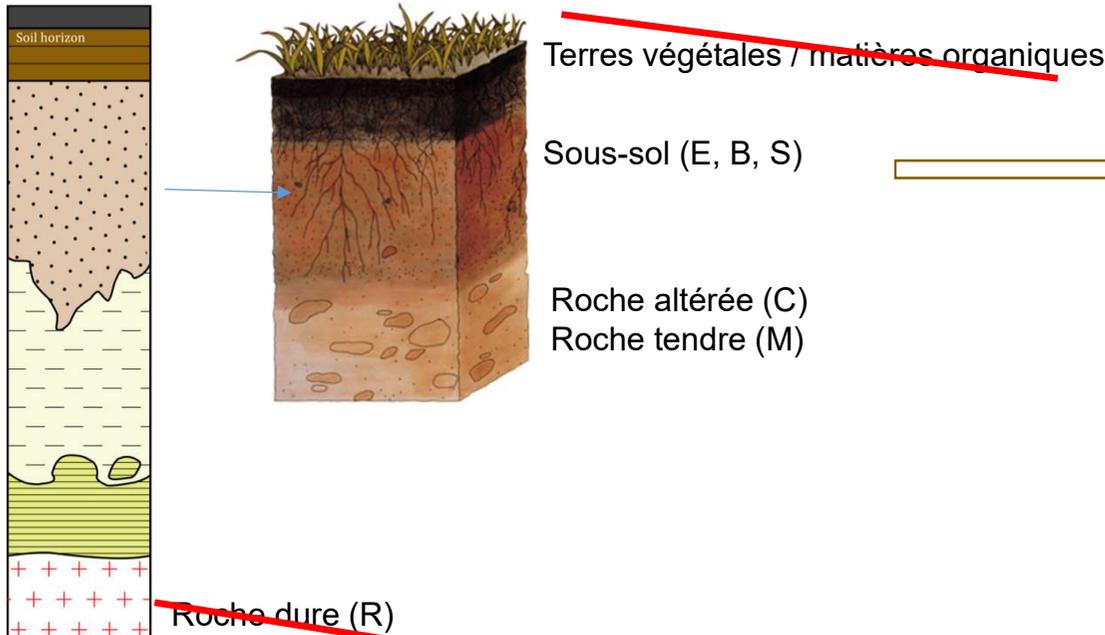
# INTRODUCTION



- **La terre** Terre crue : matériau naturel issu du sol ou du sous-sol, utilisé cru, et dont la cohésion est assurée par la présence d'argiles.

- ✓ le matériau est prélevé entre 20cm et 40cm en dessous de la surface du sol: l'utilisation de la couche de surface, composée de matière organique, augmenterait le risque de moisissure et de colonisation par les plantes.

- ✓ Terre = **argile** + **limons** + **sable** (+ **graviers**)



**Mais,**

- ✓ Toutes les terres ne conviennent pas pour la construction
- ✓ La nature des terres acceptable pour construire peut varier en fonction des techniques constructives

# Plan du cours



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

- Présentation des milieux poreux
- Transferts et stockage de chaleur
- L'humidité dans les milieux poreux
- Transferts couplés de masses et de chaleur

# Présentation des milieux poreux

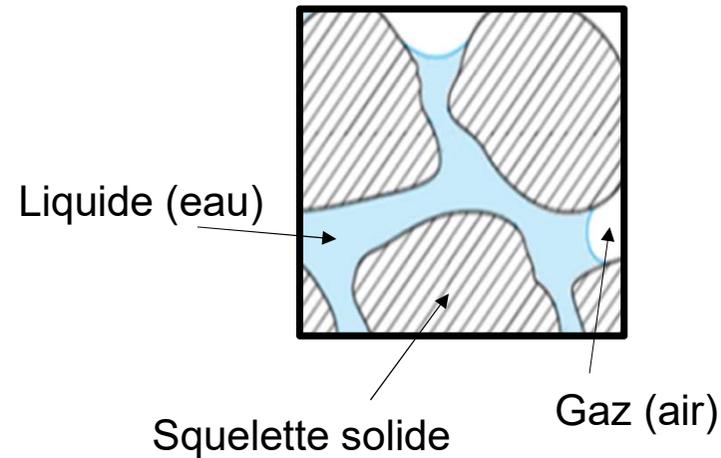


- Quelques définitions

Masse volumique sèche :  $\rho_d = \frac{m_S}{V}$

Masse volumique du squelette :  $\rho_S = \frac{m_S}{V_S}$

Porosité :  $n = \frac{V_G + V_L}{V}$

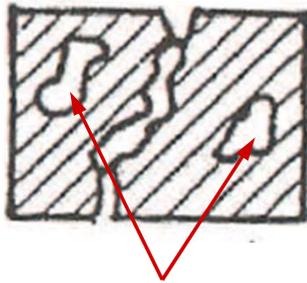


Slideshare.net

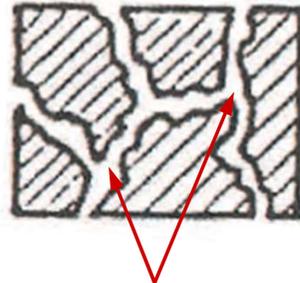
# Présentation des milieux poreux



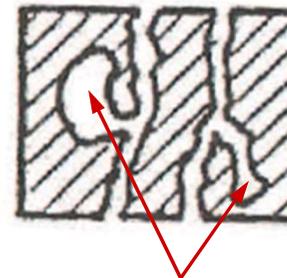
- Les différents types de pores



Pores fermés



Pores  
interconnectés



Pores aveugles

- Porosité **fermée** :

⇒ pas de transfert ni de stockage de l'humidité

- Porosité **ouverte** :

- Pores **interconnectés** ⇒ transfert et stockage de l'humidité
- Pores **aveugles** ⇒ stockage de l'humidité uniquement

# Présentation des milieux poreux



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

- Les différentes tailles de porosité

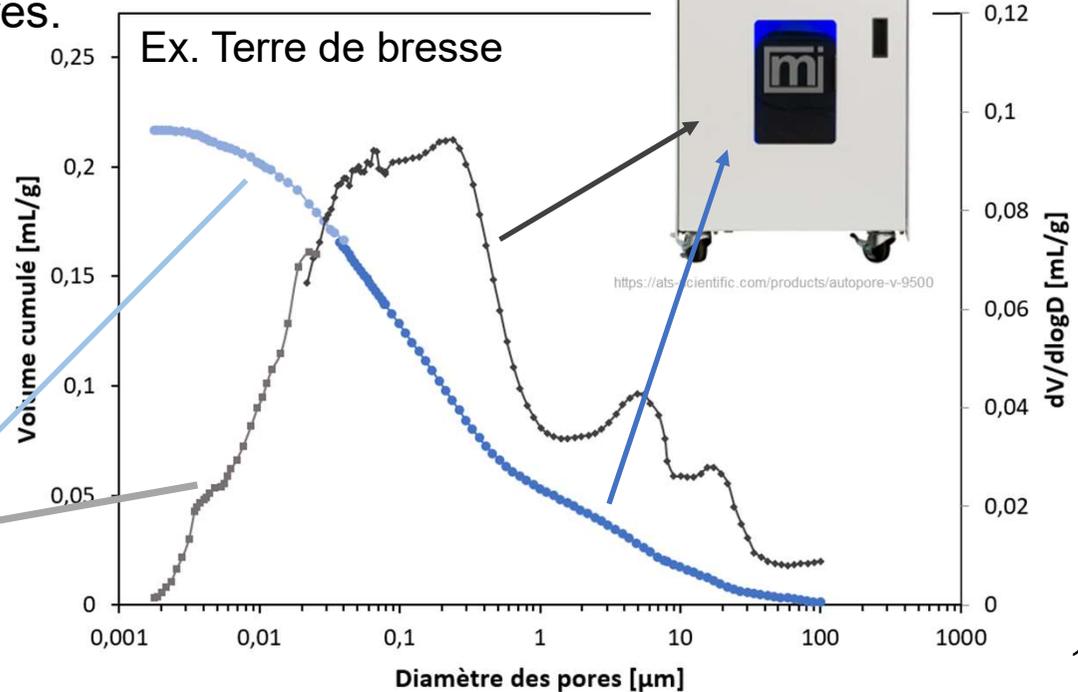
Classification de l'IUPAC (1994):

- diamètre supérieur à 50 nm : macropores,
- diamètre compris entre 2 et 50 nm : mésopores,
- diamètre inférieur à 2nm : micropores.

Porosimétrie par adsorption d'azote  
Méthode BJH



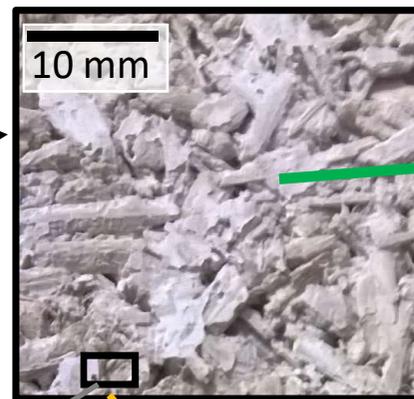
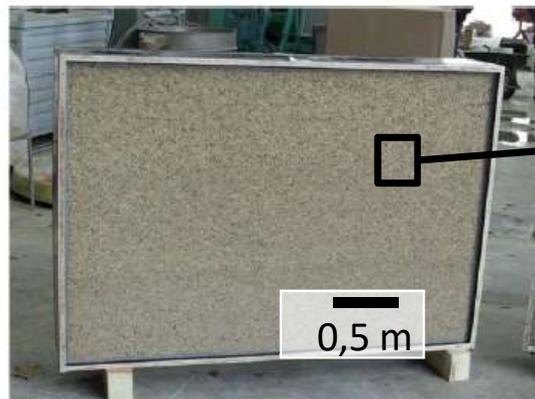
Porosimétrie par intrusion de mercure



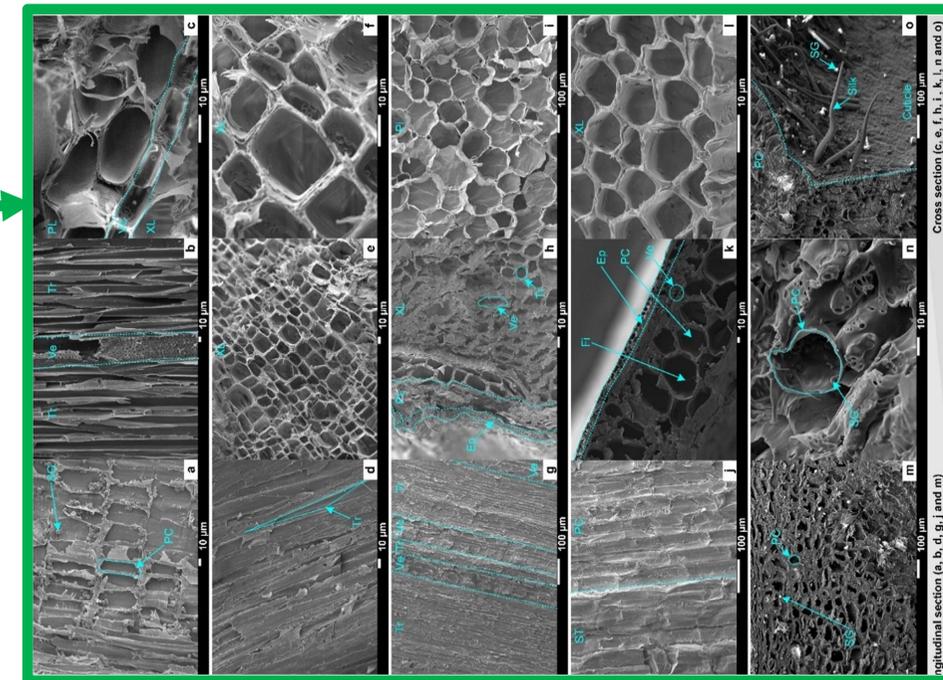
# Présentation des milieux poreux



- Une (micro)-structure complexe et variée



Chanvre Lin Colza Blé Maïs



Agroressources

Liants hydrauliques

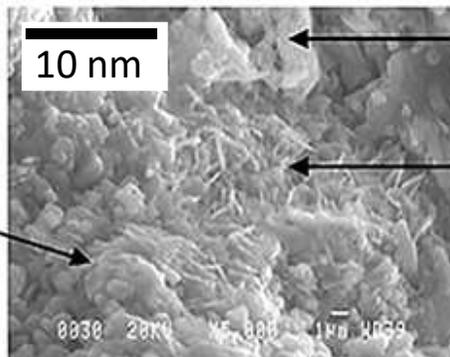
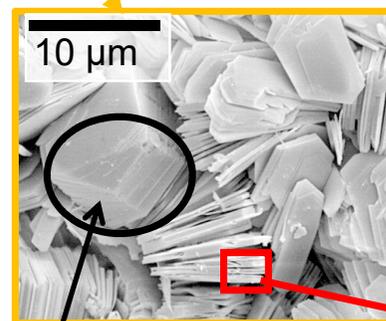
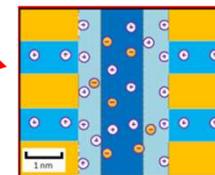


Plate-like Crystal  
Needle-shape Crystal

Terre



Agrégats d'argile



Feuillets d'argiles

# Transferts et stockage de chaleur



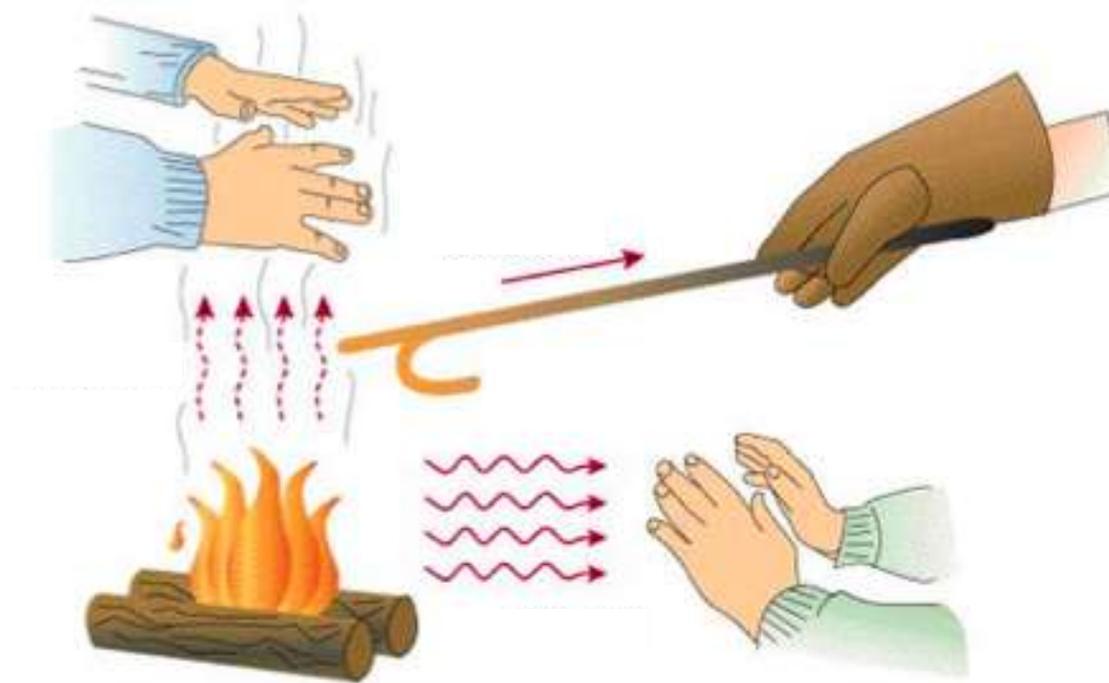
GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



# Transferts et stockage de chaleur



- Généralités



- Par interaction directe :
  - A l'échelle microscopique : **Conduction**
  - A l'échelle macroscopique : **Convection**
- A distance (sans support matériel): **Rayonnement**

# Transferts et stockage de chaleur

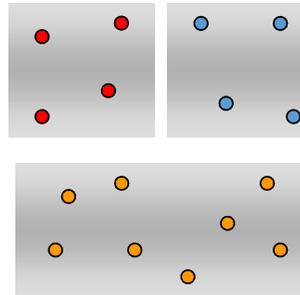


## • Transfert de chaleur par conduction

- Lorsqu'on chauffe une barre à une extrémité, la chaleur se propage dans la barre par **conduction**.



- Dans une zone chaude, l'agitation moléculaire est importante.



- Dans une zone plus froide, l'agitation moléculaire est plus faible.

- Lorsque les deux zones sont mises en contact, l'énergie cinétique des constituants de la zone chaude est transférée vers les constituants de la zone la plus froide pour tendre vers un équilibre.

# Transferts et stockage de chaleur



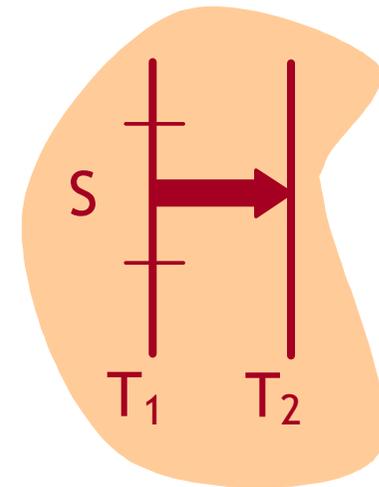
- Transfert de chaleur par conduction

- **Conduction** = Transmission de chaleur par **vibration moléculaire** (sans déplacement de matière),

au sein des **solides** et des **fluides au repos**

du point de température la plus élevée

au point de température la plus faible.



*Rq. 1 : C'est le **seul** mode de transfert de chaleur dans un milieu **solide opaque**.*

*Rq. 2 : Souvent **négligeable** devant la convection et le rayonnement dans les **fluides**.*

# Transferts et stockage de chaleur



- Transfert de chaleur par convection



- Transmission de chaleur par **mouvement de particules** entre un **solide et un fluide en mouvement.**

⇒ A l'interface solide/fluide, transfert de chaleur par conduction.

⇒ Dans le fluide, transport de chaleur par les particules chaudes qui se mélangent aux particules plus froides.

⇒ Transfert par convection intimement lié au **mouvement du fluide**, donc au **régime d'écoulement** (laminaire ou turbulent).

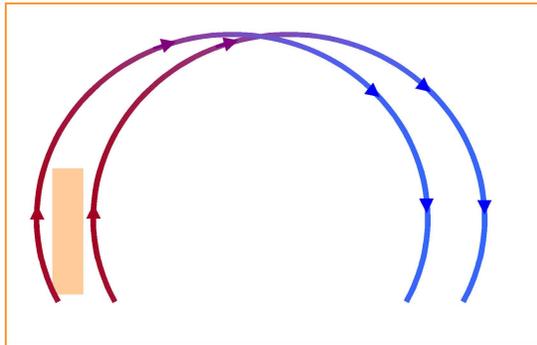
# Transferts et stockage de chaleur

- Transfert de chaleur par convection

- Convection naturelle

Mouvement dû à  
une force **naturelle**

(liée à une différence de densité  
résultant d'une variation de  
température au sein du fluide)

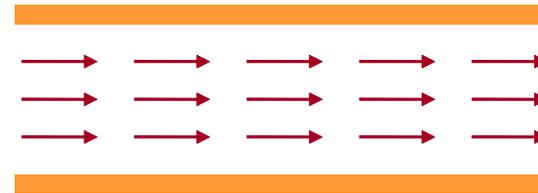


Vitesse d'écoulement  
en convection naturelle  
& efficacité

- Convection forcée

Mouvement dû à  
une force **extérieure**

(pompe, ventilateur, vent...)



Vitesse d'écoulement  
en convection forcée  
& efficacité

<<



# Transferts et stockage de chaleur



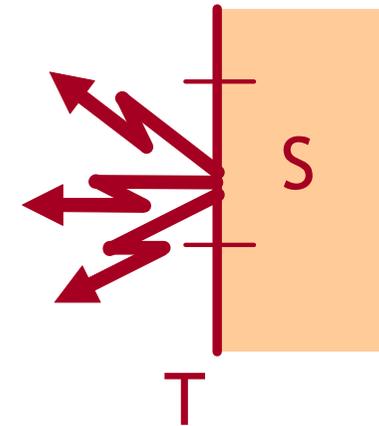
- Transfert de chaleur par rayonnement

- Corps **excité** (température, champ électrique)

- ↳ **Émission d'énergie**

- par **rayonnement électromagnétique**

- au détriment de l'énergie interne du corps.



# Transferts et stockage de chaleur



- Transfert de chaleur par rayonnement

- Lorsque la **température augmente** :

- ↳ La quantité d'**énergie émise augmente**,

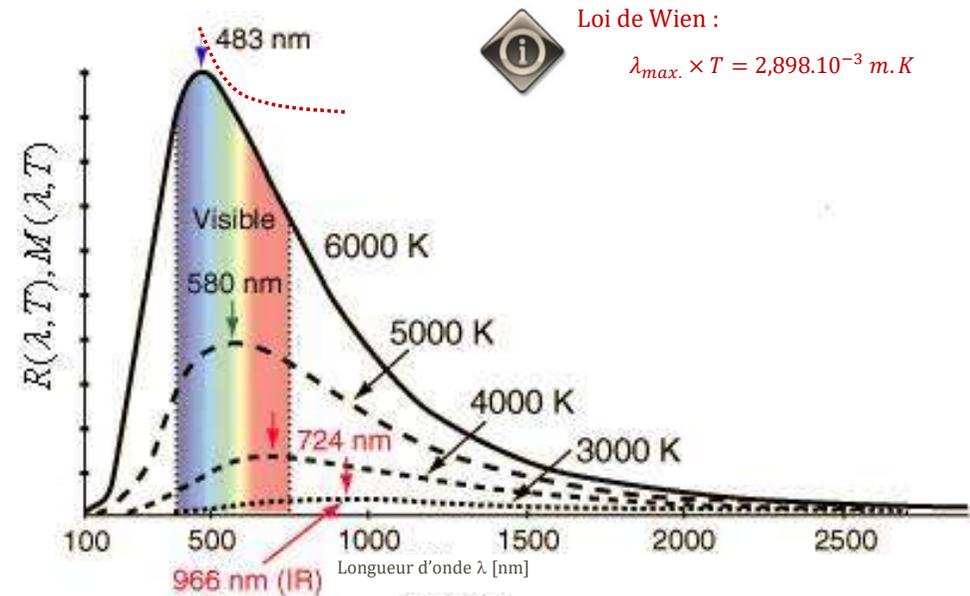
- ↳ Le **spectre d'émission se déplace** de l'infrarouge vers le bleu.

Ex = morceau de fer.

