



# Caractérisation des propriétés hygrothermiques des matériaux biosourcés



Contact: [kamilia.abahri@imt.ens-cachan.fr](mailto:kamilia.abahri@imt.ens-cachan.fr)

# Plan

- **Contexte & objectifs**
- **Matériaux biosourcés**
- **Propriétés hygrothermiques macroscopiques**
- **Caractérisation microscopique**
- **Moisissure & durabilité**
- **Conclusion et perspectives**

## Contexte

Bâtiments : 43 % de la consommation énergétique et 23 % de production de CO<sub>2</sub>

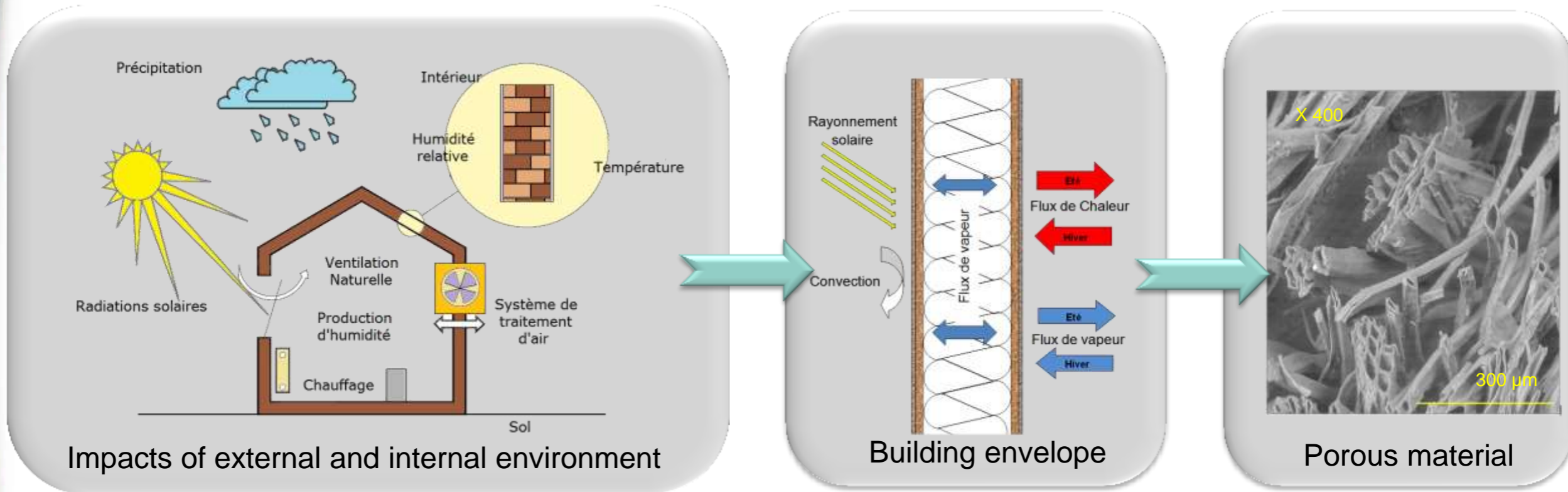


Le choix préliminaire des matériaux de construction joue un rôle important dans la réussite d'un projet HQE

# Contexte

Multi-échelles (espace & temps) ...

Consommation énergétique plus d'un an ??