⇒ Lorsqu'il est **froid**, le fer n'émet pas de lumière visible ; il s'agit d'un rayonnement infrarouge invisible à l'œil nu (longueur d'onde >700 nm).

⇒ Si on le **chauffe**, il devient rouge et on commence à apercevoir une émission de lumière dans la partie rouge du spectre visible (400 nm à 700 nm).

⇒ Si on augmente encore la température, il devient jaune, puis blanc et enfin bleu.



# Transferts et stockage de chaleur



- Transfert de chaleur par rayonnement

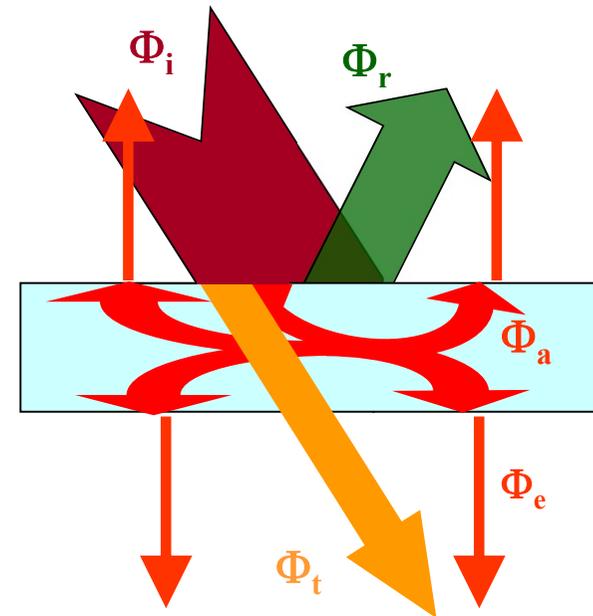
- **Propagation :**

- ⇒ en ligne droite
    - ⇒ à la vitesse de la lumière
    - ⇒ sans support matériel

- **Réception**

- Flux incident ( $\Phi_i$ ) en partie
      - Réfléchi ( $\Phi_r$ ),
      - Transmis ( $\Phi_t$ ),
      - Absorbé ( $\Phi_a$ )  
(dégradé en chaleur puis réémis).

Répartition selon les propriétés du récepteur.



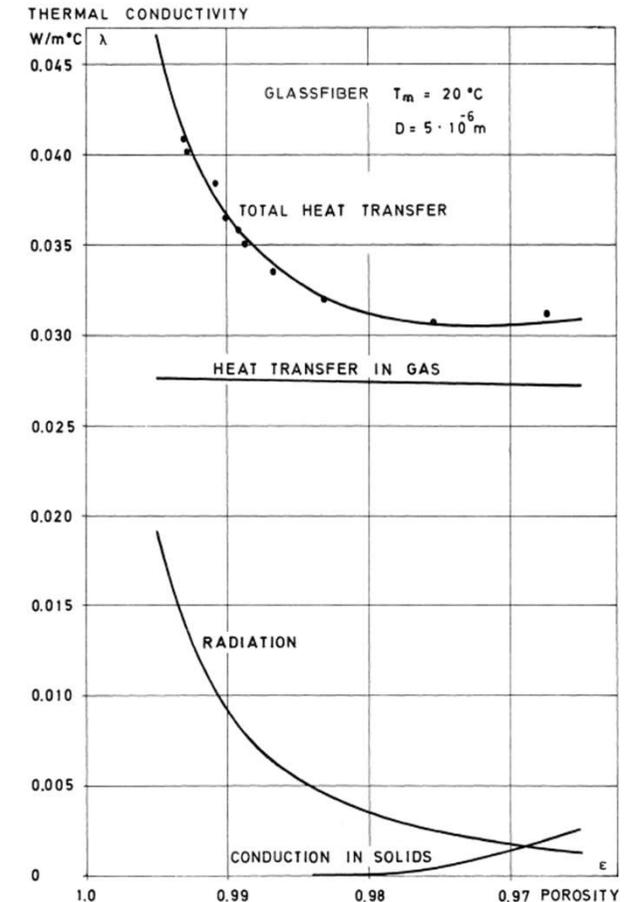
# Transferts et stockage de chaleur

## • Transfert de chaleur dans les matériaux

- **Conduction** dans la matrice solide et dans les phases fluides (=prépondérante)
- **Convection** dans les phases fluides (dans la plupart des matériaux  $\Rightarrow$  taille des pores suffisamment faible pour que les échanges thermiques convectifs soient négligeables)
  - Se déclenche si  $Ra (=Gr.Pr) > 4\pi^2$  ; ex Béton chanvre  $Ra \approx 3$  [Collet et Pretot, 2014]
- **Rayonnement** (freiné par la matrice solide - négligeable dans les matériaux de porosité faible ou moyenne ( $\leq 0.9$ ))
  - Ex. Béton chanvre  $\lambda_{ray} \approx 0.06$  mW/(m.K) [Collet et Pretot, 2014]



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



**Cas particulier des isolants fibreux :**  
phénomènes de transferts de chaleur dans une laine  
de verre en fonction de la porosité [Bankvall 1973] 24



# Transferts et stockage de chaleur



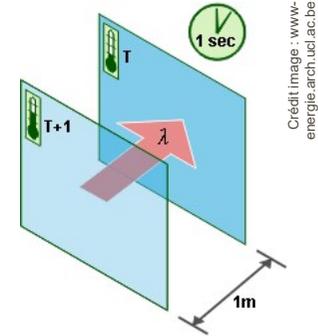
GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## • Transfert de chaleur dans les matériaux

### □ Conductivité thermique $\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

Caractérise l'aptitude d'un matériau à **transférer** plus ou moins bien la chaleur. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage :

- en 1 seconde,
- à travers  $1 \text{ m}^2$  de matériau,
- de 1m d'épaisseur,
- lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K.



⇒ grandeur apparente qui intègre les différents modes de transfert cités précédemment



Coefficient  $\lambda$  valable **uniquement** pour les matériaux **homogènes**.

Dans les matériaux hétérogènes : transferts simultanés par conduction, convection et rayonnement.

On donne alors directement la **résistance thermique** des matériaux.

# Transferts et stockage de chaleur



- Transfert de chaleur dans les matériaux

- Conductivité thermique  $\lambda$  : ordre de grandeur

- ⇒ Métaux

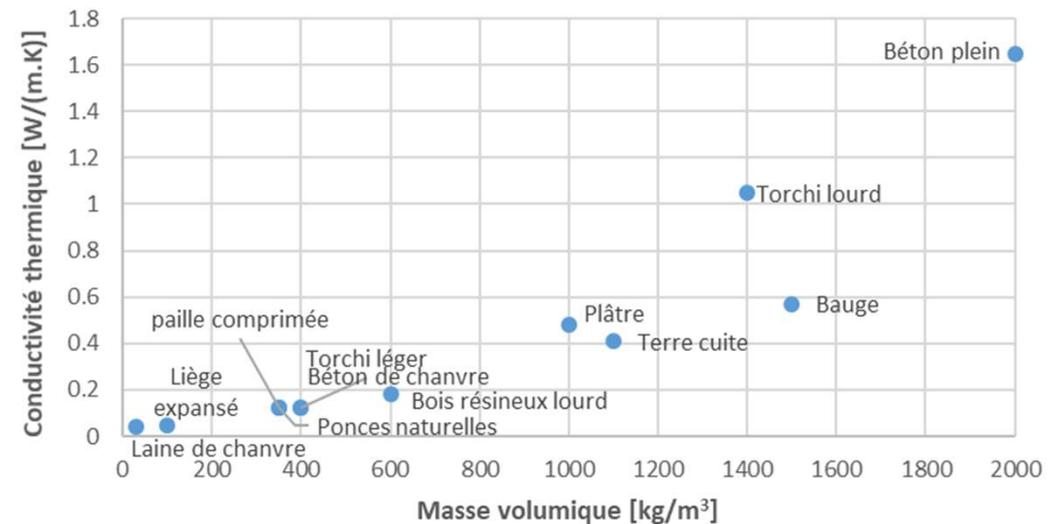
Cuivre 380 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Aluminium 200 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Acier doux 45-50 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Acier inox 18 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
--	---	--	---

- ⇒ Matériaux de génie civil

Béton 1.5-2 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Verre 1.15 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Plâtre 0.35-0.8 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Bois 0.15 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
---	--	---	---

- ⇒ Matériaux isolants de génie civil

Polystyrène 0.044 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Laine de Verre, de roche, de chanvre 0.036-0.044 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Liège expansé 0.040 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Polyuréthane 0.029 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
---	---	---	--



- De façon générale, la conductivité augmente avec la masse volumique

- ⇒ Plus la porosité est élevée,

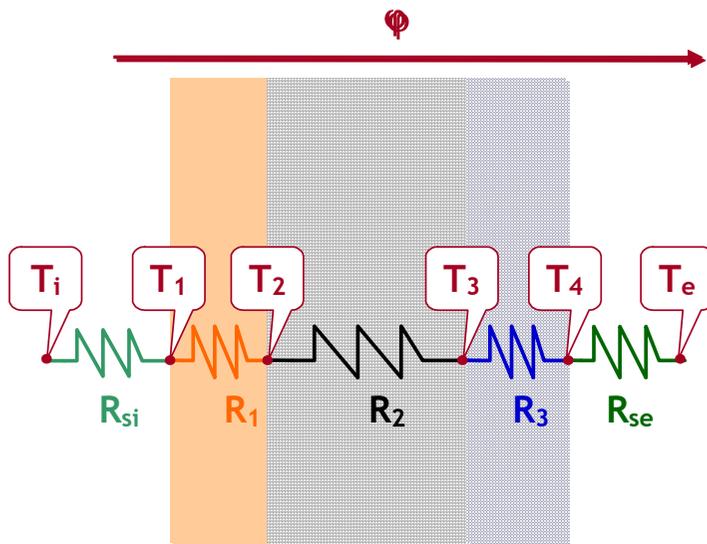
- ⇒ Plus la conductivité thermique est faible

# Transferts et stockage de chaleur



- Transfert de chaleur à l'échelle de la paroi

## ⇒ Configuration multicouche



- Résistance thermique surfacique totale de la paroi :

$$R_{tot} = R_{si} + \underbrace{\sum R_i}_{\text{Résistance interne}} + R_{se} \quad \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

- Coefficient de transmission surfacique :

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- Flux surfacique à travers la paroi :

$$\varphi = U(T_i - T_e) \quad \text{W} / \text{m}^2$$

# Transferts et stockage de chaleur



- Stockage de chaleur sans changement de phase

## Capacité thermique

- Quantité de **chaleur échangée** par un corps de masse  $m$  lorsque sa **température évolue** d'une température initiale  $T_A$  à une température finale  $T_B$ , **sans changement d'état**, pour une transformation **à pression constante**.

- En considérant  **$c_p$  constant** avec la température :

$$Q_p = m c_p (T_B - T_A)$$

- **$c_p$  : chaleur massique à pression constante [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]**  
= énergie nécessaire pour élever 1 kg de 1 K.  
autour de 1000 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour les matériaux de génie civil  
(800 à 1800 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

⇒ **Stockage / restitution de chaleur sensible**

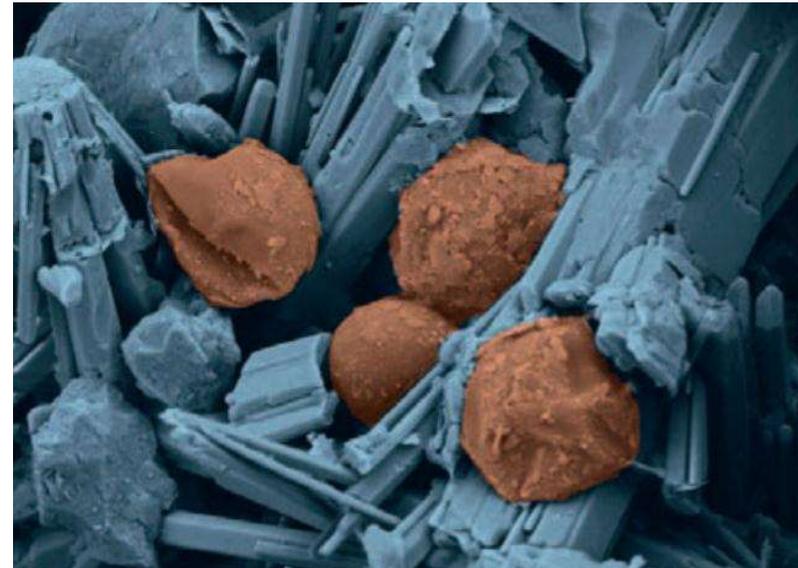
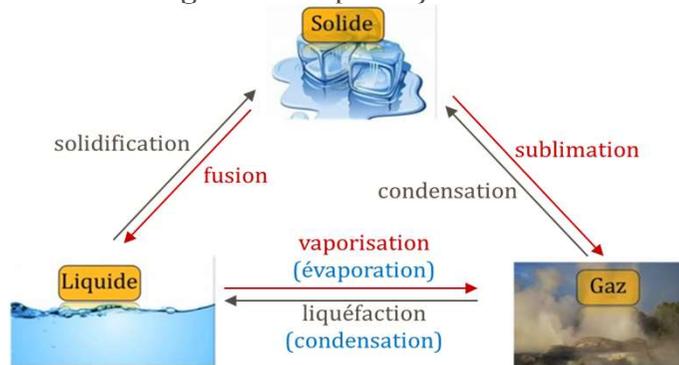
# Transferts et stockage de chaleur



- Stockage de chaleur par changement de phase

- Changement de phase

(matériaux à changement de phase)



ex. : **Microbilles de paraffine**

- Lorsqu'un certain seuil de température est dépassé
  - se liquéfient et absorbent alors la chaleur environnante.
- Lorsque la température de la pièce redescend sous le seuil de changement de phase,
  - les microbilles se solidifient en restituant la chaleur précédemment absorbée.

⇒ **Stockage / restitution de chaleur latente**

# Transferts et stockage de chaleur



## • Diffusivité et effusivité thermique

### Diffusivité thermique

- Capacité d'un matériau à diffuser la chaleur = à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau.

↳ rapport entre sa capacité à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique).

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

$a$  : diffusivité thermique [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $\lambda$  : conductivité thermique [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]  
 $\rho$  : masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $c_p$  : chaleur massique [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]

### Effusivité thermique

- Capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement.

↳ Dépend de sa capacité à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique).

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$$

$E$  : effusivité thermique [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ ]  
 $\lambda$  : conductivité thermique [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]  
 $\rho$  : masse volumique [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $c_p$  : chaleur massique [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]

# Transferts et stockage de chaleur

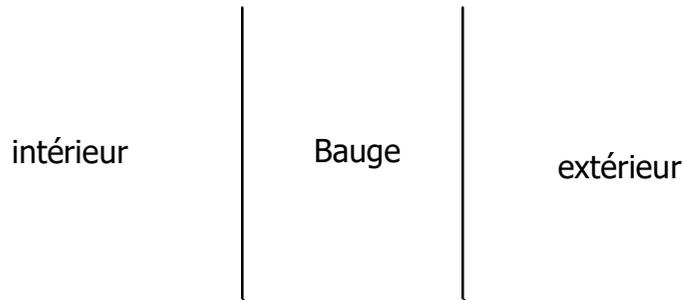


- Exercice d'application : isolation d'une paroi en bauge

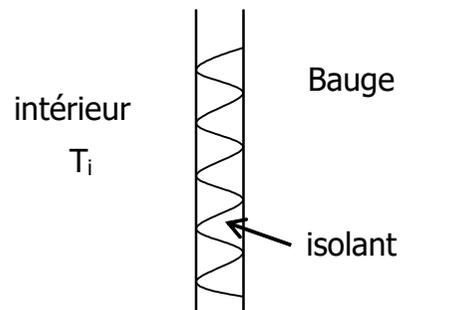
Tracer les profils de température et comparer l'énergie stockée entre 2 régimes permanents

Etat initial :  $T_i = 15\text{ °C}$  ;  $T_e = 4\text{ °C}$

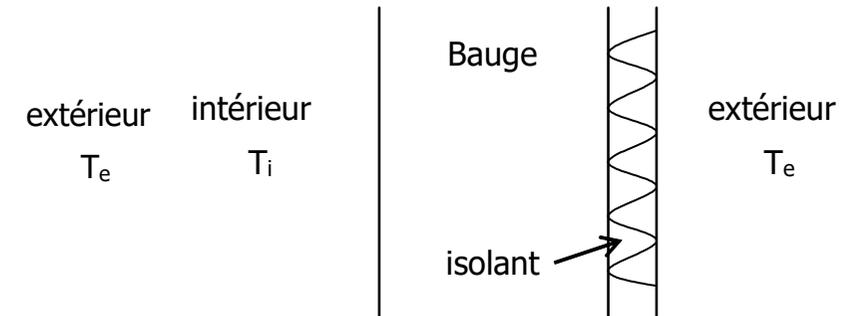
Etat final :  $T_i = 20\text{ °C}$  ;  $T_e = 4\text{ °C}$



Isolation intérieure



Isolation extérieure



RÉSISTANCES SUPERFICIELLES [m².K/W]				
Position de la paroi	Face externe	$R_{s,i}$	$R_{s,x}$	$R_{s,i} + R_{s,x}$
↑ horizontale (inclinaison < 60°) flux vers le haut	extérieur, passage ouvert, local ouvert	0,10	0,04	0,14
	comble, vide sanitaire, local non chauffé	0,10	0,10	0,20
← verticale (inclinaison ≥ 60°) flux horizontal	extérieur, local ouvert	0,13	0,04	0,17
	comble, local non chauffé	0,13	0,13	0,26
↓ horizontale (inclinaison < 60°) flux vers le bas	extérieur, passage ouvert, local ouvert	0,17	0,04	0,21
	local non chauffé	0,17	0,17	0,34

mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m³)	$\lambda$ (W/(m.K))	$c_p$ (J/(kg.K))
Bauge	60	1500	0.45	1050
Laine de bois	8	50	0.041	1500



# L'humidité dans les milieux poreux



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

- Humidité

présence d'eau sous forme **vapeur** ou **liquide** contenue dans l'air ou dans une substance (linge, pain, matériau, ...)



- Humidité dans le bâtiment

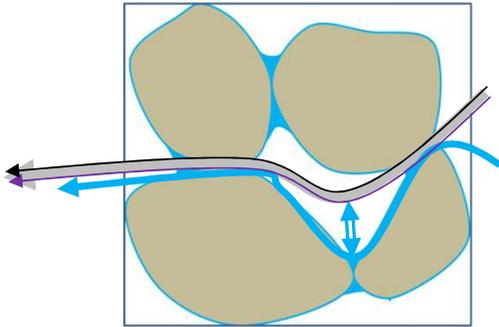
présence en quantité **anormale** d'eau dans un bâtiment. Celle-ci peut être sous forme de liquide, de vapeur d'eau.

# L'humidité dans les milieux poreux



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## Matériau hygrosopique



- Matériau **poreux** et **perméable**
- **Echanges** entre les molécules d'eau dans l'air (**vapeur d'eau**) et celle dans le matériau (**eau interstitielle**)

Peut être utilisé comme régulateur passif de l'humidité intérieure des habitations

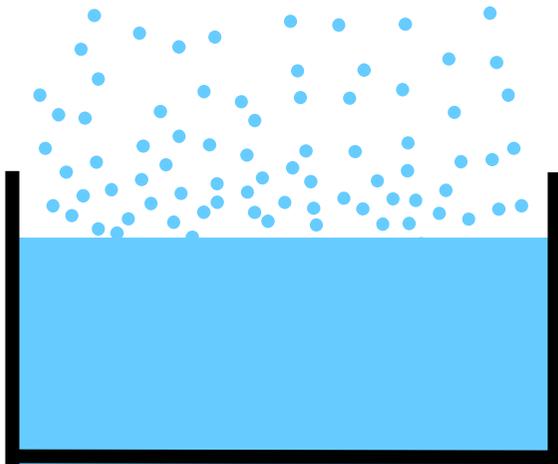
# L'humidité dans les milieux poreux

## Stockage d'humidité



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

*Pourquoi l'eau contenue dans un récipient s'évapore à une température inférieure à 100°C ?*



# L'humidité dans les milieux poreux



## Stockage d'humidité

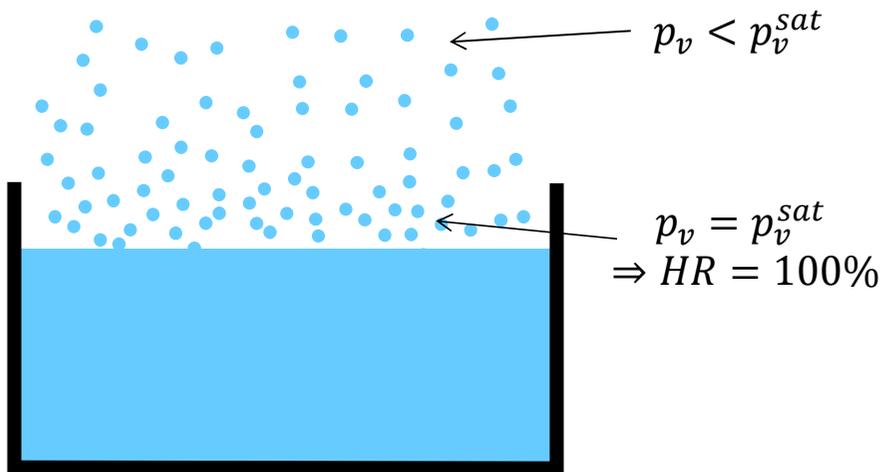
- Humidité relative :  $HR = \frac{p_v}{p_v^{sat}} * 100$
- Pression partielle de vapeur dans l'air :  $p_v$
- Pression partielle de vapeur à saturation :  $p_v^{sat}$