$3 \cdot 10^7 s$



0.1s

$10^{-6} m$

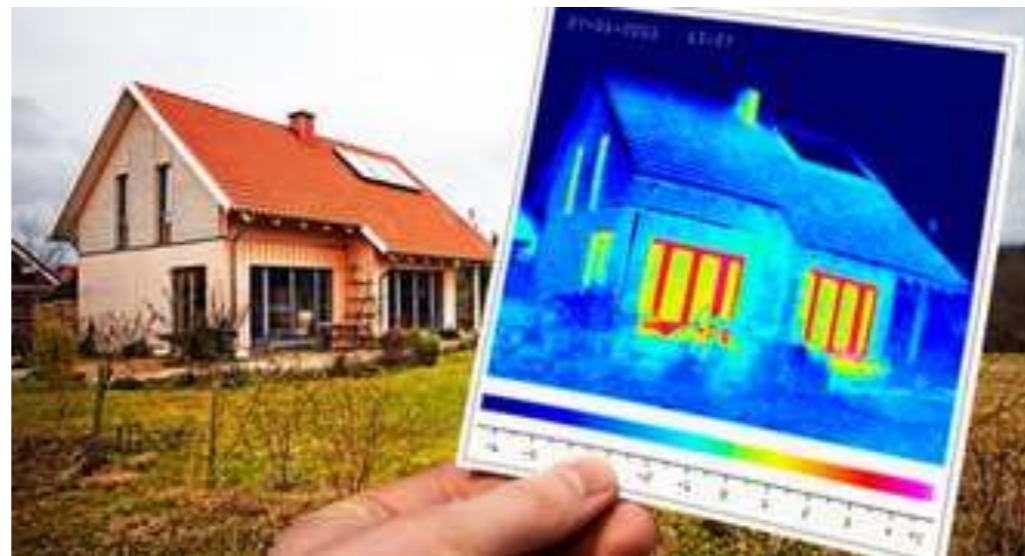


10m

# Problématique

## Performance énergétique et humidité

- Prise en compte des transferts hydriques peut réduire la demande énergétique des bâtiments jusqu'à 30 % (Mendes et al., 2003; Künzle et al., 2005 ; Qin et al., 2009)



Améliorer les propriétés hydriques des matériaux...

# Définition & terminologie

**Arrêté du 19 décembre 2012** (création label bâtiment biosourcé)

- Matière biosourcés : issue de la biomasse végétale ou animale pouvant être utilisée comme matière première dans des produits de construction

**Produit de construction biosourcé**

- produit de construction **totalemment ou partiellement** biosourcé

**Le bois est le premier des matériaux biosourcés en volume**



# Définition & terminologie

## Création du label

- Mise en lumière de la qualité environnementale et valorisation des démarches volontaires des maîtres d'ouvrage intégrant une part significative de ces matériaux dans leur construction
- Trois niveaux de label correspondant au taux d'intégration de matériau biosourcé :

Niveau	Taux minimal		Disposition particulière
	Maisons individuelles groupées*	Logements collectifs**	
1 <sup>er</sup> niveau 2012	<b>42</b> kg/m <sup>2</sup> SP	<b>18</b> kg/m <sup>2</sup> SP	Au moins 2 produits de construction biosourcés de fonctions différentes
2 <sup>ème</sup> niveau 2012	<b>63</b> kg/m <sup>2</sup> SP	<b>24</b> kg/m <sup>2</sup> SP	Au moins 2 familles de produits de construction biosourcés différentes
3 <sup>ème</sup> niveau 2012	<b>84</b> kg/m <sup>2</sup> SP	<b>36</b> kg/m <sup>2</sup> SP	

# Définition & terminologie

Cadres de fenêtre  
Innobat : résine  
epoxy (partiellement)  
biosourcée + fibres  
de lin

chimie du bâtiment  
(colles, adjuvants,  
peintures...)



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

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

matériaux  
composites  
plastiques  
(matrices, renforts,  
charges...)



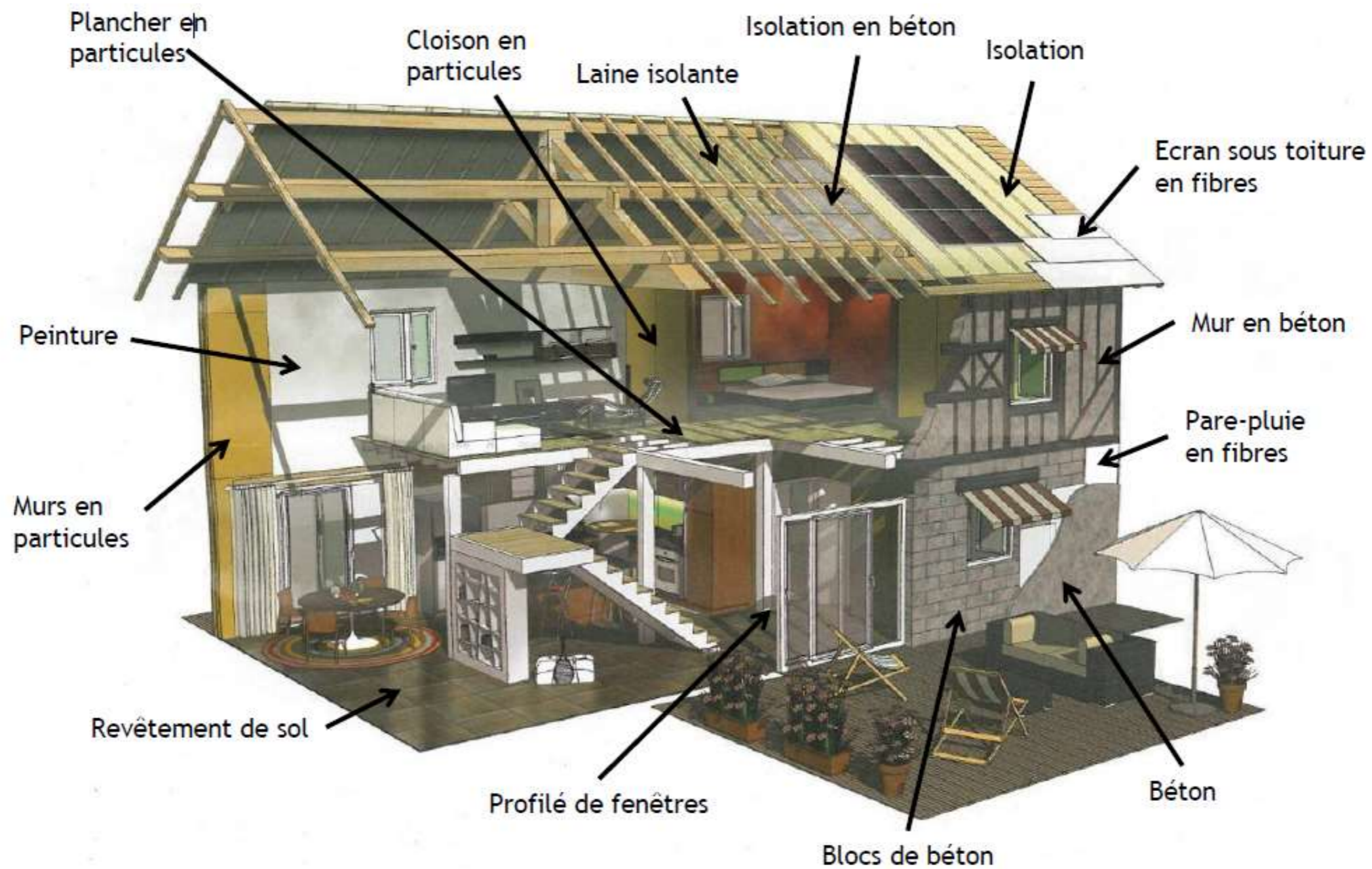
mortiers et  
bétons (béton de  
chanvre, de  
bois, de lin...)