### Eau « libre »

Si  $p_v > p_v^{sat} \Rightarrow$  condensation de la vapeur

Si  $p_v < p_v^{sat} \Rightarrow$  Evaporation de l'eau

Si  $p_v = p_v^{sat} \Rightarrow$  Equilibre

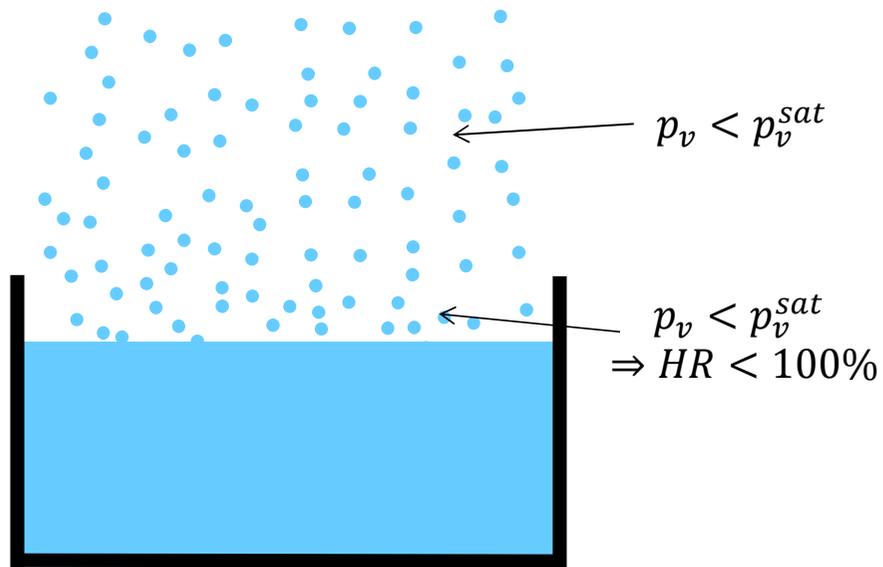


# L'humidité dans les milieux poreux



## Stockage d'humidité

- Humidité relative :  $HR = \frac{p_v}{p_v^{sat}} * 100$
- Pression partielle de vapeur dans l'air :  $p_v$
- Pression partielle de vapeur à saturation :  $p_v^{sat}$



### Eau « libre »

Si  $p_v > p_v^{sat} \Rightarrow$  condensation de la vapeur

Si  $p_v < p_v^{sat} \Rightarrow$  Evaporation de l'eau

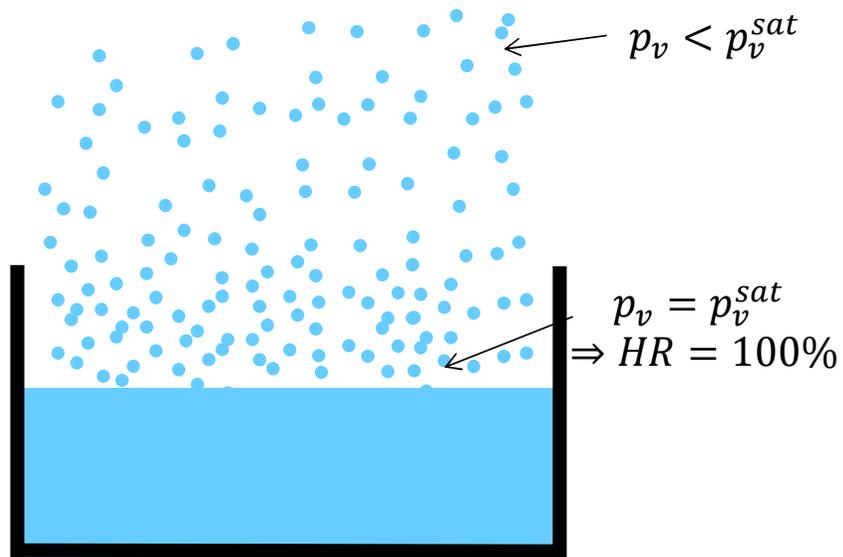
Si  $p_v = p_v^{sat} \Rightarrow$  Equilibre

# L'humidité dans les milieux poreux



## Stockage d'humidité

- Humidité relative :  $HR = \frac{p_v}{p_v^{sat}} * 100$
- Pression partielle de vapeur dans l'air :  $p_v$
- Pression partielle de vapeur à saturation :  $p_v^{sat}$



### Eau « libre »

Si  $p_v > p_v^{sat} \Rightarrow$  condensation de la vapeur

Si  $p_v < p_v^{sat} \Rightarrow$  Evaporation de l'eau

Si  $p_v = p_v^{sat} \Rightarrow$  Equilibre

# L'humidité dans les milieux poreux



## Stockage d'humidité

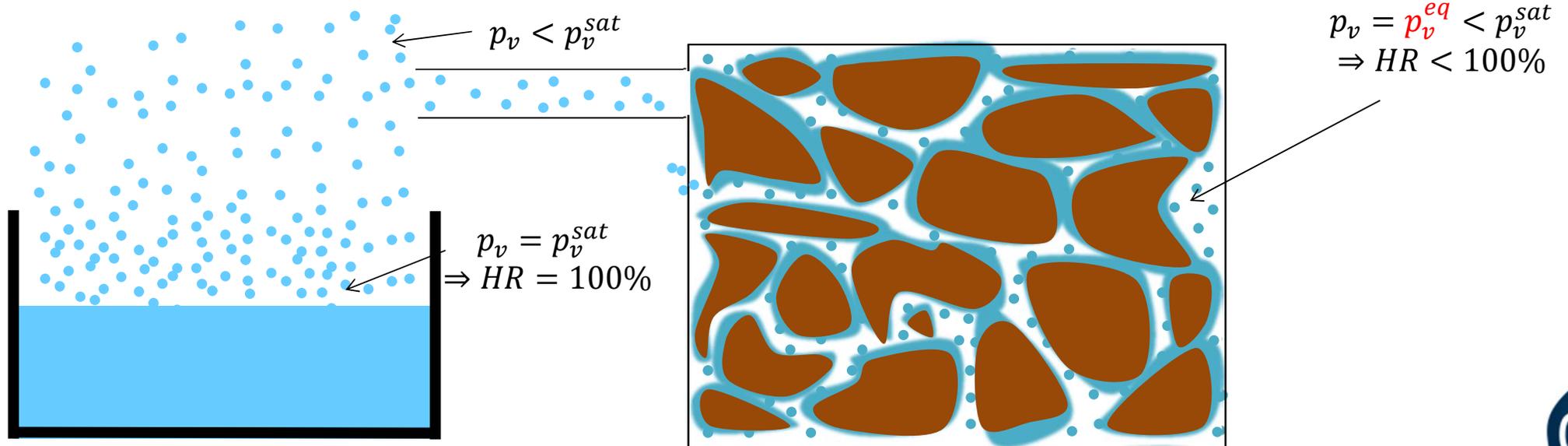
- Humidité relative :  $HR = \frac{p_v}{p_v^{sat}} * 100$
- Pression partielle de vapeur dans l'air :  $p_v$
- Pression partielle de vapeur à saturation :  $p_v^{sat}$

### Eau « interstitielle »

Si  $p_v > p_v^{eq}$   $\Rightarrow$  condensation de la vapeur

Si  $p_v < p_v^{eq}$   $\Rightarrow$  Evaporation de l'eau

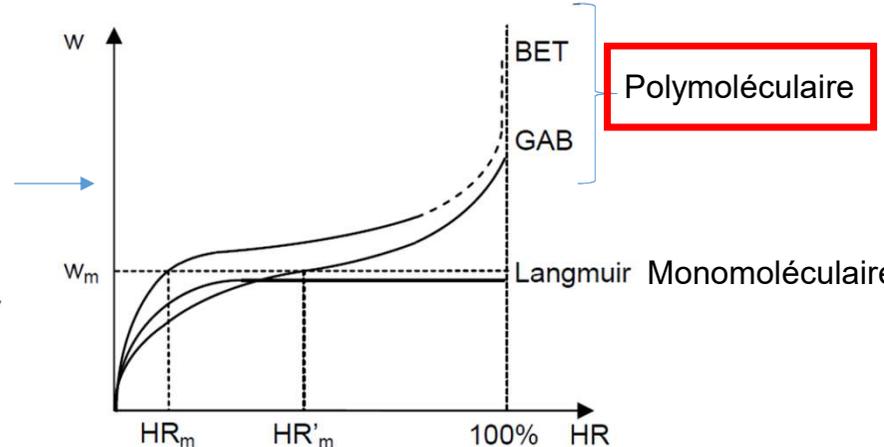
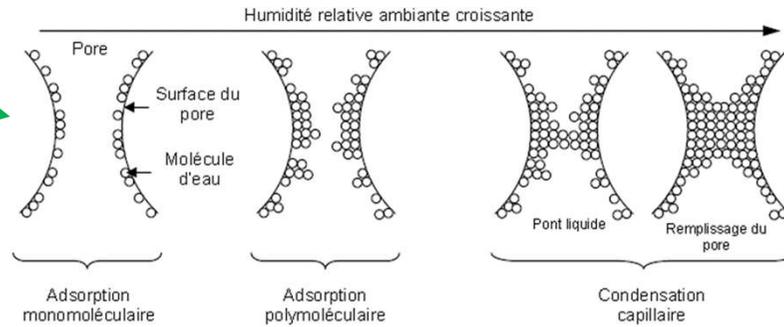
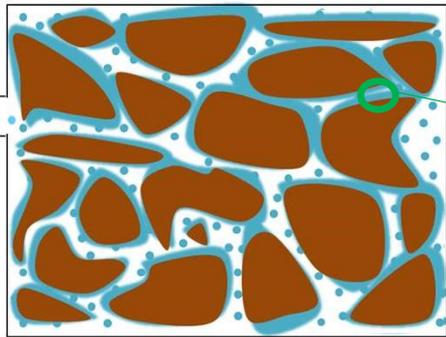
Si  $p_v = p_v^{eq}$   $\Rightarrow$  Equilibre





# L'humidité dans les milieux poreux

## Stockage d'humidité : isothermes de sorption



Polymoléculaire

Langmuir Monomoléculaire

### Equilibre entre l'eau liquide et sa vapeur

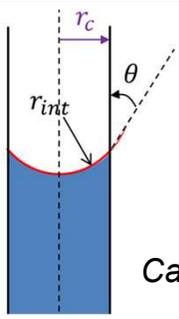
$$\mu_L = \mu_V \Rightarrow P_{atm} - P_L = f(HR^{eq}) \text{ avec } f \text{ fonction décroissante (loi de Kelvin)}$$

$$\text{Cas de l'eau pure : } f(HR) = -\rho_L R_v T \ln(HR^{eq})$$

$$HR^{eq} = \frac{p_v^{eq}}{p_v^{sat}} = h(r_c)$$

Avec  $h = f^{-1}$  o  $g$  fonction croissante

### Equilibre de l'interface entre l'eau liquide et l'air au sein d'un pore capillaire



$$P_{atm} - P_L = g(r_c) \text{ avec } g \text{ fonction décroissante (loi de Jurin)}$$

$$\text{Cas d'une interface sphérique : } g(r_c) = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_c}$$

Plus le rayon de pore est petit, plus l'humidité relative à laquelle aura lieu le changement de phase sera petite

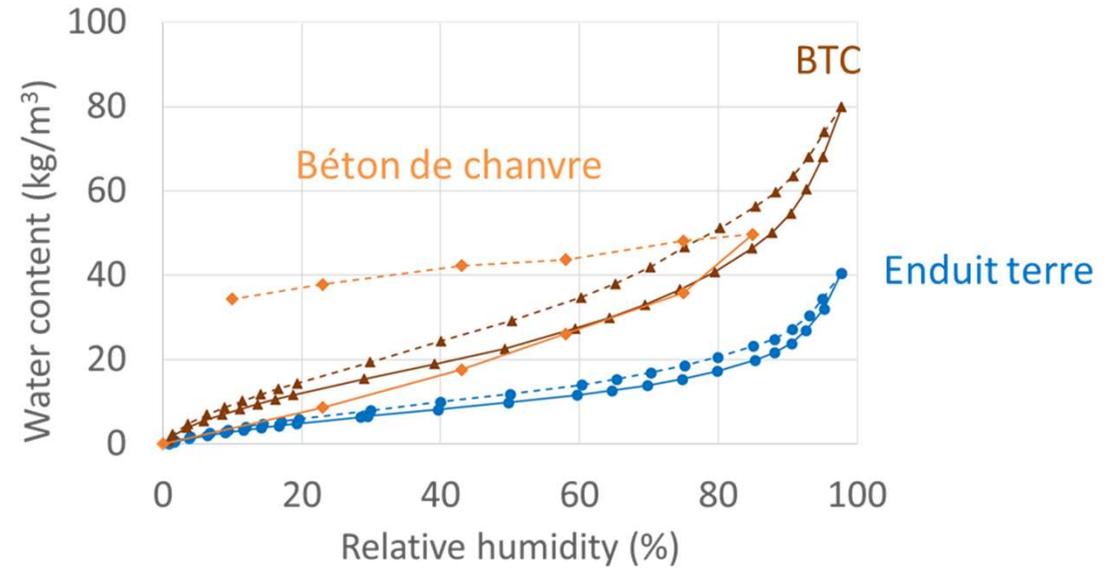
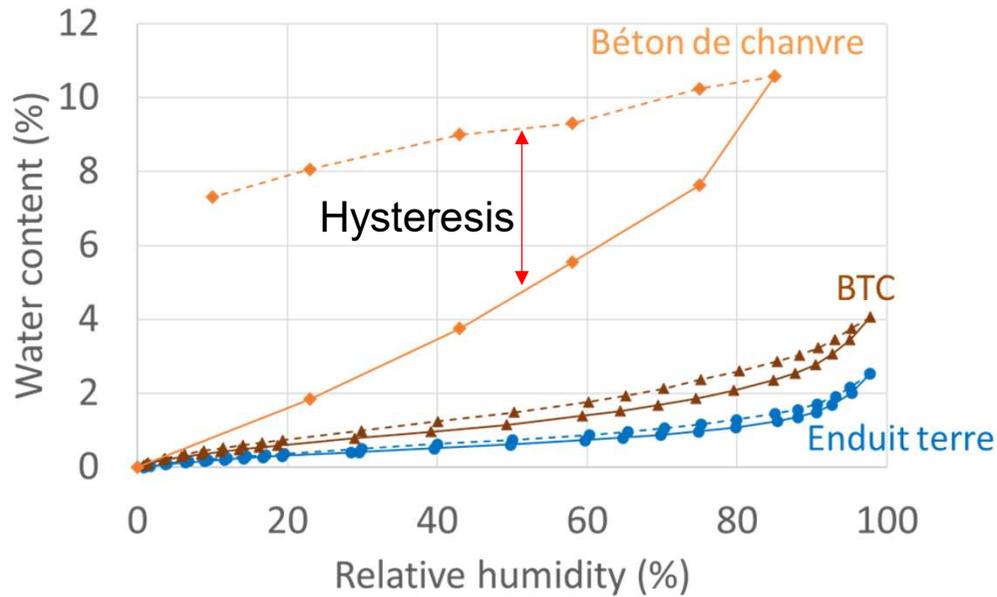


# L'humidité dans les milieux poreux

## Stockage d'humidité : isothermes de sorption



Quelques exemples :

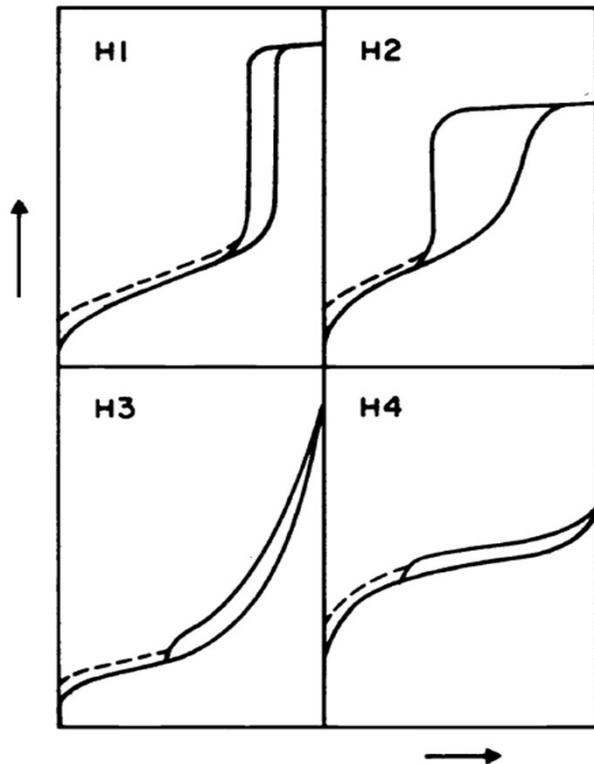


# L'humidité dans les milieux poreux

## Stockage d'humidité : hystéresis



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



H1 : cas des distributions resserrée de pores de géométrie uniforme

H2 : Cas des structures porales complexes avec des réseaux interconnectés de tailles et de géométries différentes

H3: Cas d'agrégats de particules lamellaires (argiles par ex)

H4: Cas des charbons actifs, des limons...

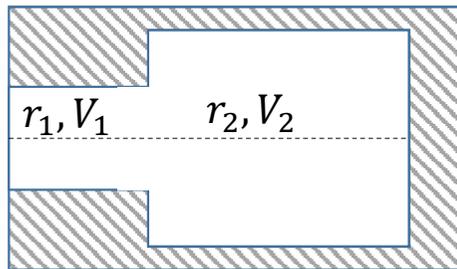
Classification IUPAC des boucles d'hystéresis  
(Sing et al., Pure Appl. Chem., 1985)



# L'humidité dans les milieux poreux

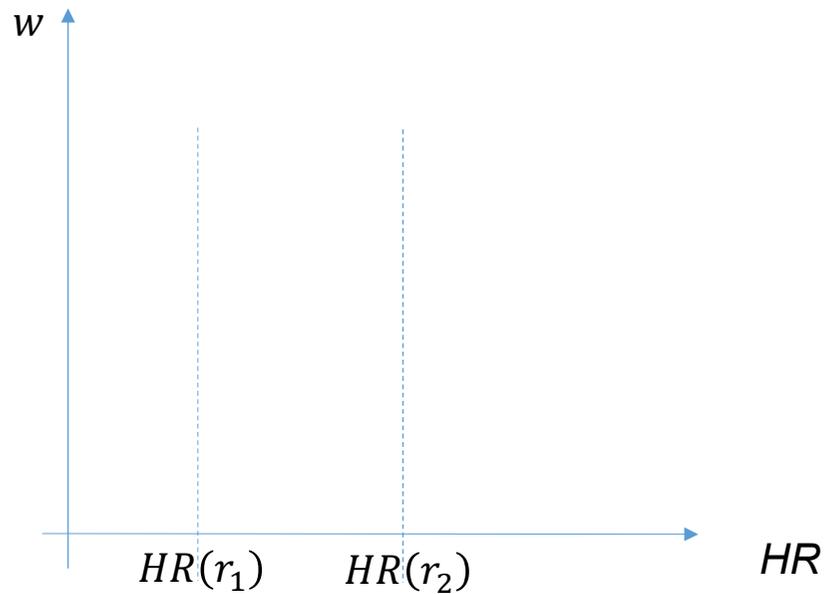
## Stockage d'humidité : hystéresis

Explication par le phénomène dit de « bouteille d'encre »



(Kraemer, in *A Treatise on Physical Chemist*, 1931, MM Haring Ed.)

$$r_1 < r_2 \\ \Rightarrow HR^{eq}(r_1) < HR^{eq}(r_2)$$

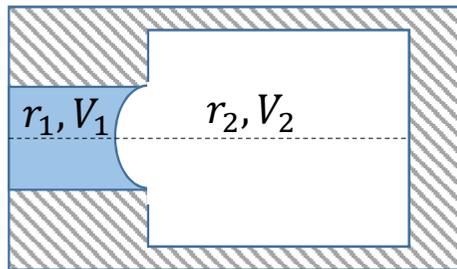




# L'humidité dans les milieux poreux

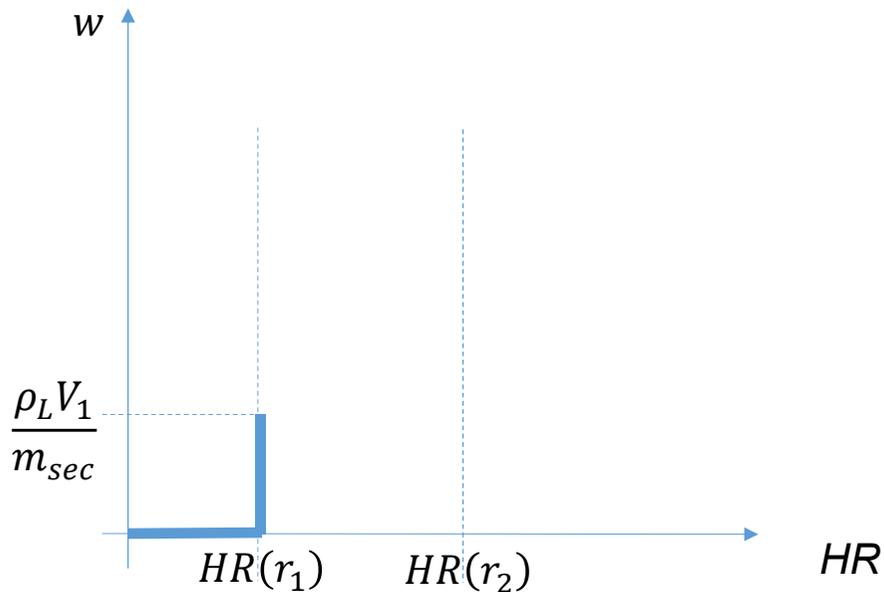
## Stockage d'humidité : hystéresis

Explication par le phénomène dit de « bouteille d'encre »



(Kraemer, in *A Treatise on Physical Chemistry*, 1931, MM Haring Ed.)

$$r_1 < r_2 \\ \Rightarrow HR^{eq}(r_1) < HR^{eq}(r_2)$$

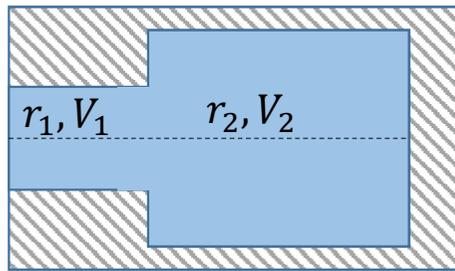




# L'humidité dans les milieux poreux

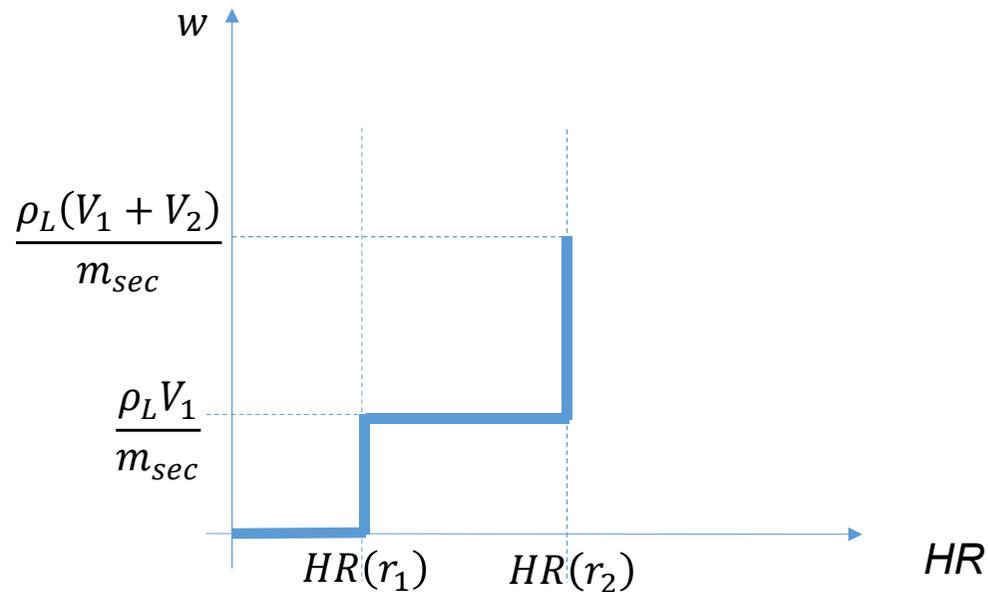
## Stockage d'humidité : hystéresis

Explication par le phénomène dit de « bouteille d'encre »