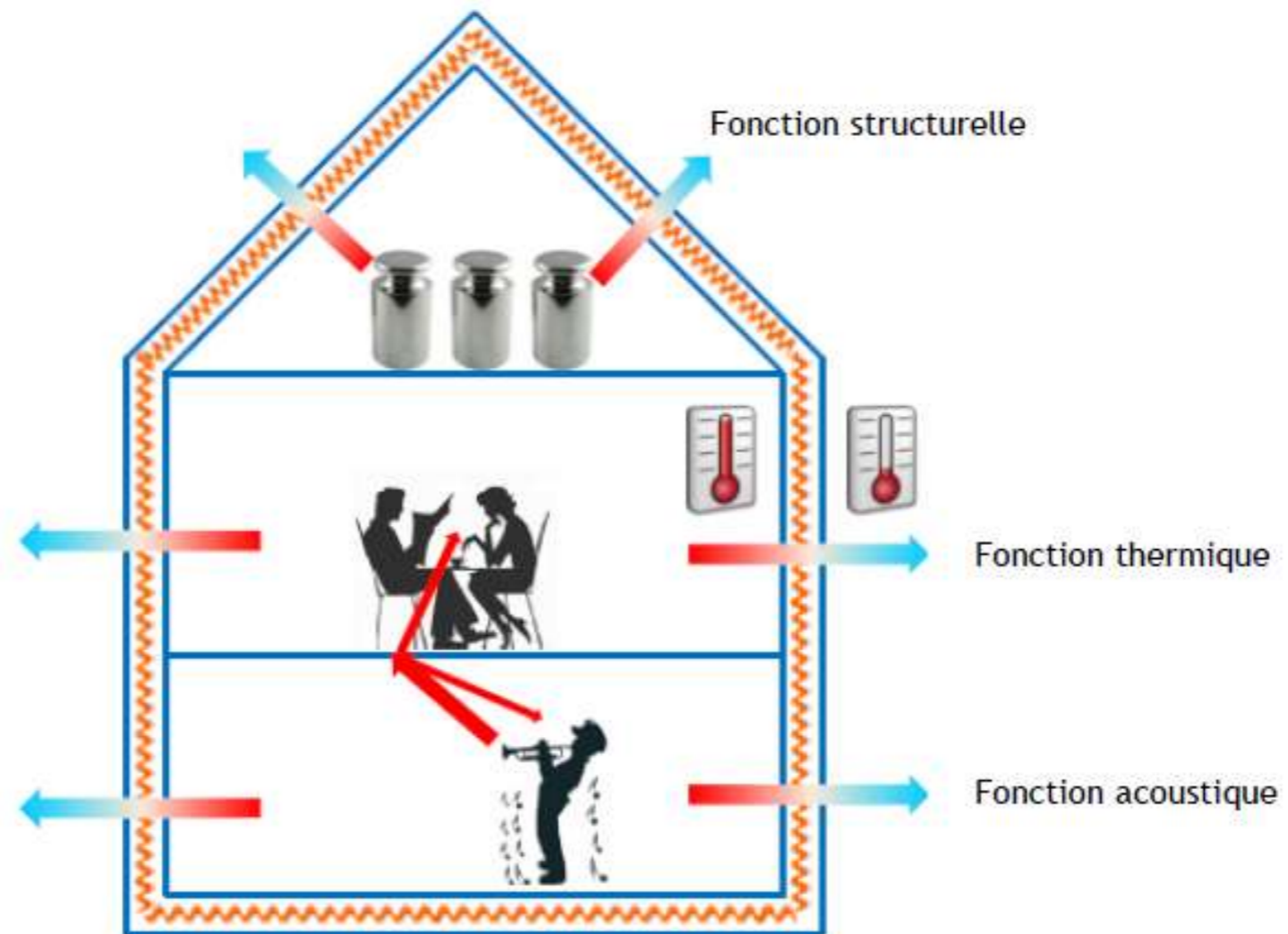
Coupe d'une maison : exemple d'intégration de produits biosourcés



# Définition & terminologie



# Définition & terminologie



# Freins

...un matériau biosourcé n'est pas forcément ?

## Sain

Le caractère biosourcé ne signifie pas sans impact sur la santé (liants, retardateurs de feu, produits antiparasites)

## Naturel

Seule l'origine est naturelle ; le matériau est généralement plus ou moins transformé

## Local

Un matériau biosourcé peut venir de loin

# Freins

## Manque de structuration



Tissu industriel composé de petites et très **petites entreprises** aux capacités de développement limitées

## Réglementation

Réglementation et corpus normatif difficile à comprendre et à gérer par les entrepreneurs de la construction

**Manque de (re)connaissance** des matériaux biosourcés par les professionnels

# FDES des matériaux biosourcés

## FDES : Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires

- Bilan environnemental des matériaux de construction pouvant être utilisé dans un projet
- Norme française NF P 01-010 (bientôt norme européenne EN 15804)
- Exemple : isolant chanvre/lin en rouleaux  
=> Composition : chanvre (44%) / lin (44%) / polyester (12%) + produit anti-fongique



# FDES des matériaux biosourcés



Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages



Accueil Consultation Catalogue de la base Recherche d'un produit Lexique Documentation F.A.Q Espace de déclaration

Accueil >> Accueil Consultation >> Recherche d'un produit >> Produit détaillé

← Produit détaillé

## Biofib' duo isolant Chanvre/Lin (v1.1)

Organisme déclarant: CAVAC BIOMATERIAUX

Informations Générales **Unité fonctionnelle** Indicateurs environnementaux Santé Confort Documents

### Unité fonctionnelle (U.F.) ⓘ

Assurer une fonction d'isolation thermique sur 1m<sup>2</sup> de paroi pendant une annuité et sur une durée de vie typique de 50 ans avec une résistance thermique de 2,44 K.m<sup>2</sup>.W-1. tout en assurant les performances prescrites du produit.

### Quantité ⓘ

1 m<sup>2</sup>

### Durée de vie du produit ⓘ

50 an(s)

### Caractéristiques non contenues dans l'unité fonctionnelle ⓘ

N/A

### Taux de chute lors de la mise en oeuvre

0 %

### Fréquence d'entretien

0 an(s)

### Déclaration de contenu ⓘ

Utilisation d'un fongicide pour renforcer la protection naturelle des fibres chanvre et lin, et répondre à la norme pour le classement des produits anti-moisissures:2-Octyl-2H-isothiazole-3-one: 4E-4 Kg par annuité

### Produits constitutifs de l'unité fonctionnelle ⓘ

L'isolant est commercialisé en rouleaux de 3,6m de long et 0,6m de large pour une épaisseur de 100mm. 1m<sup>2</sup> d'isolant Biofib Duo possède une densité de 30 kg/m<sup>3</sup> et peut être décrit comme suit :Chanvre: 1,32 Kg/m<sup>2</sup>Lin: 1,32 Kg/m<sup>2</sup>Polyester: 0,36 Kg/m<sup>2</sup>Produit fongique: 0,02 Kg/m<sup>2</sup>Pour être délivré sur le chantier, le produit sera conditionné au moyen de :Palette: 0,4902 Kg/m<sup>2</sup>Gaine PE: 0,0767 Kg/m<sup>2</sup>Housse PE:0,0374 Kg/m<sup>2</sup>Colle: 0,0013 Kg/m<sup>2</sup>Aucun produit complémentaire n'est préconisé pour la mise en oeuvre

()