(Kraemer, in *A Treatise on Physical Chemistry*, 1931, MM Haring Ed.)

$$r_1 < r_2 \\ \Rightarrow HR^{eq}(r_1) < HR^{eq}(r_2)$$

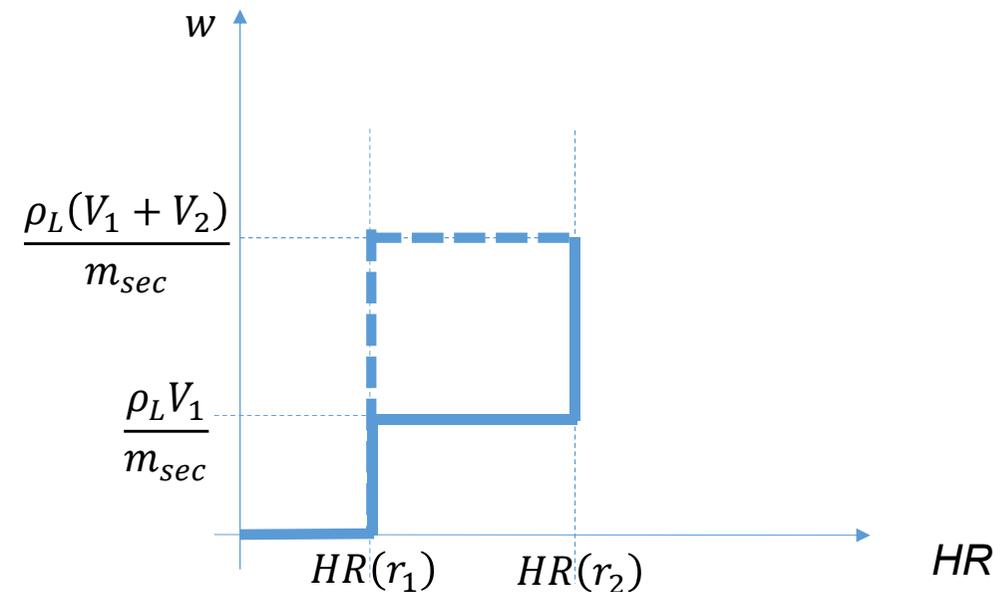
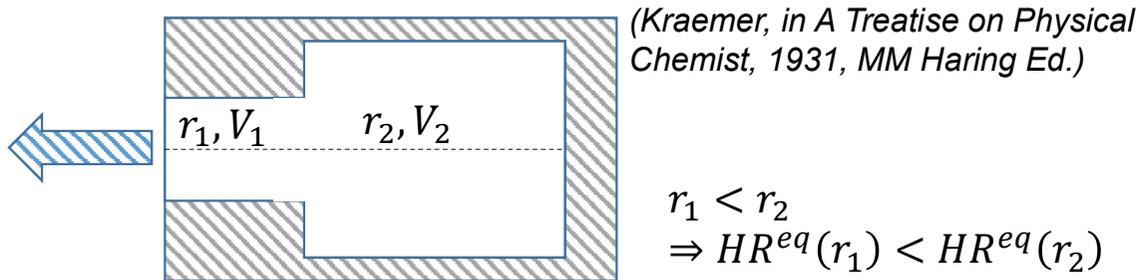




# L'humidité dans les milieux poreux

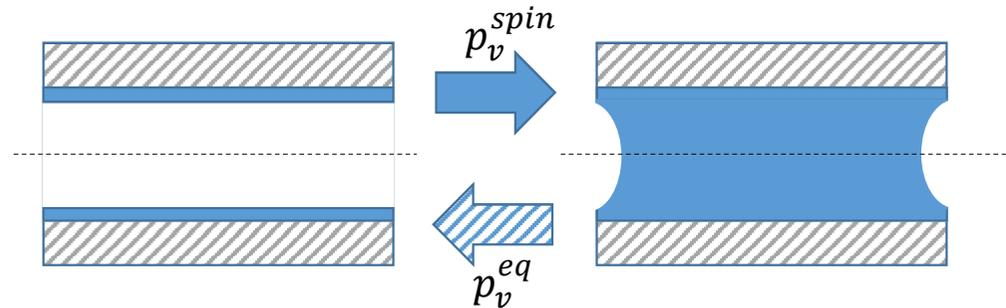
## Stockage d'humidité : hystéresis

Explication par le phénomène dit de « bouteille d'encre »



Explication par le phénomène de métastabilité :

La condensation n'intervient pas forcément en accord avec la loi de Kelvin (Foster, *Trans. Faraday Soc.* 1932)



*Théorie de Saam-Cole (1975)... très simplifiée...*

*Quelques autres explications...*

Différence entre l'angle de mouillage en imbibition et en drainage (Zsigmondy, *Z. Anorg. Chem.* 1911)

Modification de la forme des menisques entre l'adsorption et la désorption (Cohan, *J. Am. Chem. Soc.*, 1938)

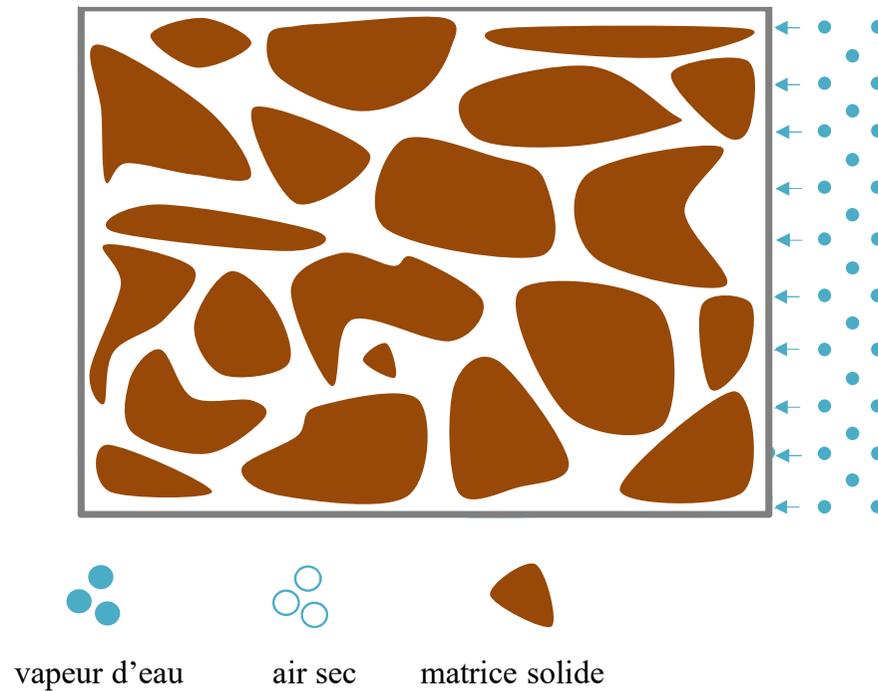
Pour aller plus loin : [Rouquerol et al., 1999]

# L'humidité dans les milieux poreux



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## Transferts d'humidité dans les milieux poreux

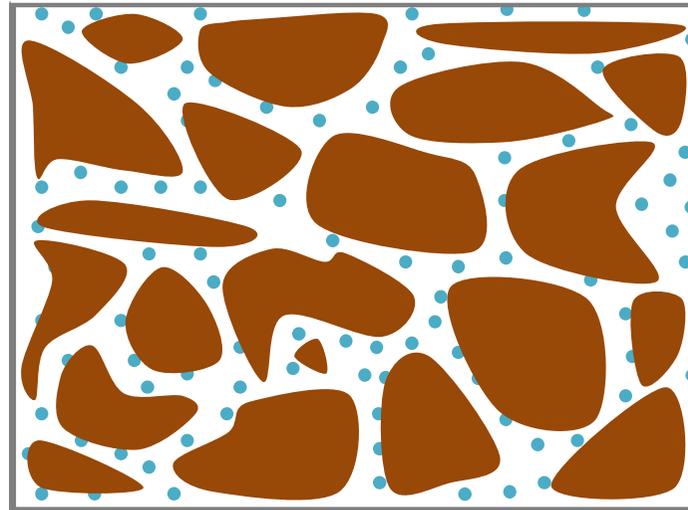


# L'humidité dans les milieux poreux



## Transferts d'humidité dans les milieux poreux

Transfert de vapeur (*loi de Fick*) (+vapeur entraînée par le flux d'air)



Phénomène d'advection,  
généralement du second ordre



vapeur d'eau



air sec



matrice solide

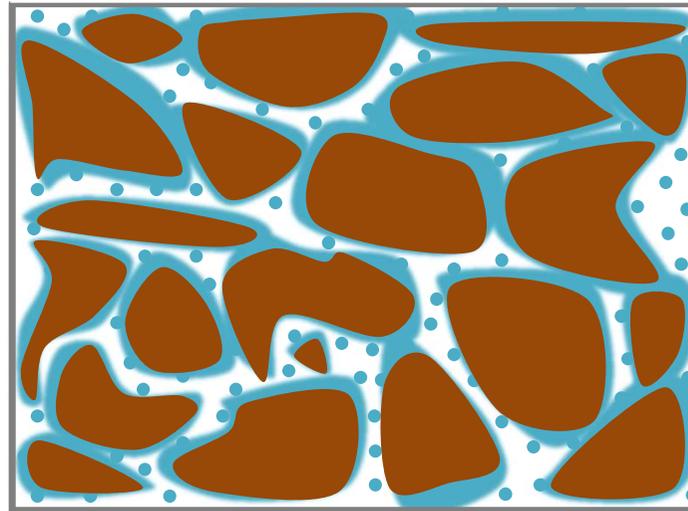
# L'humidité dans les milieux poreux



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## Transferts d'humidité dans les milieux poreux

Transfert d'eau "liquide"



  
vapeur d'eau

  
air sec

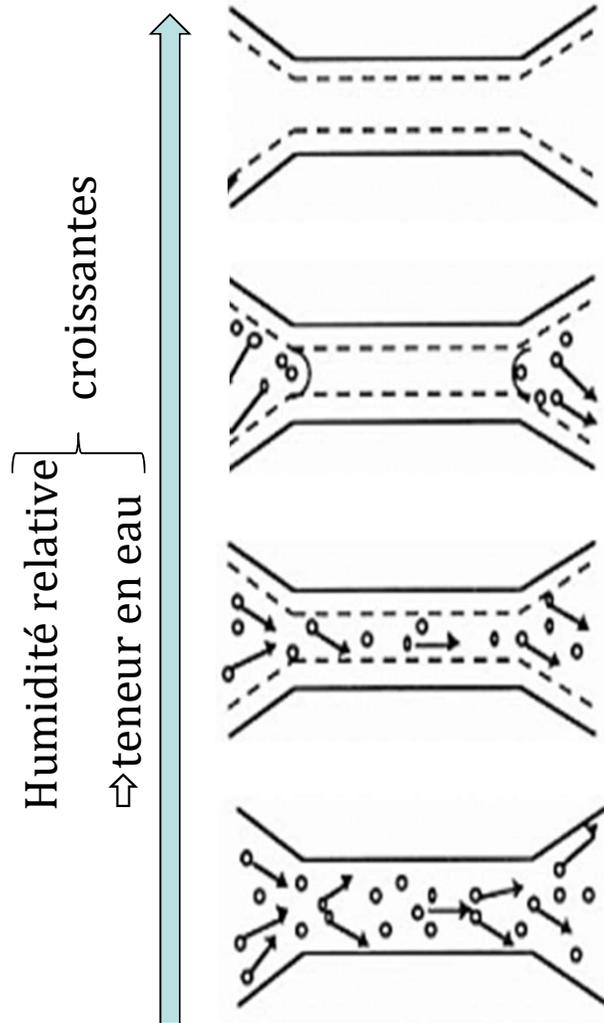
  
matrice solide

  
eau liquide

Coefficient de perméabilité de l'eau dans le matériau

# L'humidité dans les milieux poreux

## Transferts d'humidité dans les milieux poreux

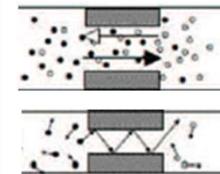


Saturation ou phase capillaire continue :  
Transfert liquide - capillarité

Phase capillaire dispersée :  
Diffusion gazeuse dans la phase gazeuse  
Evaporation-condensation

Adsorption polymoléculaire :  
Diffusion gazeuse dans la phase gazeuse  
Transfert liquide surfacique

Diffusion gazeuse :  
**diffusion moléculaire** libre : les collisions contre les parois sont négligeables par rapport aux collisions entre molécules  
**effusion** : le nombre de chocs molécules-paroi est très supérieur au nombre de chocs inter-moléculaires.



# L'humidité dans les milieux poreux

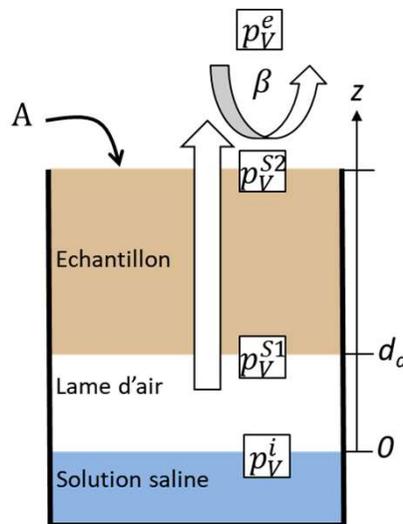
## Transferts d'humidité dans les milieux poreux



Perméabilité apparente à la vapeur : transfert d'humidité au travers du matériau

- Capacité apparente à se laisser traverser par un gaz (vapeur d'eau) sous l'action d'une pression (de vapeur) entre ses deux faces opposées.
- **Perméabilité à la vapeur  $\pi$**  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ]

= somme des différents modes de transport en présence (voie vapeur et liquide)



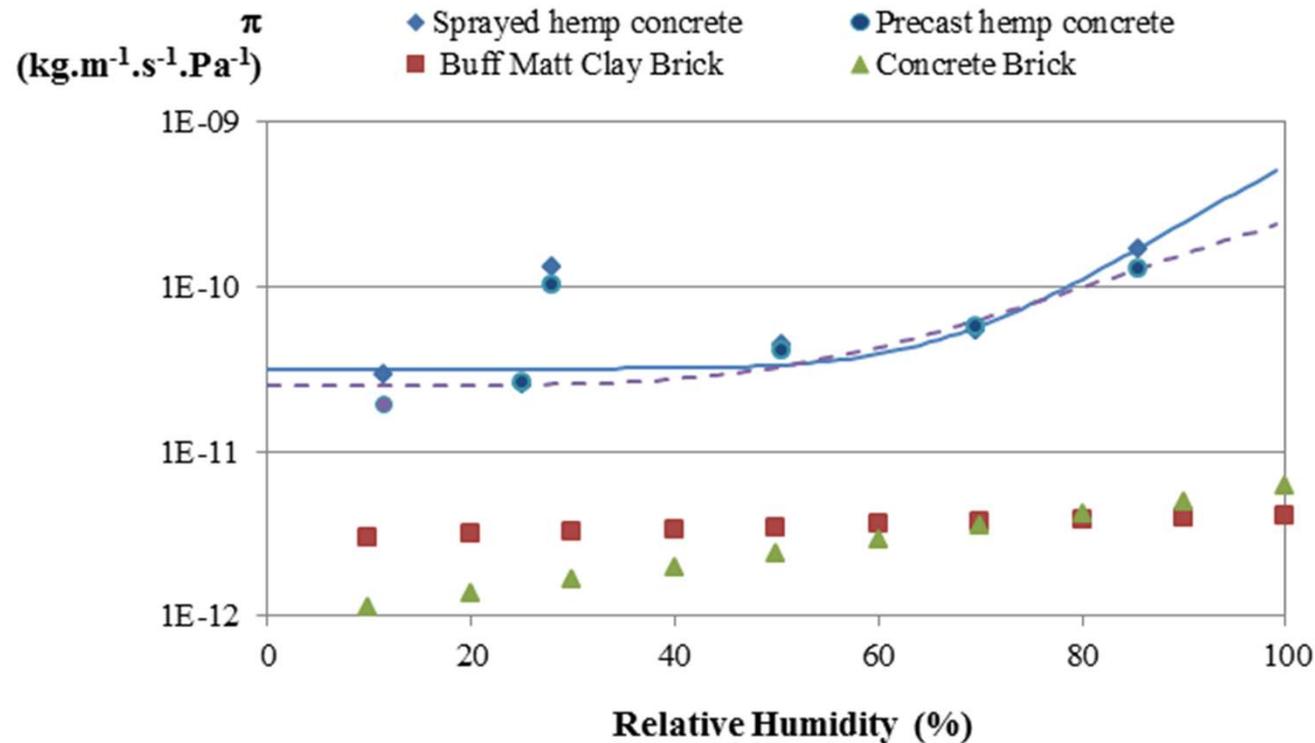
Question : comment évolue  $\pi$  avec l'humidité relative dans les matériaux hygroscopiques ?

# L'humidité dans les milieux poreux

## Transferts d'humidité dans les milieux poreux



- Pour les matériaux **hygroscopiques**, la perméabilité à la vapeur **augmente** avec la teneur en eau.



# L'humidité dans les milieux poreux

## Transferts d'humidité dans les milieux poreux

- Perméance  $W$  [kg/(m<sup>2</sup>.s.Pa)]

Rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau à son épaisseur

$$W = \frac{\pi}{e}$$

- Résistance à la diffusion  $R$  [(m<sup>2</sup>.s.Pa)/kg]

Inverse de la perméance

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

- Facteur de résistance à la diffusion [-]

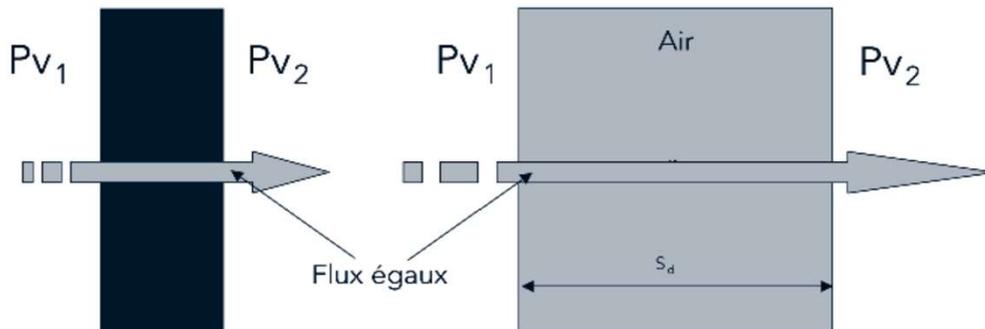
Rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sur la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau.

$$\mu = \frac{\pi_{air}}{\pi_{mx}}$$

- Épaisseur d'air équivalente [m]

Épaisseur d'une couche d'air telle qu'elle ait la même perméance qu'une couche de matériau d'épaisseur  $e$  donnée

$$S_d = \mu \times e$$



# L'humidité dans les milieux poreux

## Transferts d'humidité dans les milieux poreux



Matériau	$\mu$ [-]
Béton	50 ~ 200
Enduit en mortier de ciment	15 ~ 50
Plaque de plâtre	10 ~ 15
BTC non stabilisée	5 ~ 15
Enduit en terre	5 ~ 15
Béton de chanvre	3 ~ 10
Laine de verre	1 ~ 5
Laine végétale	1 ~ 3

# L'humidité dans les milieux poreux

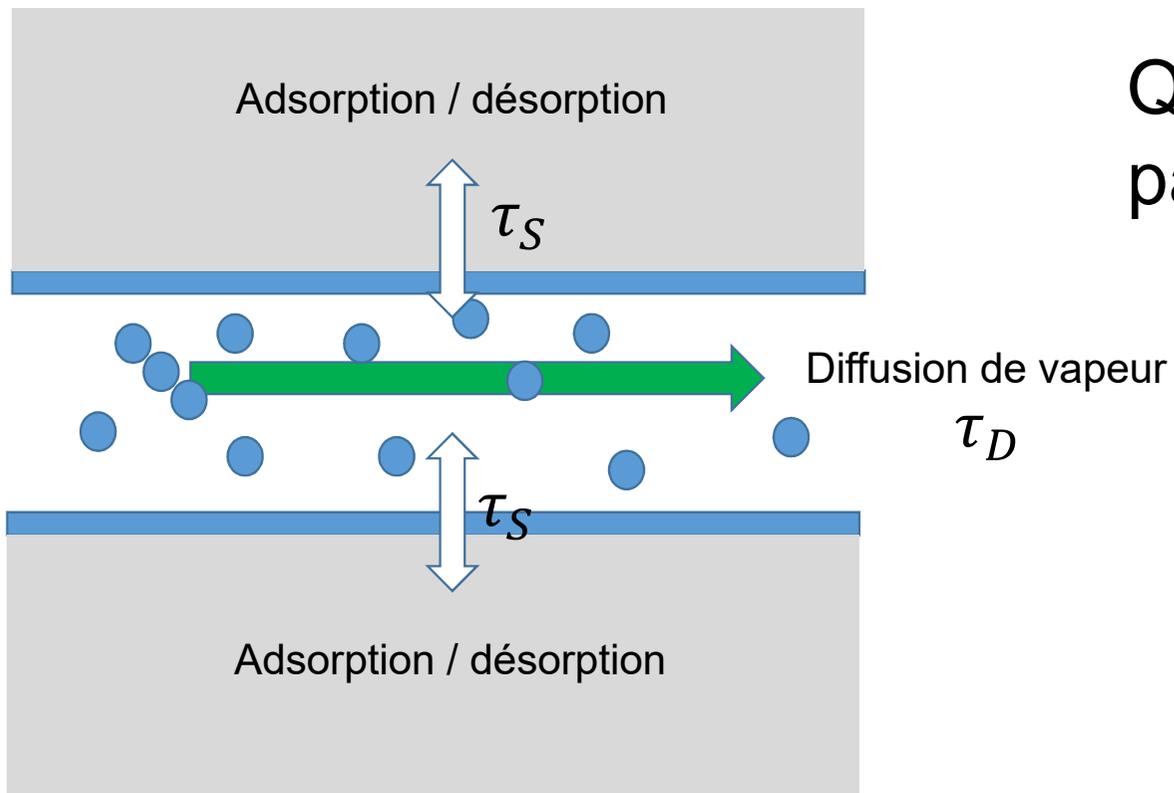
Bilan : cas du transfert liquide négligé