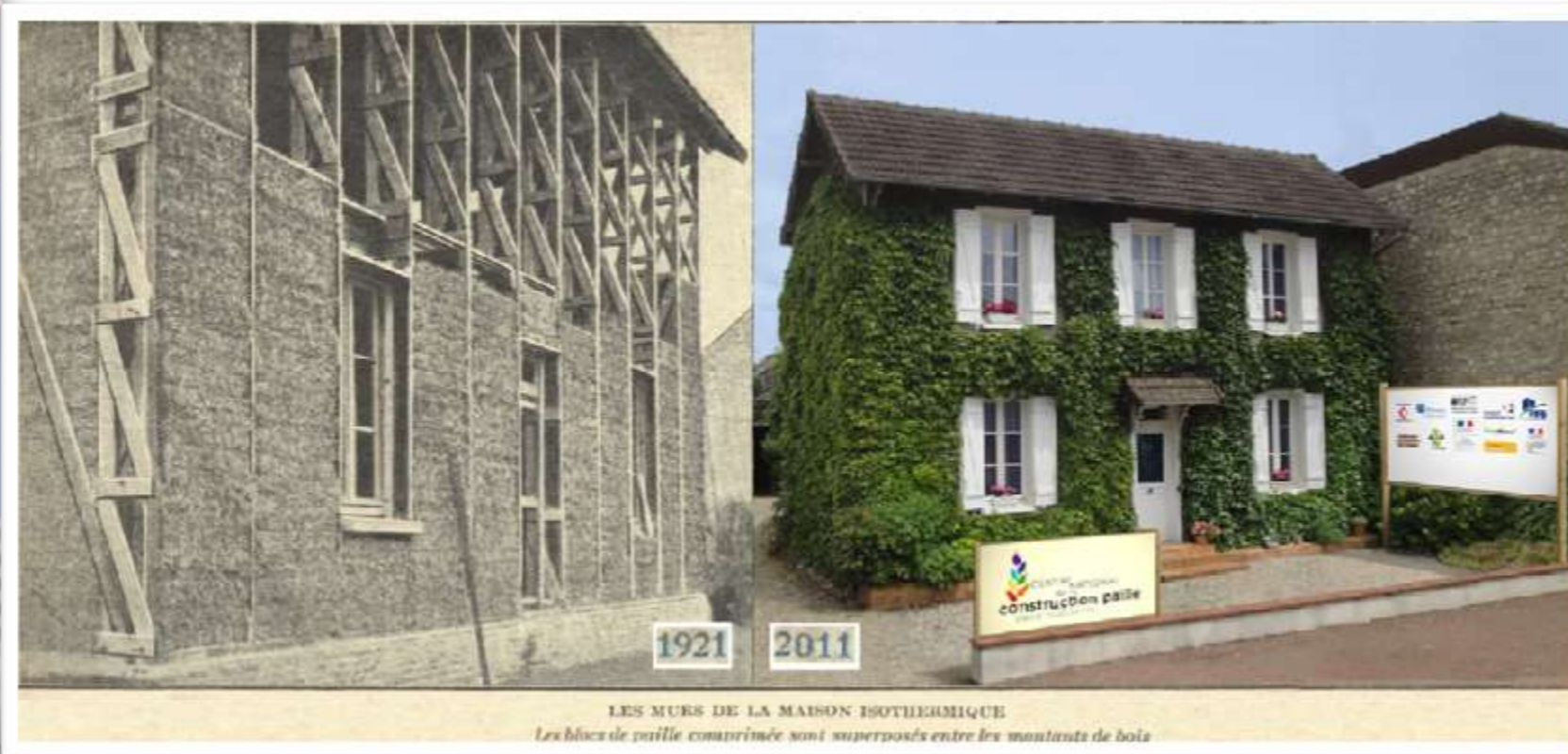
# Exemples de bâtiments en paille

Maison Feuillette, 1921, Montargis Plus ancien bâtiment en paille connu en Europe

FRAICHES EN ÉTÉ, CHAUDES EN HIVER,  
LES MAISONS DE PAILLE  
SONT AVANT TOUT ÉCONOMIQUES

Par Gustave LAMACHE

[Science et Vie n° 56, mai 1921]



[Source : Wikipédia]

# Exemples de bâtiments en paille

- Maisons en paille aux USA depuis 1870 (Etat du Nebraska)
- 3500 bâtiments paille en France, 300 nouvelles constructions/an
- Murs enduits de terre, chaux
- Règles professionnelles de construction en paille en France (2012) pour le remplissage isolant et support d'enduit





# Exemples de bâtiments en paille

## Exemples de bâtiments en béton de chanvre

- Rénovation de la maison de la turque (Nogent sur seine, 1986)
- Charles Rasetti, première rénovation en béton de chanvre en France



## Quelques matériaux



### **Mortiers et bétons de chanvre**

Utilisations : murs avec isolation répartie, isolation des sols et des toitures, enduits pour l'isolation thermique (intérieure et extérieure)

- Norme, certification : Les bétons et mortiers de chanvre sont couverts par les règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en bétons de chanvre
- + Légèreté, bonnes performances thermiques, acoustiques et hygrothermiques
  - Mise en oeuvre spécifique



### **OSB (Panneau de lamelles minces, longues et orientées)**

Utilisation : les planchers, les toitures et les parois de mur... essence bois des résineux (pin, épicéa)

- + le champ de ses performances mécaniques qui sont directement liées à la géométrie des lamelles et à leur orientation dans le panneau.