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

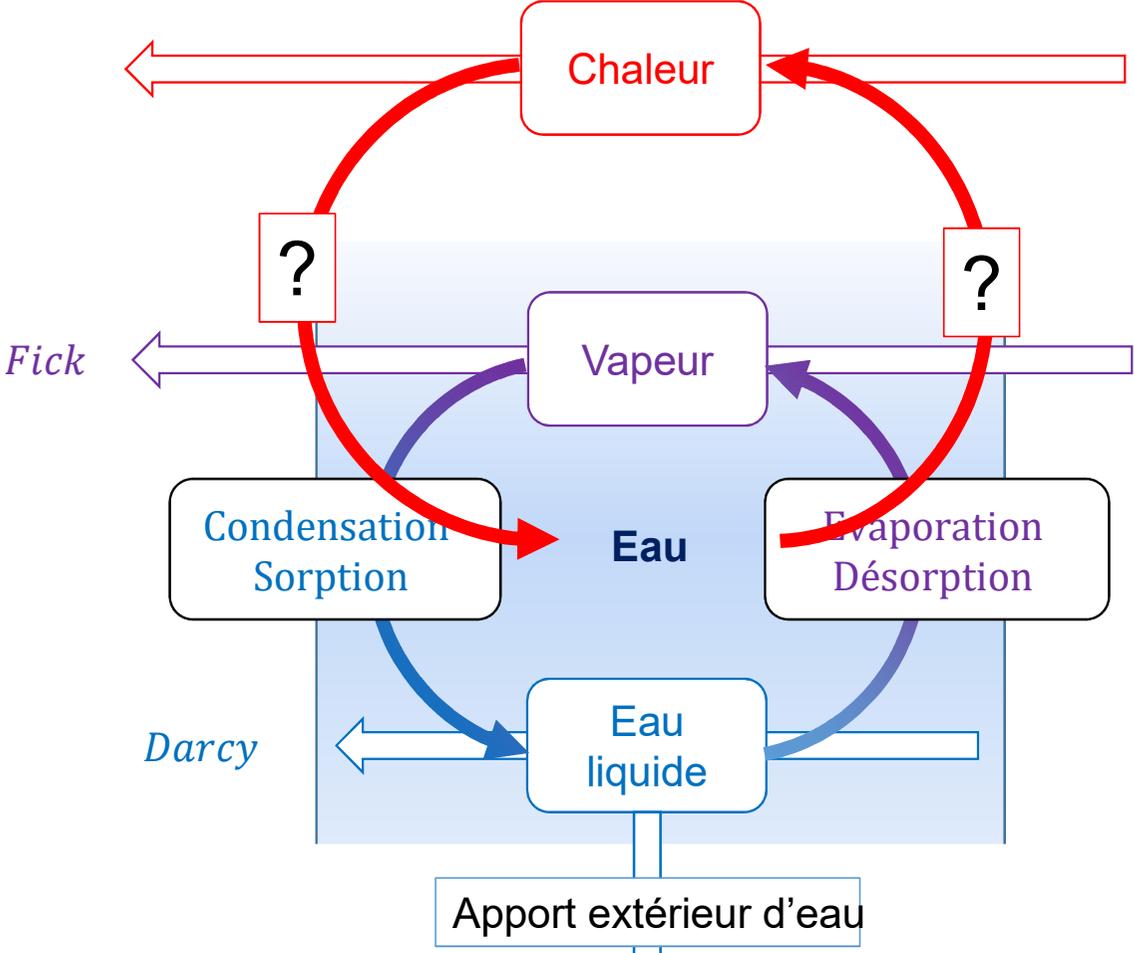


Que se passe t'il si  $\tau_S$  n'est pas négligeable devant  $\tau_D$  ?



# Couplage hygrothermique

Bilan : cas du transfert liquide négligé

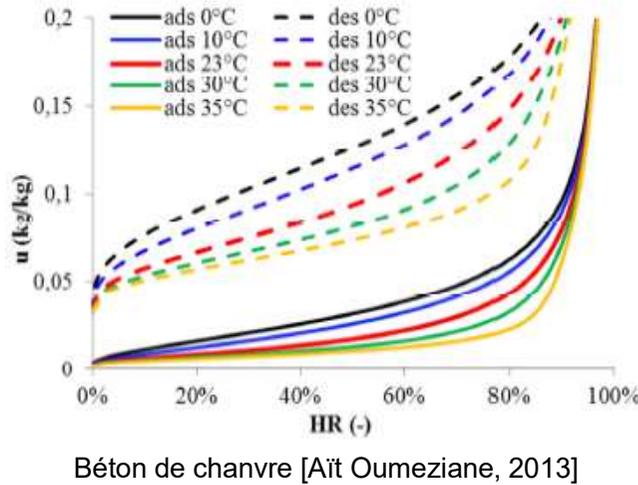
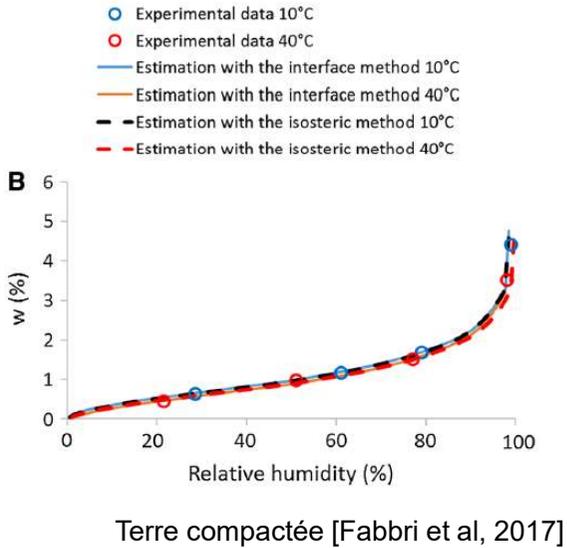


# Couplage hygrothermique

## Impact de la température sur l'hygroscopicité



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Wood Fiber Insulation  
and Hemp Concrete  
[Colinart et Glouanec, 2017]

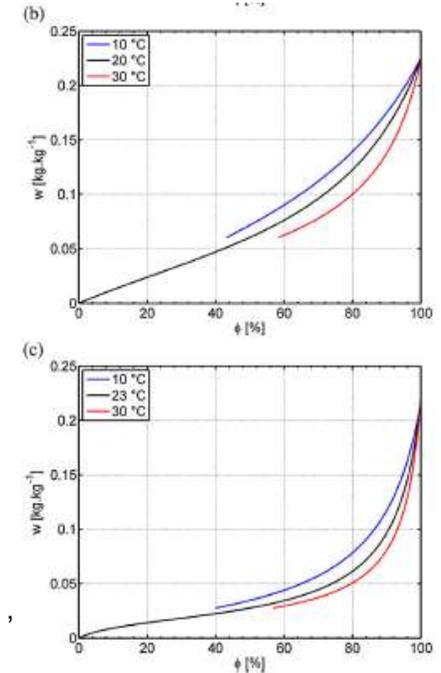


Fig. 17. Predicted temperature dependence of the sorption isotherm for AAC (a), WFI (b) and HC (c).

### ➤ Effets :

- ✓ Quand T augmente, w diminue
- ✓ Effet moins marqué sur la branche de désorption que sur la branche d'adsorption
  - ↳ Quand T augmente, l'hystérésis diminue

### ➤ Phénomènes physiques :

- ✓ **modification de l'équilibre thermodynamique**  
ex. : modélisation basée sur la loi de Clausius-Clapeyron donne l'évolution de RH=f(T) pour une teneur en eau donnée à partir de la chaleur isostérique

$$RH(T, u) = RH(T_{ref}, u) \frac{p_{sat}(T_{ref})}{p_{sat}(T)} e^{\frac{q_{st}(u) M_1 (T - T_{ref})}{R T_{ref} T}} \quad ; \quad q_{st} = -R \left[ \frac{\partial \ln p}{\partial \frac{1}{T}} \right]$$

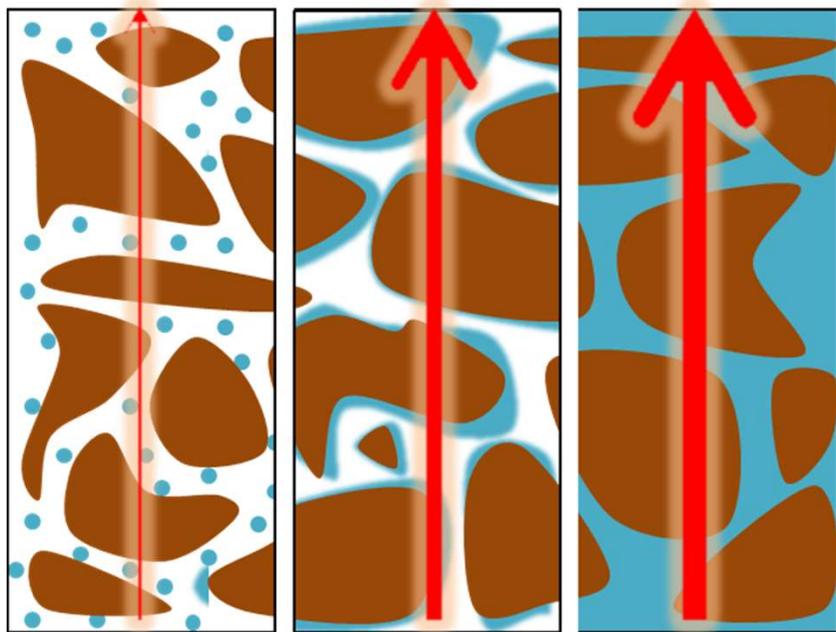


# Couplage hygrothermique



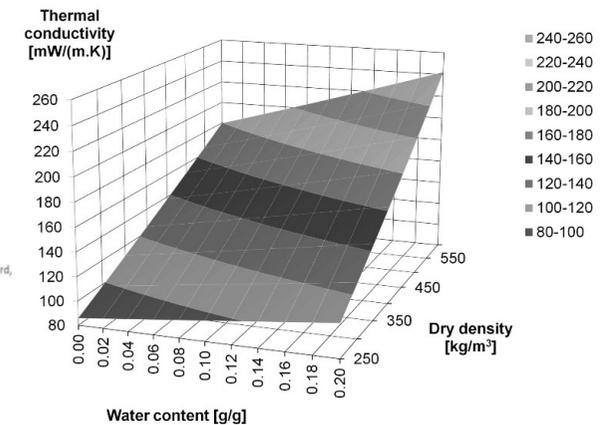
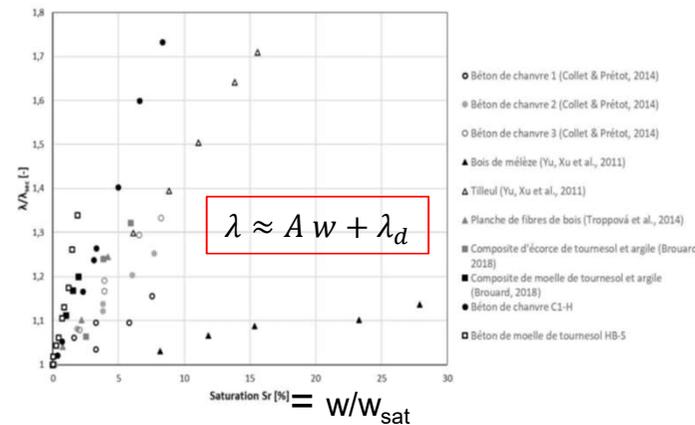
## Impact de l'hygroscopicité sur le bilan de chaleur

➤ Effets :  
Augmentation du flux de chaleur avec la teneur en eau



➤ Phénomènes physiques :

### ✓ Variation de la conductivité thermique apparente



Béton de chanvre [Collet and Pretot, 2014]

✓ **Advection de chaleur** due aux transferts de masse dans le matériau

# Couplage hygrothermique



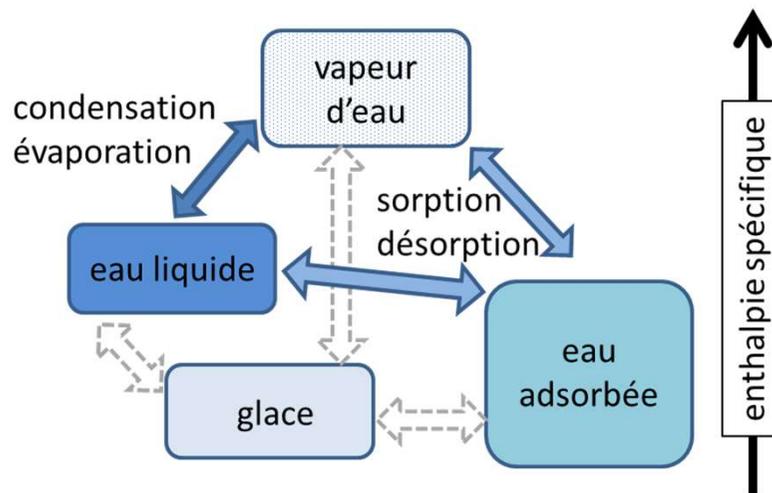
## Impact de l'hygroscopicité sur le bilan de chaleur

### ➤ Impact sur le stockage de chaleur

- ✓ Impact de l'eau sur la capacité thermique (**sensible**)

$$\rho C_p \approx \rho_d (C_{p,d} + w C_{p,L})$$

- ✓ Effet du changement d'état de l'eau (**latent**)



**Consommation de chaleur lors la désorption**  
Libération de chaleur lors de l'adsorption

# Couplages hygrothermiques

- Exercice d'application : risque de condensation interne ?  
diagramme de glaser

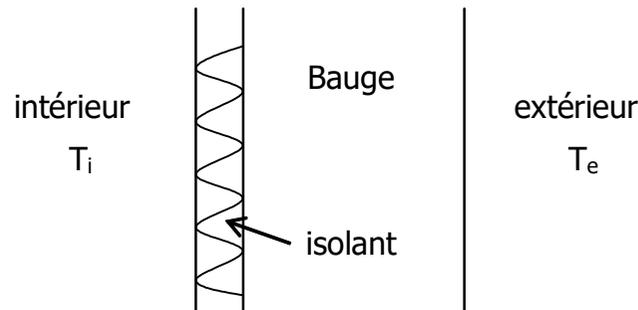
Tracer le profil de pression de vapeur  
et de pression de vapeur saturante

Intérieur :  $T_i = 20\text{ °C}$  ;  $HR_i = 50\%$   
Extérieur :  $T_e = 4\text{ °C}$  ;  $HR_e = 90\%$

mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$
Bauge	60	1500	12
Laine de bois	8	50	1

$$\pi_{\text{air}} = 1,85 \cdot 10^{-10} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$$

## Isolation intérieure



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

$$P_{vs} = f(\theta)$$

$\theta$ (°C)	$P_{vs}$ (Pa)	$\theta$ (°C)	$P_{vs}$ (Pa)
-15	165	21	2 488
-14	181	22	2 645
-13	199	23	2 810
-12	217	24	2 985
-11	238	25	3 169
-10	260	26	3 363
-9	284	27	3 567
-8	310	28	3 782
-7	338	29	4 008
-6	369	30	4 246
-5	402	31	4 496
-4	437	32	4 759
-3	476	33	5 034
-2	518	34	5 324
-1	563	35	5 628
0	611	36	5 947
1	657	37	6 281
2	706	38	6 631
3	758	39	6 999
4	813	40	7 383
5	872	41	7 786
6	935	42	8 208
7	1 002	43	8 649
8	1 073	44	9 111
9	1 148	45	9 593
10	1 228	46	10 098
11	1 313	47	10 625
12	1 403	48	11 175
13	1 498	49	11 750
14	1 599	50	12 350
15	1 705	100	101 419
16	1 818		
17	1 938		
18	2 064		
19	2 198		
20	2 339		

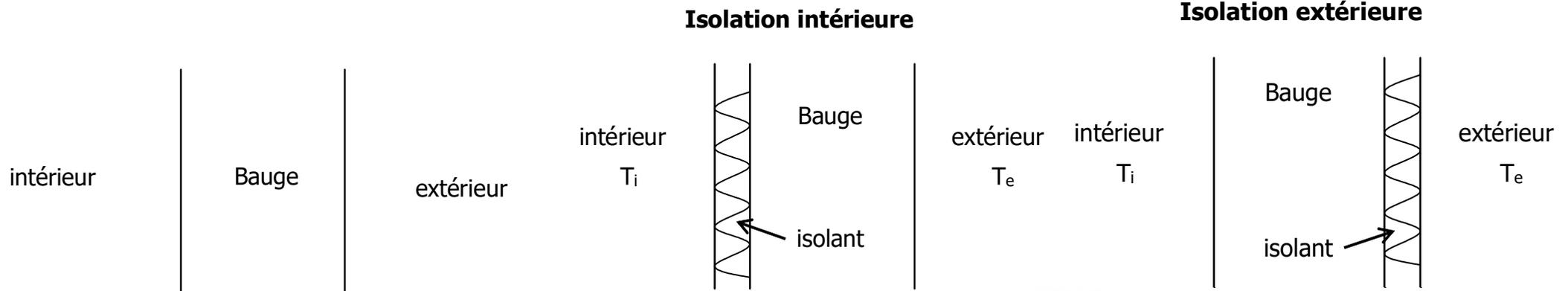


# Corrigés



**GdR MBS**  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

# Comparaison de parois : coefficient de transmission surfacique U et flux de chaleur



- Méthode ?

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

Il faut d'abord déterminer la résistance surfacique totale de la paroi

$$R_{tot} = R_{si} + \sum R_i + R_{se}$$

Résistances superficielles

Résistance des matériaux -  $=e/\lambda$  ou R (Annexes)

RÉSISTANCES SUPERFICIELLES [m².K/W]				
Position de la paroi	Face externe	$R_{s,i}$	$R_{s,x}$	$R_{s,i} + R_{s,x}$
↑ horizontale (inclinaison < 60°) flux vers le haut	extérieur, passage ouvert, local ouvert	0,10	0,04	0,14
	comble, vide sanitaire, local non chauffé	0,10	0,10	0,20
← verticale (inclinaison ≥ 60°) flux horizontal	extérieur, local ouvert	0,13	0,04	0,17
	comble, local non chauffé	0,13	0,13	0,26
↓ horizontale (inclinaison < 60°) flux vers le bas	extérieur, passage ouvert, local ouvert	0,17	0,04	0,21
	local non chauffé	0,17	0,17	0,34

mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m³)	$\lambda$ (W/(m.K))	cp (J/(kg.K))
Bauge	60	1500	0.45	1050
Laine de bois	8	50	0.041	1500

# Comparaison de parois : coefficient de transmission surfacique U et flux de chaleur



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

$$R_{tot} = R_{si} + \sum R_i + R_{se}$$

- Paroi Bauge

$$R_{tot} = 0.13 + \frac{0.60}{0.45} + 0.04$$

$$R_{tot} = 1.5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$$

$$U = \frac{1}{1.5}$$

$$U = 0.67 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$$

- Paroi Bauge isolée par l'intérieur

$$R_{tot} = 0.13 + \frac{0.08}{0.041} + \frac{0.60}{0.45} + 0.04$$

$$R_{tot} = 3.45 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$$

$$U = \frac{1}{3.45}$$

$$U = 0.29 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$$

- Paroi Bauge isolée par l'extérieur

↪ Mêmes matériaux avec les mêmes épaisseurs que la paroi isolée par l'intérieur

↪ Même coefficient U

# Comparaison de parois : coefficient de transmission surfacique U et flux de chaleur



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

$$\varphi = U(T_i - T_e) \quad T_i = 20^\circ\text{C}, T_e = 4^\circ\text{C}$$

- Paroi Bauge

$$U = 0.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\varphi = 10.67 \times (20 - 4)$$

$$\varphi = 10.6 \text{ W}/\text{m}^2$$

- Paroi Bauge isolée par l'intérieur

$$U = 0.29 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

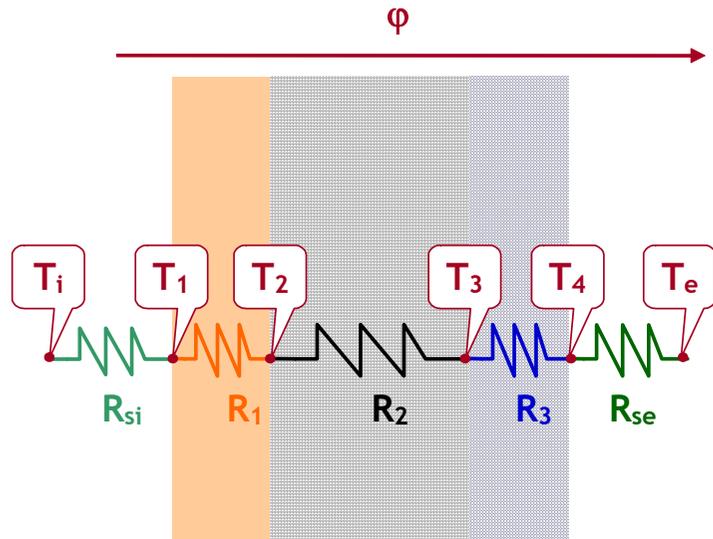
$$\varphi = 0.29 \times (20 - 4)$$

$$\varphi = 4.6 \text{ W}/\text{m}^2$$

- Paroi Bauge isolée par l'extérieur

↪ **Facteur 2.3**

# Méthode de détermination du profil de température



- Flux surfacique à travers la paroi :

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= U(T_i - T_e) \\ U &= \frac{1}{R_{tot}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{R_{tot}} (T_i - T_e) \\ R_{tot} &= R_{si} + \sum R_i + R_{se} \end{aligned}$$

- Le flux est le même sur toute l'épaisseur de la paroi
- Par analogie, de proche en proche:

$$\varphi = \frac{1}{R_{si}} (T_i - T_1) = \frac{1}{R_1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{R_2} (T_2 - T_3) = \frac{1}{R_3} (T_3 - T_4) = \frac{1}{R_{se}} (T_4 - T_e)$$

$$R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/(m.K))	cp (J/(kg.K))	
Bauge		60	1500	0.45	1050
Laine de bois		8	50	0.041	1500

# Comparer l'énergie stockée entre 2 régimes permanents

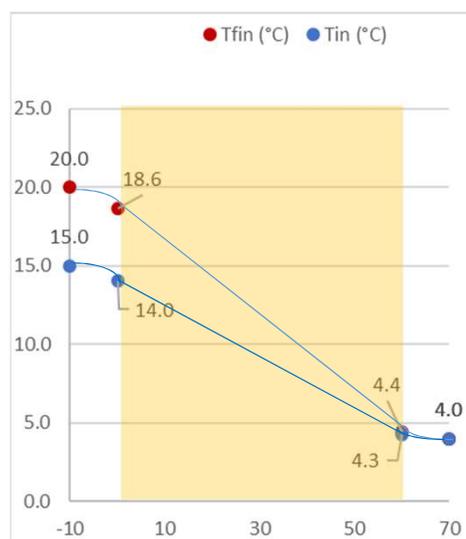


GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

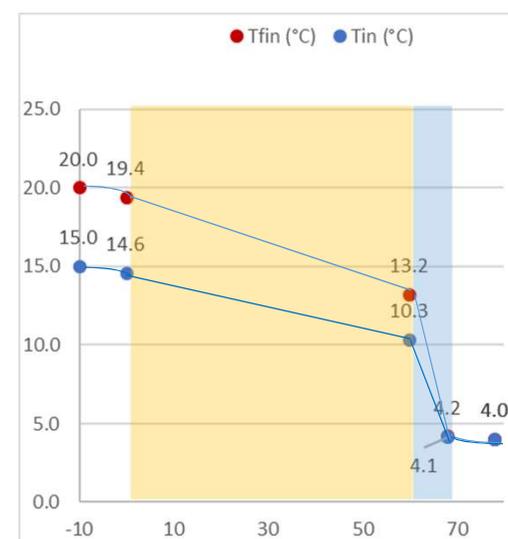
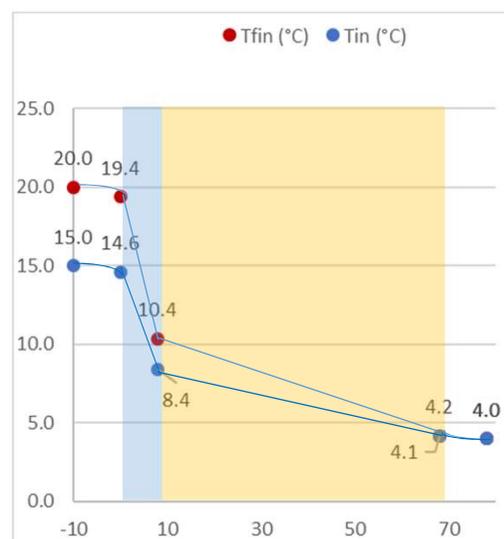
Etat initial :  $T_i = 15\text{ °C}$  ;  $T_e = 4\text{ °C}$

Etat final :  $T_i = 20\text{ °C}$  ;  $T_e = 4\text{ °C}$

■ Paroi Bauge



■ Bauge Isolation intérieure ■ Bauge Isolation extérieure



# Comparer l'énergie stockée entre 2 régimes permanents

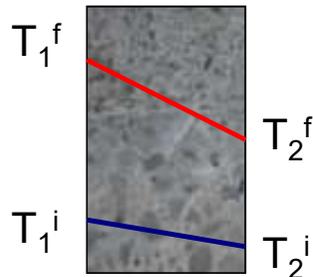


GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Etat initial :  $T_i = 15\text{ °C}$  ;  $T_e = 4\text{ °C}$   
Etat final :  $T_i = 20\text{ °C}$  ;  $T_e = 4\text{ °C}$

- Méthode ?

⇒ Pour une configuration mutli-couches, l'énergie stockée dans la paroi est la somme des énergies stockées dans les différentes couches.



$$E = m c_p (T_{moy}^f - T_{moy}^i)$$

$$E = \rho S e c_p \left( \frac{T_1^f + T_2^f}{2} - \frac{T_1^i + T_2^i}{2} \right)$$

⇒ **Il faut d'abord déterminer les profils de température à l'état initial et à l'état final**

# Comparer l'énergie stockée entre 2 régimes permanents



GdR  
MATÉRIAU

## ■ Paroi Bauge

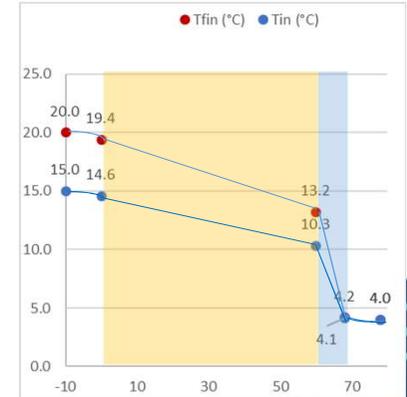
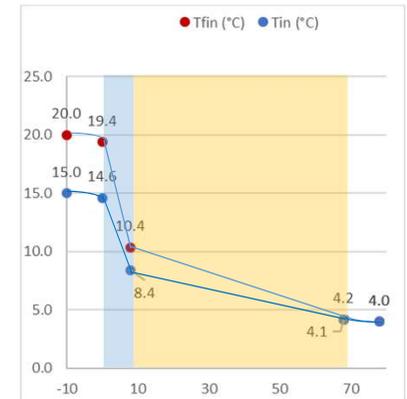
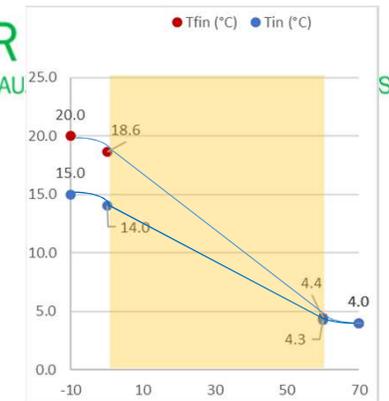
Stockage de chaleur						
mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/(kg.K))	Tmoy fin (°C)	Tmoy in (°C)	E (kJ/m <sup>2</sup> )
Bauge	60	1500	1050	11.5	9.2	2221
<b>Paroi</b>						<b>2221</b>

## ■ Bauge Isolation intérieure

mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/(kg.K))	Tmoy fin (°C)	Tmoy in (°C)	E (kJ/m <sup>2</sup> )
Laine de bois	8	50	1500	14.9	11.5	20
Bauge	60	1500	1050	7.3	6.3	967
<b>Paroi</b>						<b>987</b>

## ■ Bauge Isolation extérieure

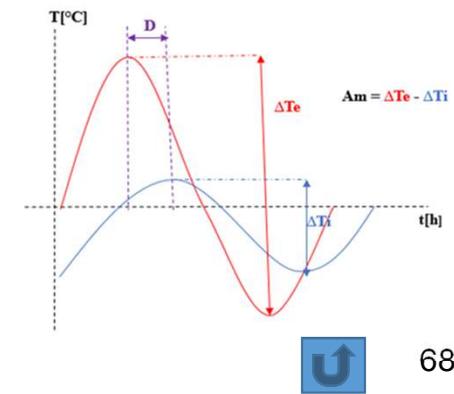
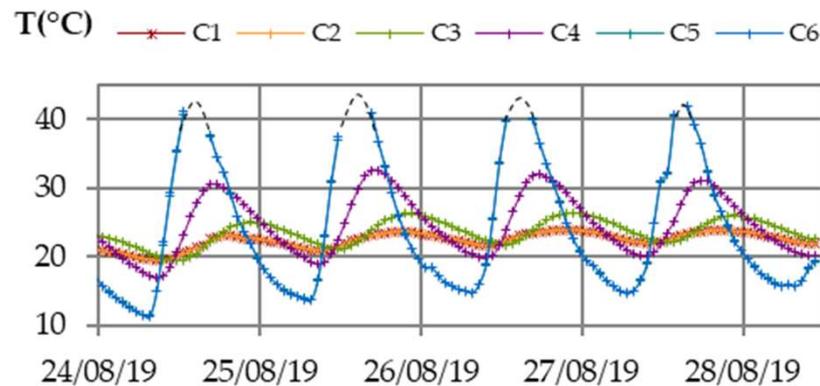
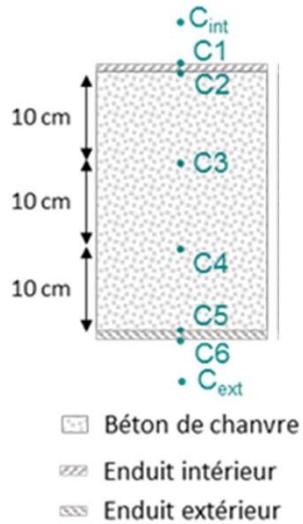
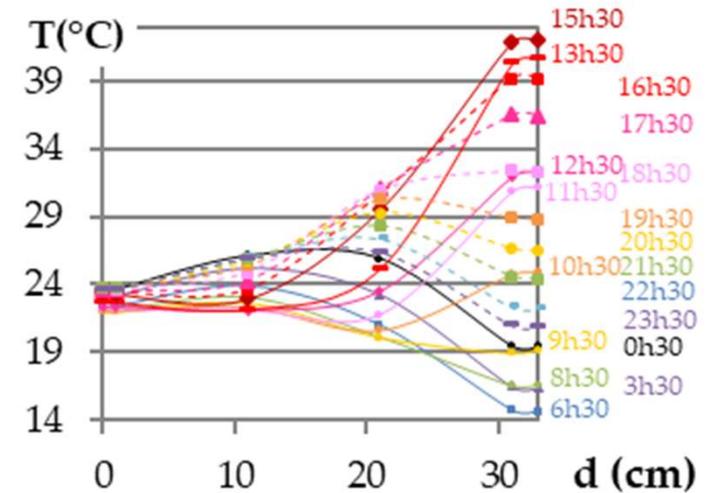
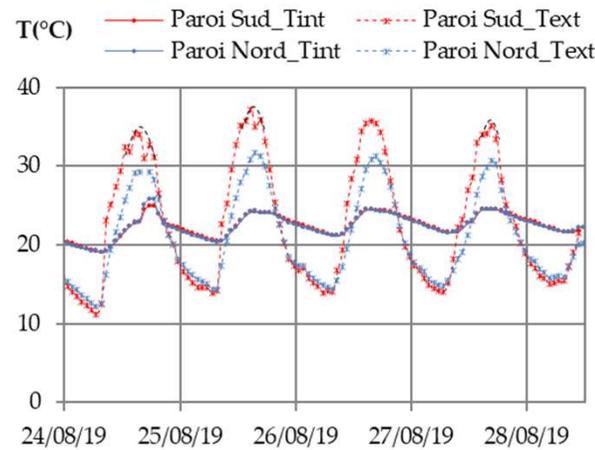
mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/(kg.K))	Tmoy fin (°C)	Tmoy in (°C)	E (kJ/m <sup>2</sup> )
Bauge	60	1500	1050	16.3	12.5	3635
Laine de bois	8	50	1500	8.7	7.2	9
<b>Paroi</b>						<b>3644</b>



# Mais...



Les enveloppes de bâtiments ne sont pas soumises à des sollicitations de régime permanent...  
Mais plutôt à des sollicitations de type dynamique :



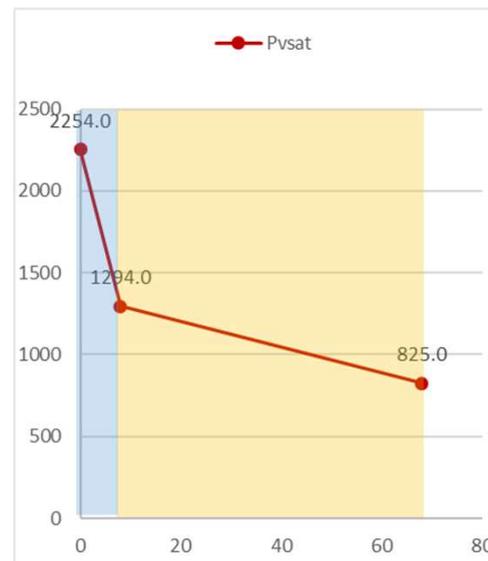
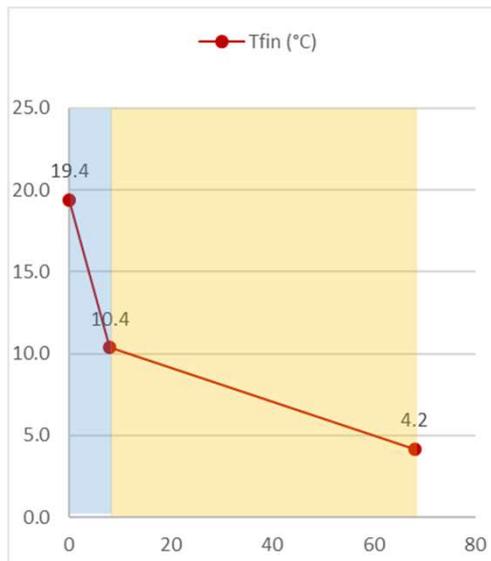
[Boumediene et al., 2020]



# Couplages hygrothermiques

- Exercice d'application : risque de condensation interne ?  
diagramme de glaser

Détermination du profil de pression de vapeur saturante à partir du profil de température



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

$$P_{vs} = f(\theta)$$

$\theta$ (°C)	$P_{vs}$ (Pa)	$\theta$ (°C)	$P_{vs}$ (Pa)
-15	165	21	2 488
-14	181	22	2 645
-13	199	23	2 810
-12	217	24	2 985
-11	238	25	3 169
-10	260	26	3 363
-9	284	27	3 567
-8	310	28	3 782
-7	338	29	4 008
-6	369	30	4 246
-5	402	31	4 496
-4	437	32	4 759
-3	476	33	5 034
-2	518	34	5 324
-1	563	35	5 628
0	611	36	5 947
1	657	37	6 281
2	706	38	6 631
3	758	39	6 999
4	813	40	7 383
5	872	41	7 786
6	935	42	8 208
7	1 002	43	8 649
8	1 073	44	9 111
9	1 148	45	9 593
10	1 228	46	10 098
11	1 313	47	10 625
12	1 403	48	11 175
13	1 498	49	11 750
14	1 599	50	12 350
15	1 705	100	101 419
16	1 818		
17	1 938		
18	2 064		
19	2 198		
20	2 339		

# Couplages hygrothermiques

- Exercice d'application : risque de condensation interne ?  
diagramme de glaser

Détermination du profil de pression de vapeur à partir du calcul du flux

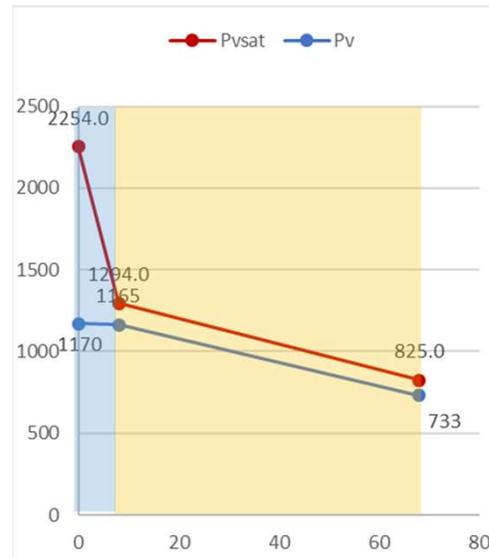
$$\dot{m}_v = \frac{P_{v,int} - P_{v,ext}}{\sum \frac{e}{\pi}}$$

Intérieur :  $T_i = 20 \text{ °C}$  ;  $HR_i = 50 \%$   
Extérieur :  $T_e = 4 \text{ °C}$  ;  $HR_e = 90 \%$

mx	e (cm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$
Bauge	60	1500	12
Laine de bois	8	50	1

$$\pi_{air} = 1,85 \cdot 10^{-10} \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$$

$$\mu = \frac{\pi_{air}}{\pi_{mx}}$$



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

$$P_{vs} = f(\theta)$$

$\theta$ (°C)	$P_{vs}$ (Pa)	$\theta$ (°C)	$P_{vs}$ (Pa)
-15	165	21	2 488
-14	181	22	2 645
-13	199	23	2 810
-12	217	24	2 985
-11	238	25	3 169
-10	260	26	3 363
-9	284	27	3 567
-8	310	28	3 782
-7	338	29	4 008
-6	369	30	4 246
-5	402	31	4 496
-4	437	32	4 759
-3	476	33	5 034
-2	518	34	5 324
-1	563	35	5 628
0	611	36	5 947
1	657	37	6 281
2	706	38	6 631
3	758	39	6 999
4	813	40	7 383
5	872	41	7 786
6	935	42	8 208
7	1 002	43	8 649
8	1 073	44	9 111
9	1 148	45	9 593
10	1 228	46	10 098
11	1 313	47	10 625
12	1 403	48	11 175
13	1 498	49	11 750
14	1 599	50	12 350
15	1 705	100	101 419
16	1 818		
17	1 938		
18	2 064		
19	2 198		
20	2 339		

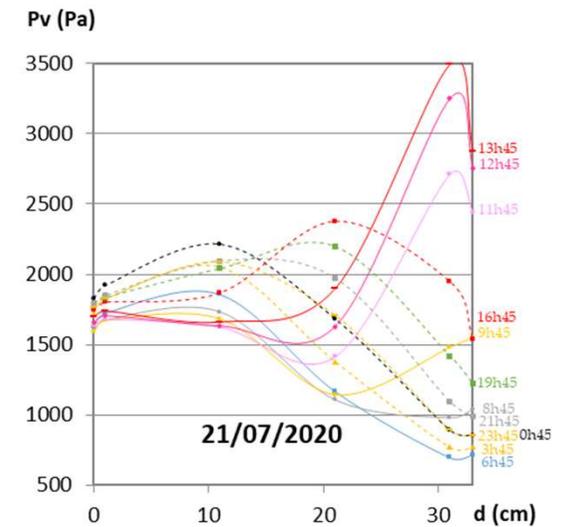
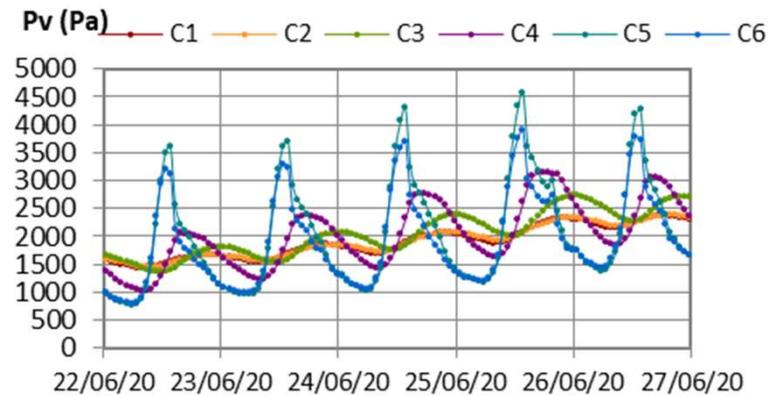
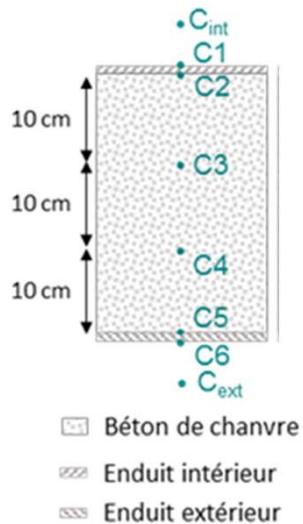


# Mais...



Les enveloppes de bâtiments ne sont pas soumises à des sollicitations de régime permanent...

Mais plutôt à des sollicitations de type dynamique :

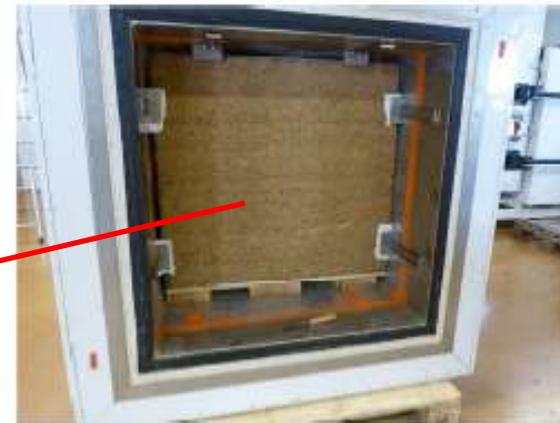
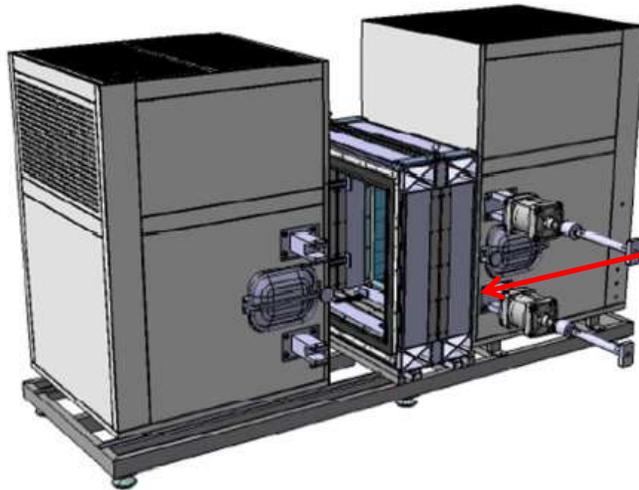


...D'où le besoin de recours à la modélisation

# Couplages hygrothermiques



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

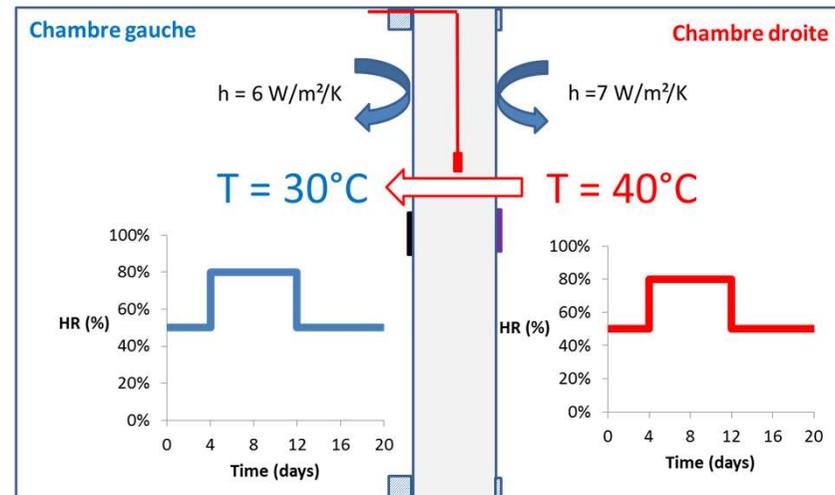


Echantillons : 90 x 90 x 10 [cm<sup>3</sup>].

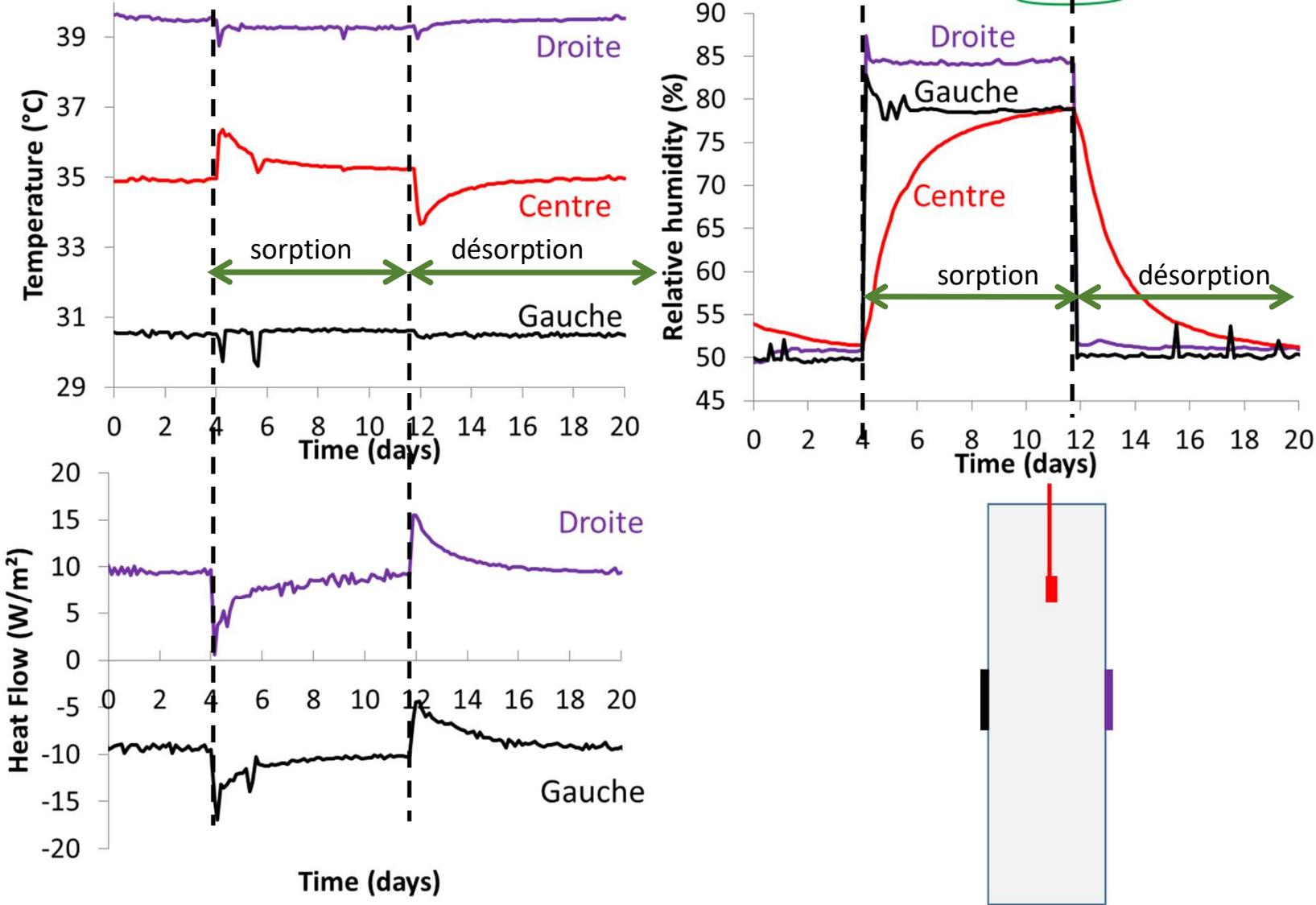
Double enceinte climatique DUO

## Instrumentation :

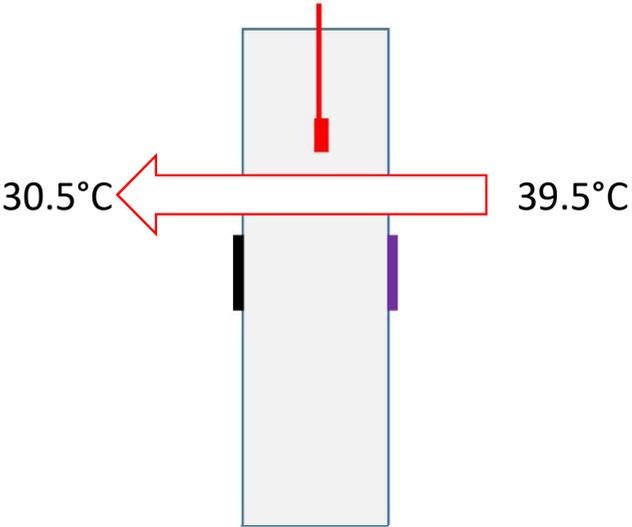
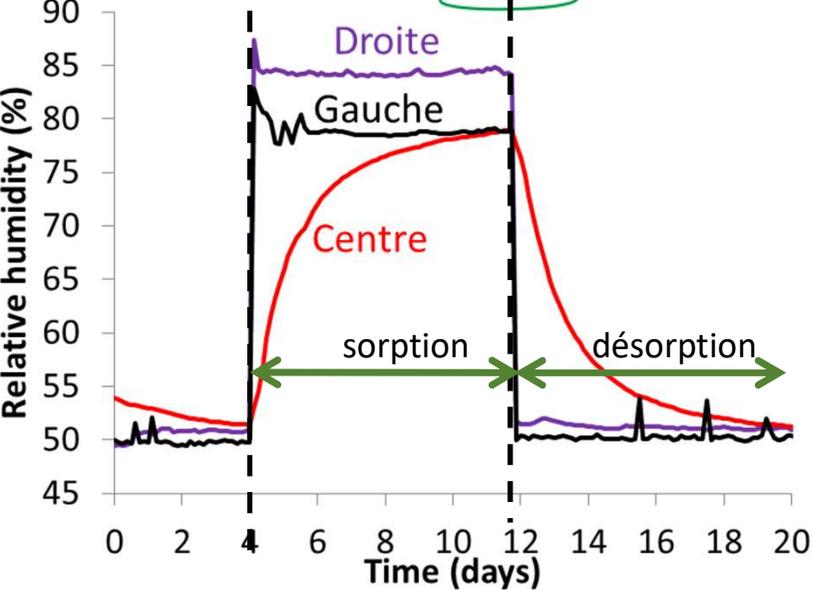
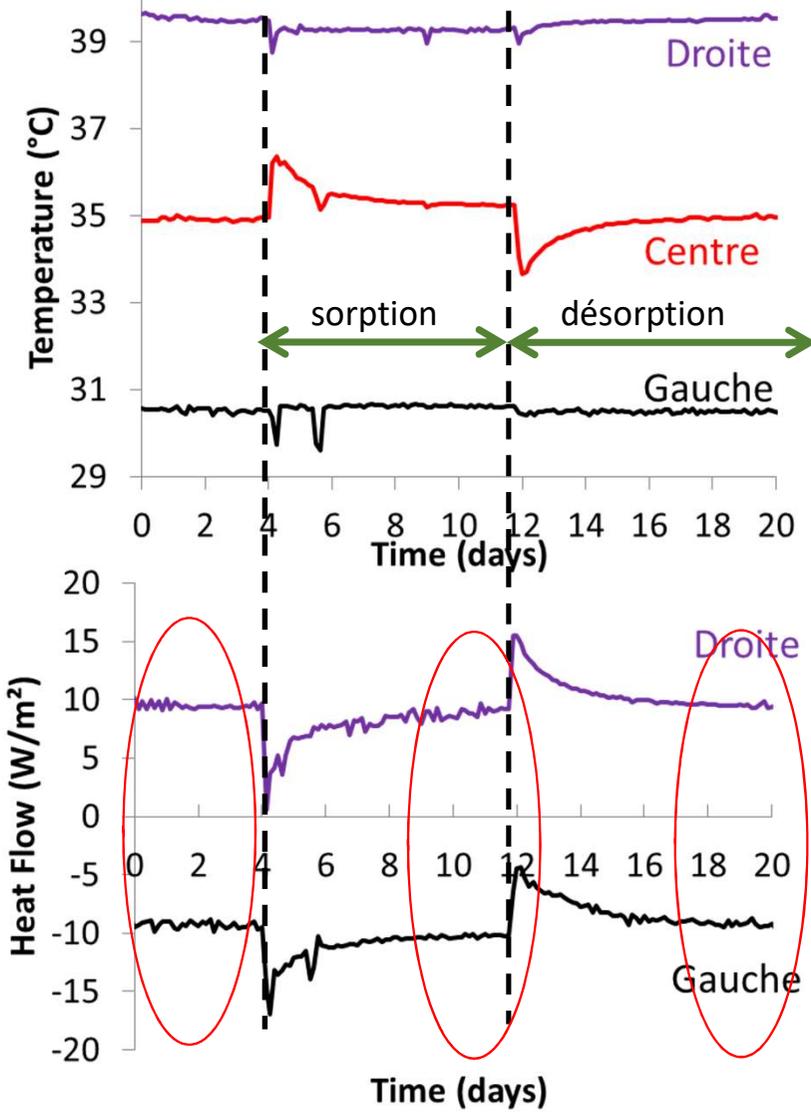
- Flux mètre + T°C surface gauche
- Flux mètre + T°C surface droite
- Température mur



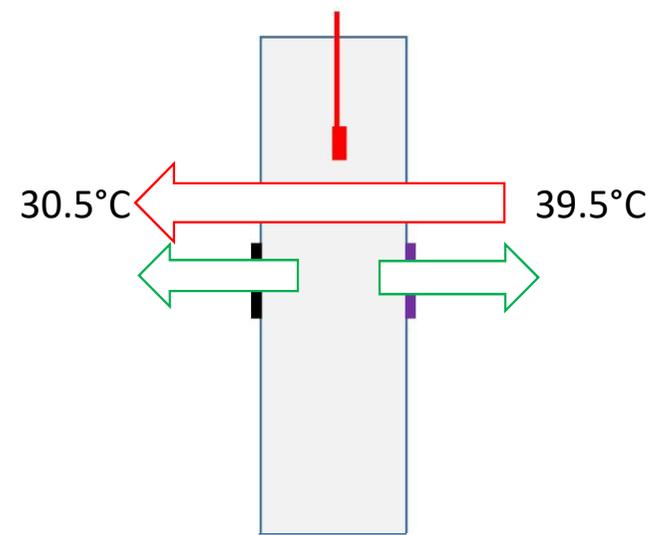
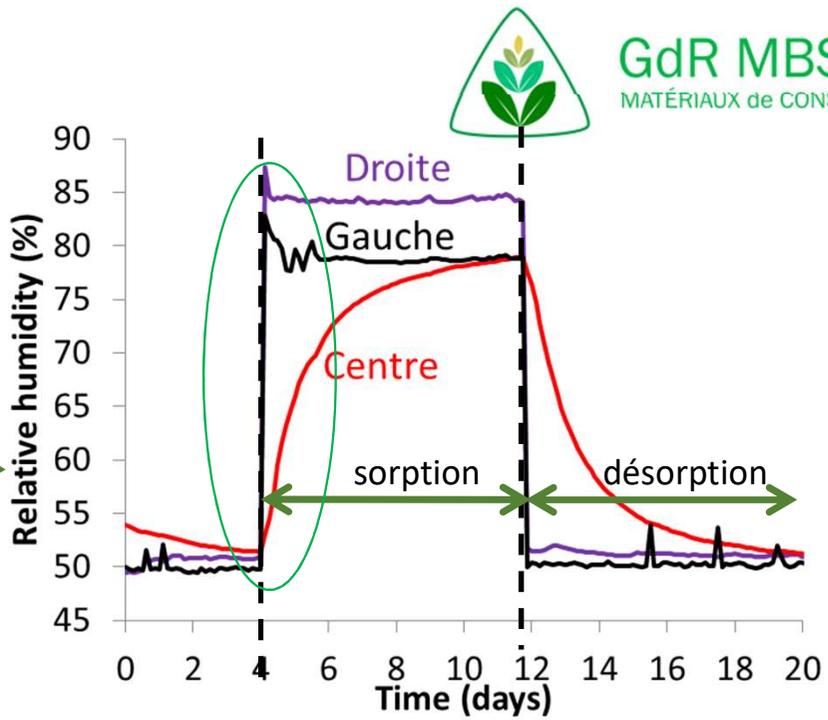
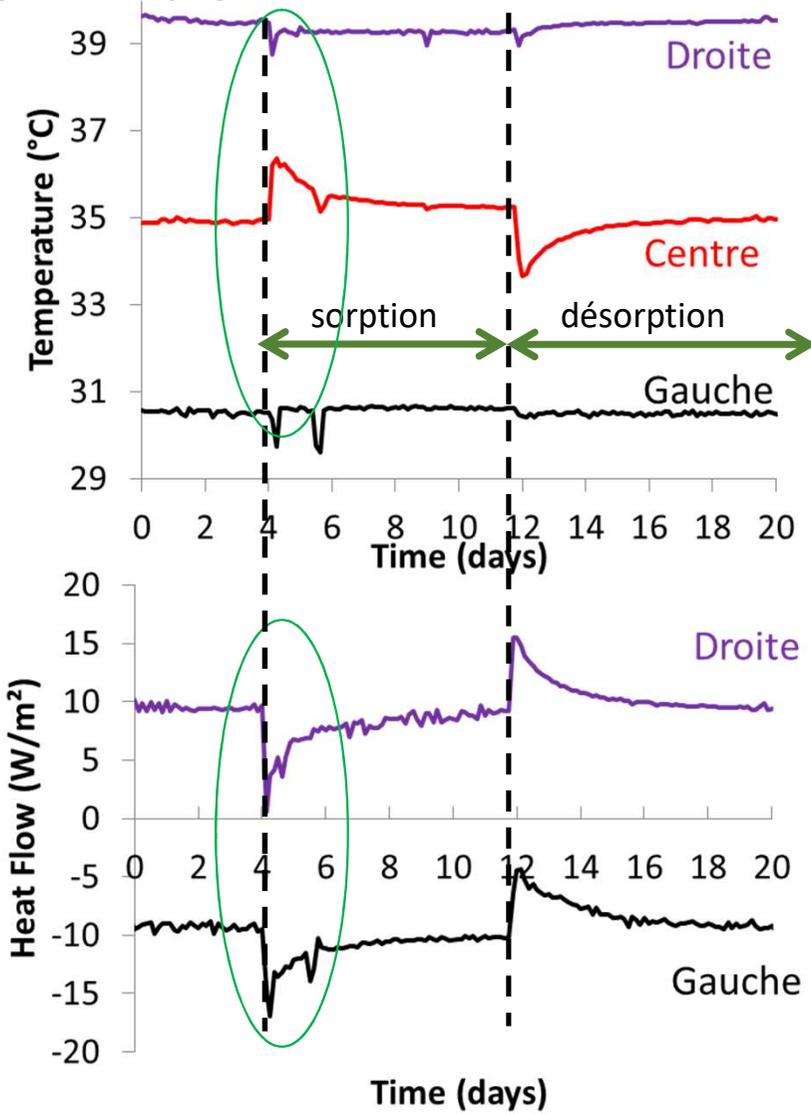
# Couplages hygrothermiques



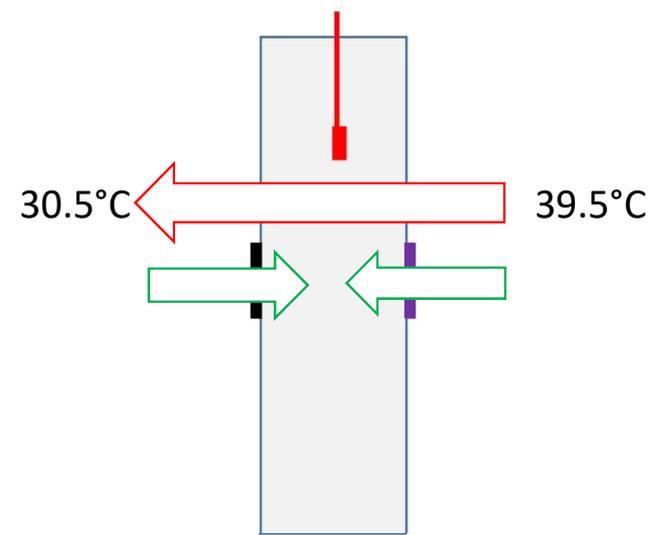
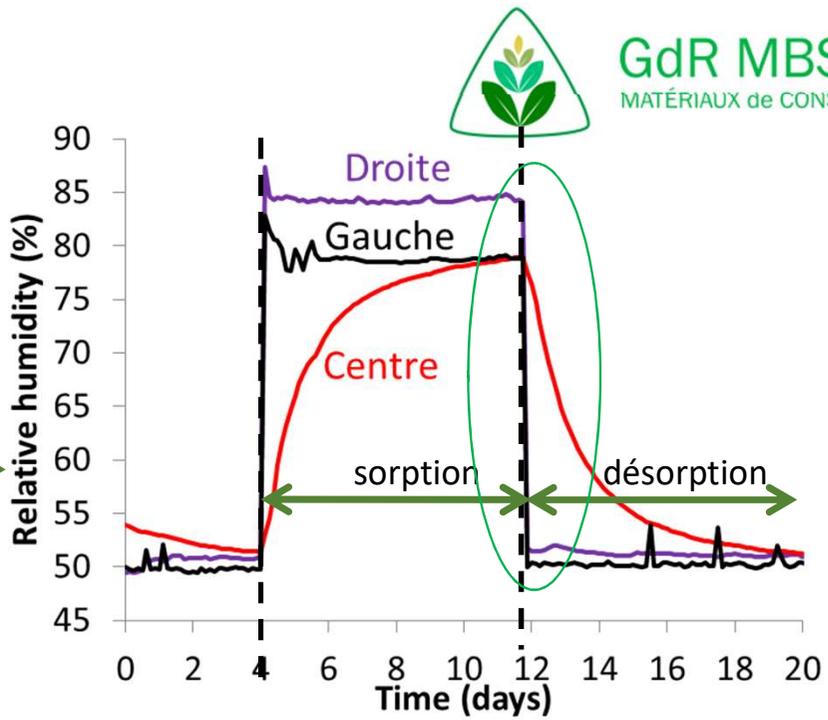
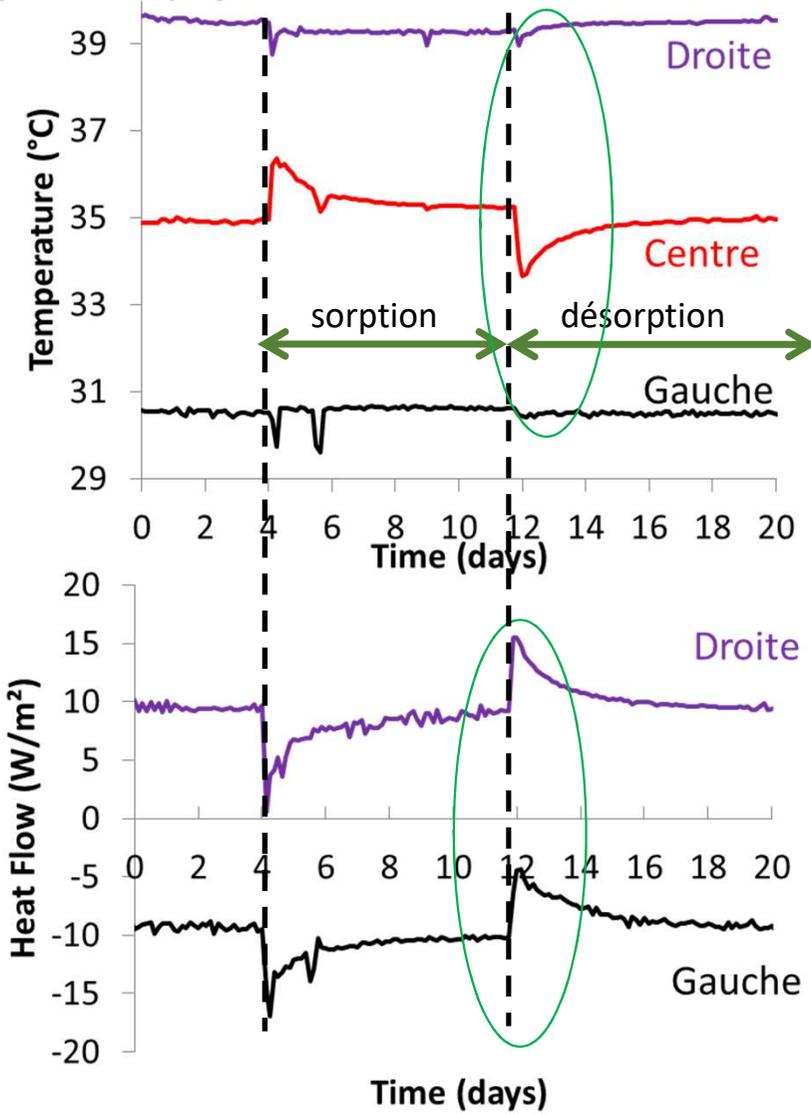
# Couplages hygrothermiques



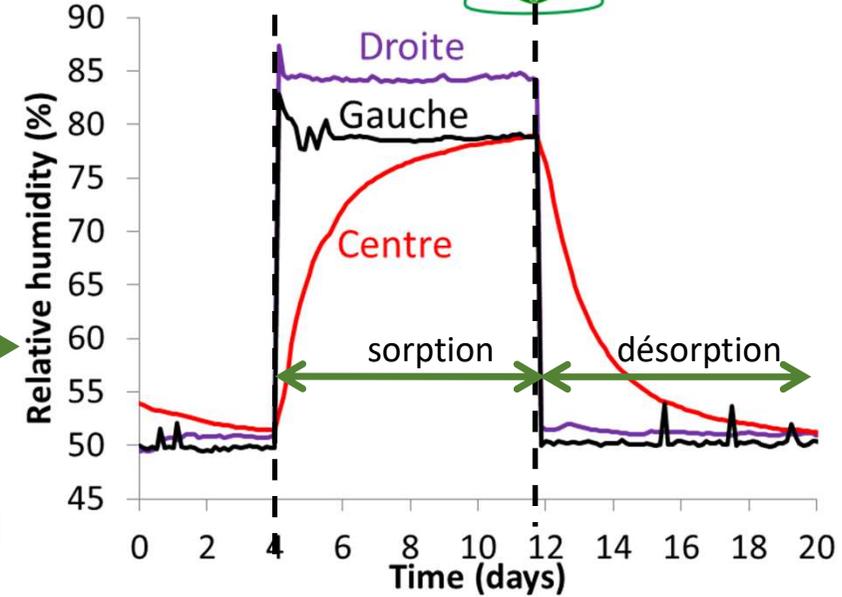
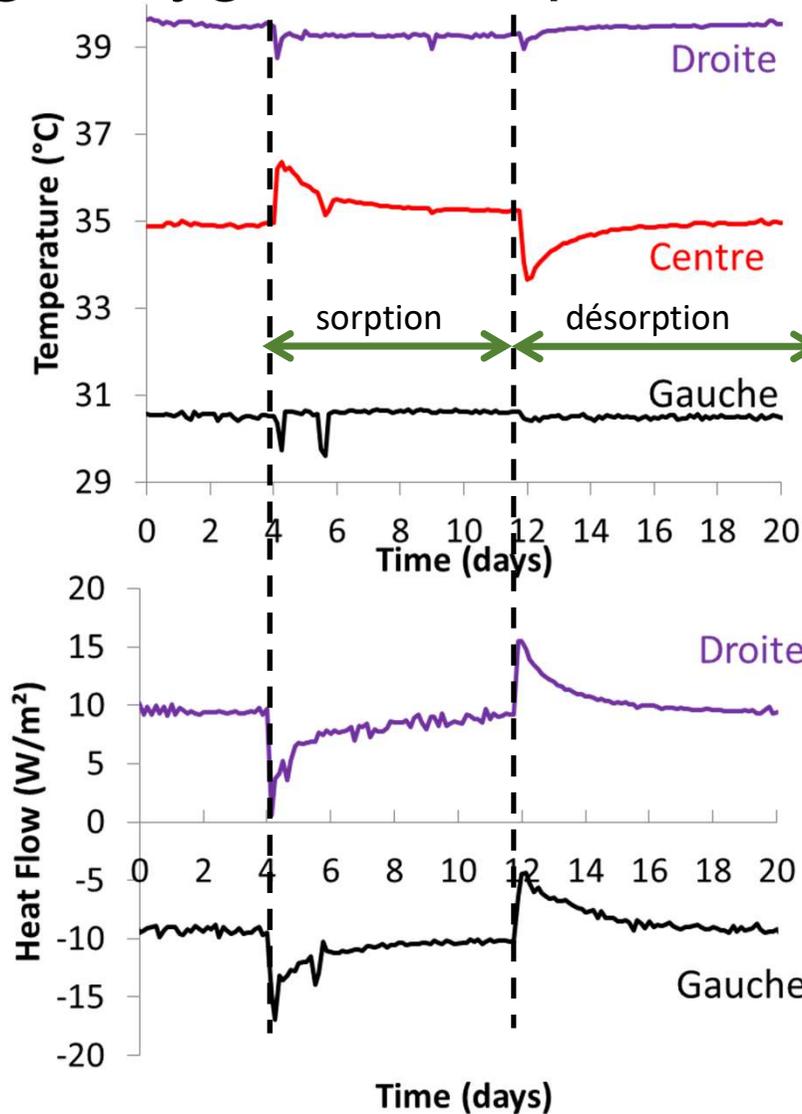
# Couplages hygrothermiques



# Couplages hygrothermiques

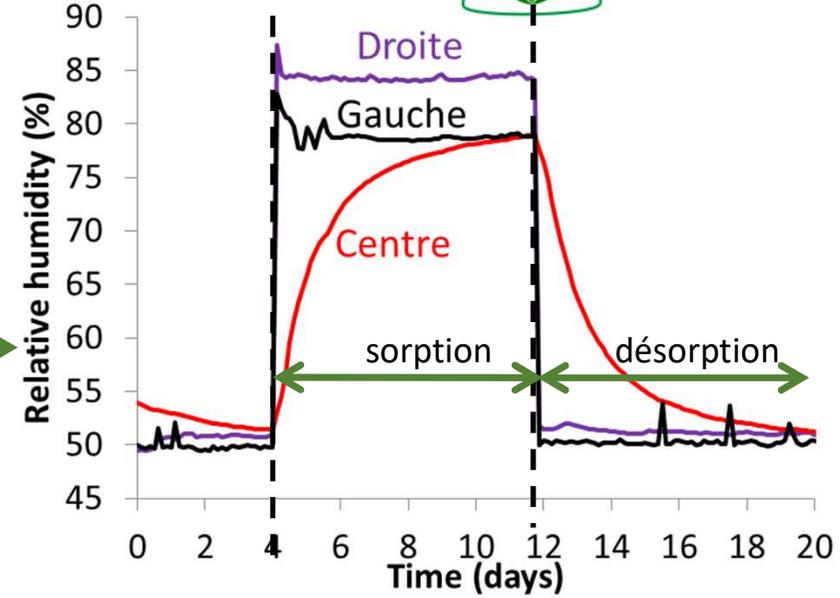
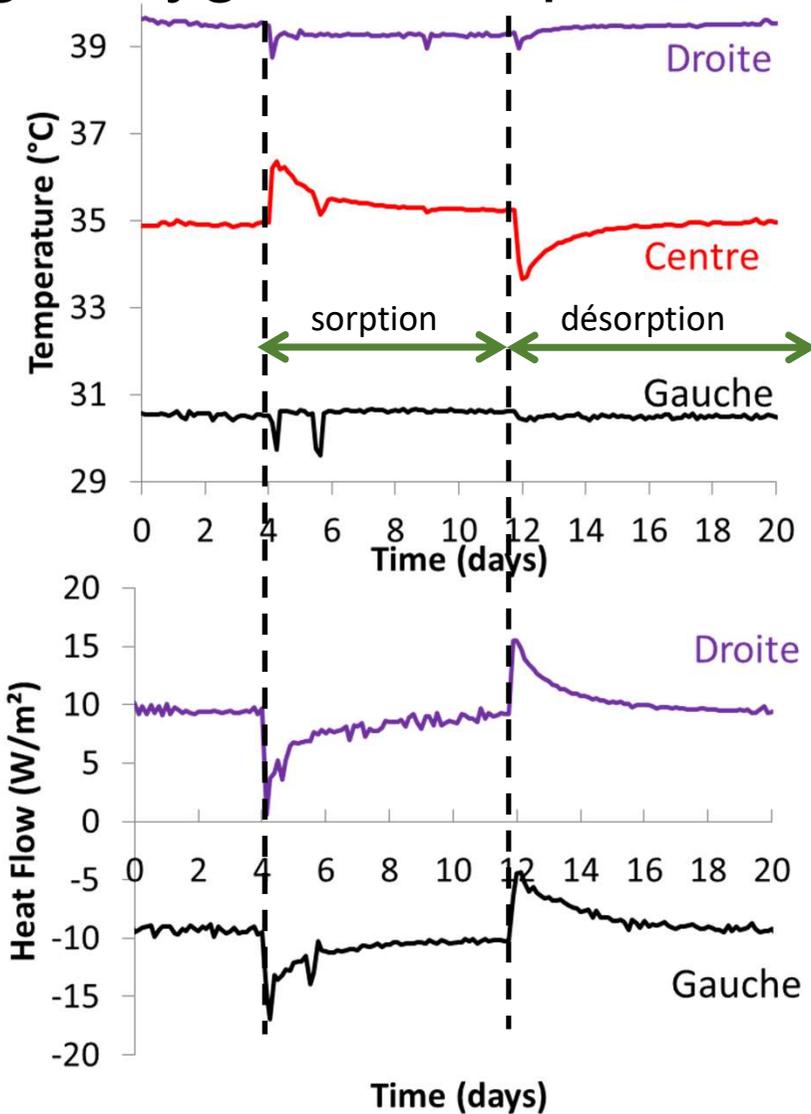


# Couplages hygrothermiques



- **Sorption** => réduction du flux de chaleur entrant dans le mur en surface chaude (ex. réduction des déperditions en soirée)
- **Désorption** => réduction du flux de chaleur sortant du mur en surface froide (ex. maintien de la fraîcheur en journée)

# Couplages hygrothermiques



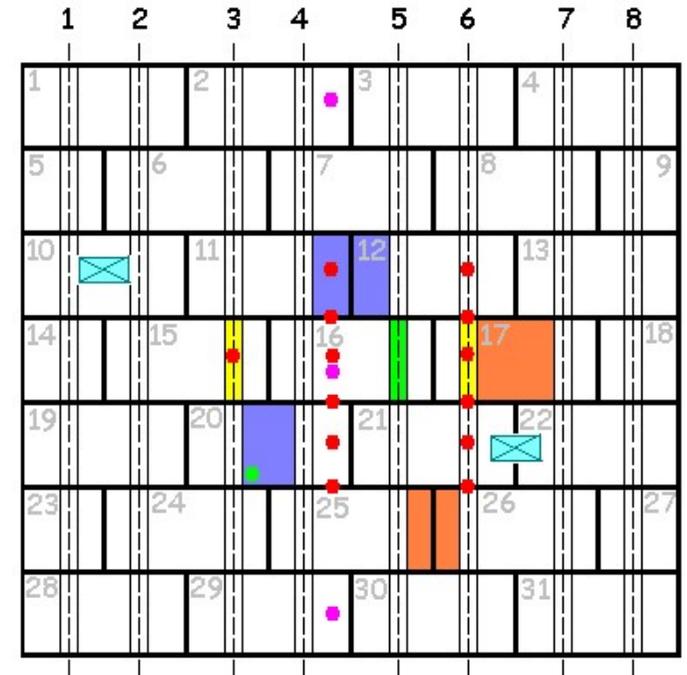
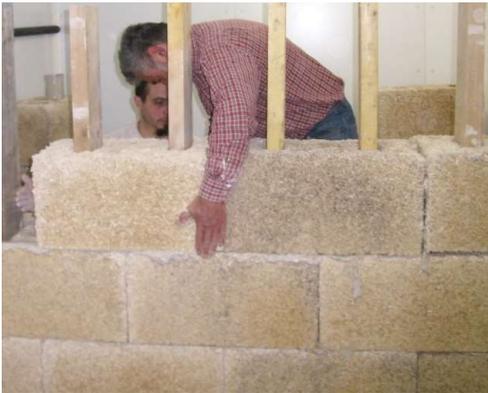
➤ **Ordre de grandeur des flux de chaleurs induits par le changement de phase**

Supérieurs à 75% du flux thermique dû à un gradient de température de 10°C entre l'intérieur et l'extérieur pendant au moins 1 jour à 30°C et 40°C

# Couplages hygrothermiques



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



- 70 thermocouples of type K ( $\pm 0.1$  °C)
- 20 Sensirion probes (SHT 75  $\pm 0.3$ °C à 25°C et  $\pm 1.8$ % HR sur la plage 10-90%HR)

# Couplages hygrothermiques

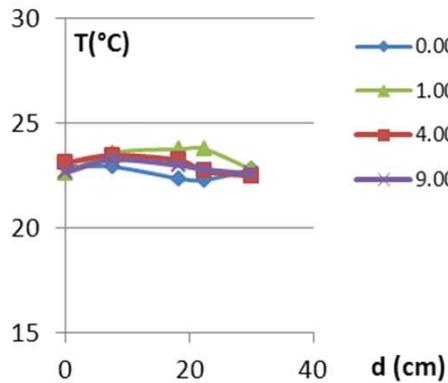


GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

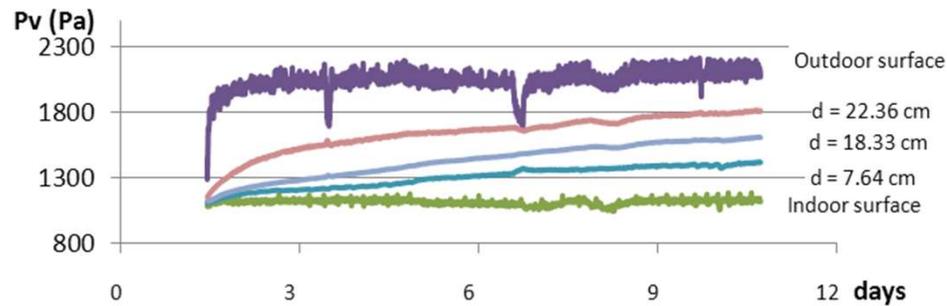
**Intérieur**  
23°C 40% RH



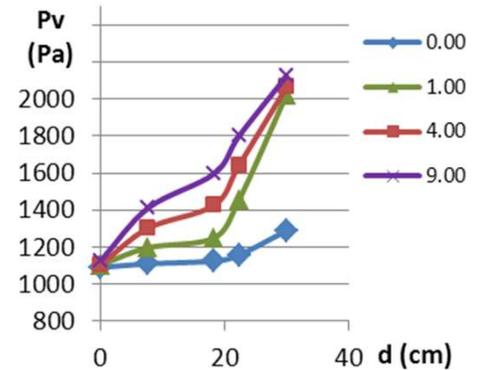
**Extérieur**  
23°C 40%RH to 23°C 80% RH



Conditions  
isothermes



Régime permanent à 7 jours



Diffusion  
homogène

# Couplages hygrothermiques



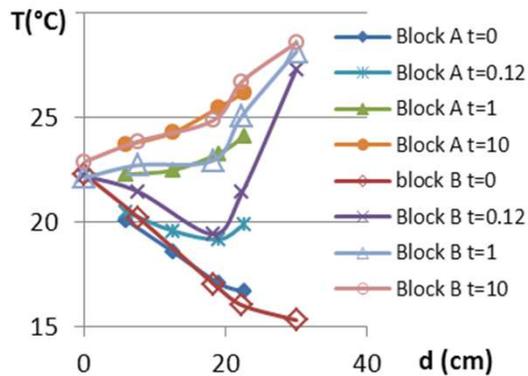
## Intérieur

23°C 40% RH

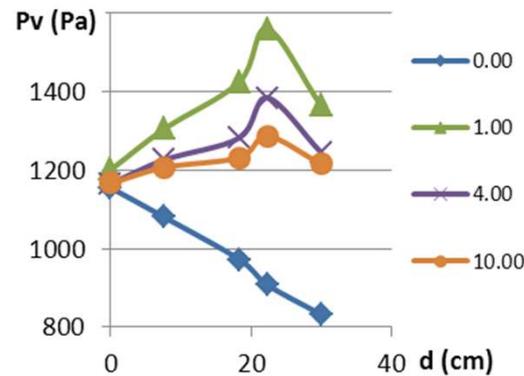
Flux simultanés de  
chaleur et d'humidité

## Extérieur

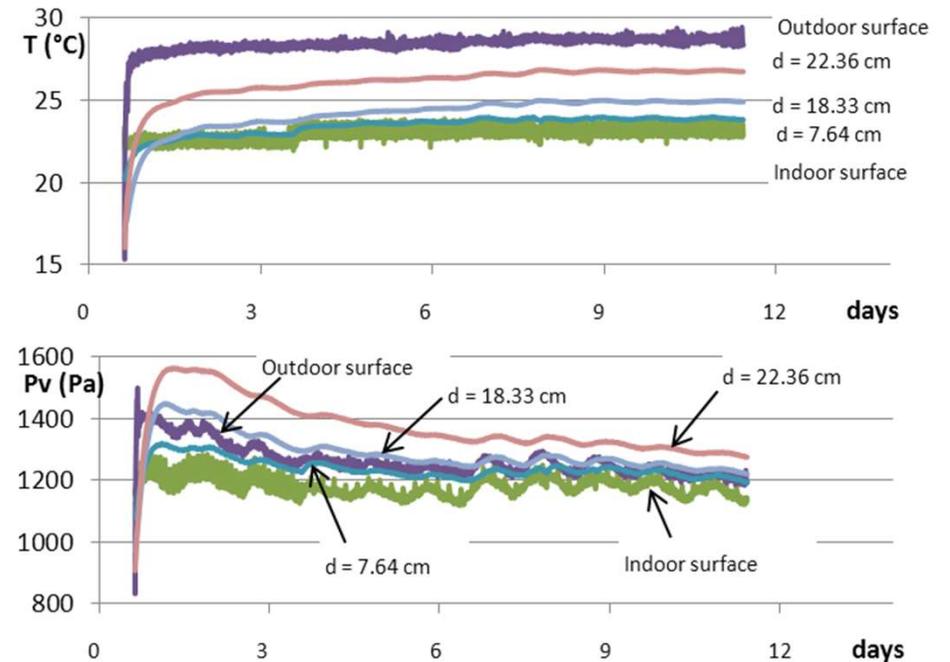
15°C 45 %RH to 28°C 32% RH



Profil linéaire à l'état initial et final (reg permanent)



Evolution du profil jusqu'à 10 jours  
Phénomènes de sorption - désorption



Réponse rapide en température  
Phénomènes de sorption - désorption

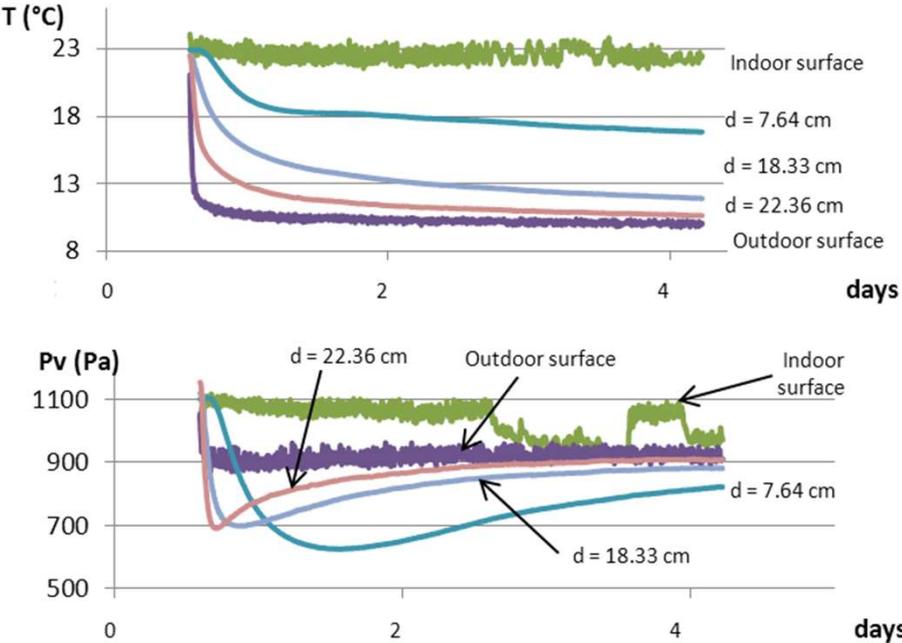
# Couplages hygrothermiques



**Intérieur**  
23°C 40% RH

Flux simultanés de chaleur et d'humidité

**Extérieur**  
23°C 40% RH to 9.5°C 77%RH



Réponse rapide en température  
Phénomènes de sorption - désorption



# Références bibliographiques



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

- Aït Oumeziane, Y., 2013. Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre. INSA de Rennes, INSA de Rennes, France.
- Bankvall, C. (1973) Heat Transfer in Fibrous Materials. Journal of Testing and Evolution, 1, 235-243.
- Boumediene, N., Collet, F., Prétot, S., Lanos, C., Dubois, F., 2020. Comportement thermique d'été d'un bâtiment rénové en béton de chanvre. AJCE, special issue, RUGC 2020 38, 4.
- Colinart, T., Glouannec, P., 2017. Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 1: Experimental evidence and modeling. Energy Build. 139, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.082>
- Collet, F., Pretot, S., 2014a. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. Constr. Build. Mater. 65, 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>
- Collet, F., Pretot, S., 2014b. Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. Build. Environ. 82, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.018>
- Fabbri, A., McGregor, F., Costa, I., Faria, P., 2017. Effect of temperature on the sorption curves of earthen materials. Mater. Struct. 50, 253. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1122-7>
- Fabbri, A., McGregor F., 2017. Impact of the determination of the sorption-desorption curves on the prediction of hemp concrete hygrothermal behaviour, Construction and Building Materials 157, 108-116.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J, Sing K., 1999. Adsorption by Powders and Porous Solids, Academic Press.
- Viel, M., Collet, F., Lanos, C., 2018. Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material. Ind. Crops Prod. 120, 214–237. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>

# First International RILEM Conference on Earthen Construction

Fundamentals and Applications for a Circular Economy

18 & 19 March 2022 - Paris - Gustave Eiffel University



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## Conference Topics:

- Molecular simulation
- Nanoscale experiments
- Physical-Chemistry
- Rheology
- Processes
- Mechanical characterization
- Seismic behavior
- Hydrothermal properties
- Large scale experiments and applications
- Durability
- Life Cycle Assessment
- Economic impact
- Architecture

**Extended Abstract submission**  
**before November 30, 2021**  
<https://conf-earth.sciencesconf.org>



 **Université  
Gustave Eiffel**

 **weber**  
SAINT-GOBAIN

**FUTURE**  
INVENTER LES VILLES DE DEMAIN



# Numéro spécial MDPI



an Open Access Journal by MDPI



### Development and Characterization of Bio-Based Insulation Materials

Guest Editors:

**Dr. Florence Collet**  
Laboratoire de Génie Civil et  
Génie Mécanique, Université de  
Rennes, Rennes, France  
florence.collet@univ-rennes1.fr

**Dr. Sylvie Prétot**  
Laboratoire de Génie Civil et  
Génie Mécanique, Université de  
Rennes, Rennes, France  
sylvie.pretot@univ-rennes1.fr

Deadline for manuscript  
submissions:  
**31 December 2021**

#### Message from the Guest Editors

The reduction of the environmental impact of construction requires the development of building materials that reduce the energy needs and the carbon footprint of buildings. Bio-based insulation building materials, made from bio-based fibers or aggregates, meet these two objectives simultaneously. They can also contribute to indoor comfort. However, these materials still represent a very small part of the construction market. There is a need to summarize and increase our knowledge of their properties, their durability, and their application in buildings.

We invite you to submit new or state-of-the-art research on the development and characterization of bio-based insulating building materials, with a particular focus on hygrothermal and acoustic properties, durability, and life cycle assessment. Studies may be performed at material, wall, or building scale. Experimental and numerical studies are welcome. We encourage contributions on recommendations for implementation.



mdpi.com/si/61009

## Special Issue



**GdR MBS**  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Remise de 50% sur 5 articles –  
contacter F. Collet et/ou S. Prétot