# Quelques matériaux



**Mortiers et bétons de chanvre**  
(bétons végétaux) : fabriqués dans le cadre de processus industriels ou en atelier

Petits éléments : type «bloc» <=>



Photo Chanvribloc



=> Panneaux grande dimension : type  
«panneau de mur»

# Quelques matériaux

## Construction en bottes de paille

- Systèmes constructifs : remplissage de parois ossature bois, mise en ouvres des bottes sur chantier
- Caissons préfabriqués en atelier



# Exemple de bâtiments biosourcés démontables



Le Havre, décembre 2014  
Bâtiment tertiaire en bois  
Recyclable à 80% Démontable et  
remontable sur un autre site  
Contexte



# Projet : éco-quartier Danube (Strasbourg)



Strasbourg, livraison  
prévue fin 2015  
Ossature bois,  
isolation en bottes de  
paille, bardage  
mélèze

*Pose de la première botte de paille en  
octobre 2014*



# Quelques matériaux

## • Construction en bottes de paille

### • Cadre normatif

Règles professionnelles

- Certains systèmes sous avis technique

=> **Ressources et acteurs**

- Au niveau national : 4 à 6 millions de tonnes disponibles pour le bâtiment

- En Région Rhône-Alpes : 300000 t paille pressée (45000 t en petites bottes) soit un potentiel de 4500 eqmaisons

- 3500 bâtiments paille en France, 300 nouvelles constructions/an

- Acteurs : regroupés au sein du RFCP (réseau français de la construction en paille)



## Quelques isolants



**Laine de chanvre**  
Utilisations : isolation rapportée,  
intérieure ou extérieure

- + Facile à mettre en œuvre, bonnes performances thermiques et acoustiques, recyclable
- Fibres de polyester utilisées dans la fabrication



IFB



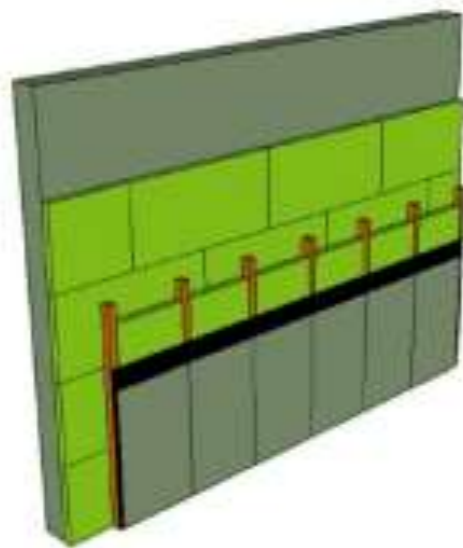
Ouate de cellulose



# Quelques isolants

## Les solutions constructives

- Isolation par l'intérieur des murs



Doublage de murs  
maçonnés



Entre montants de murs ossature  
bois

# Quelques isolants

## Les solutions constructives

- Isolation des toitures



Isolation entre chevrons et contre ossature métallique

# Isolation par l'extérieur ou par l'intérieur ?



## Isolation par l'intérieur

Mur extérieur isolé par l'intérieur

### Avantage :

- réduction des coûts de chauffage dans les pièces rarement occupées.

### Inconvénients :

- variations de température rapides au niveau de la maçonnerie,
- ponts thermiques,
- pare-vapeur la plupart du temps nécessaire côté intérieur pour prévenir la formation d'eau de condensation.

# Isolation par l'extérieur ou par l'intérieur ?

## Isolation par l'extérieur

### Avantage

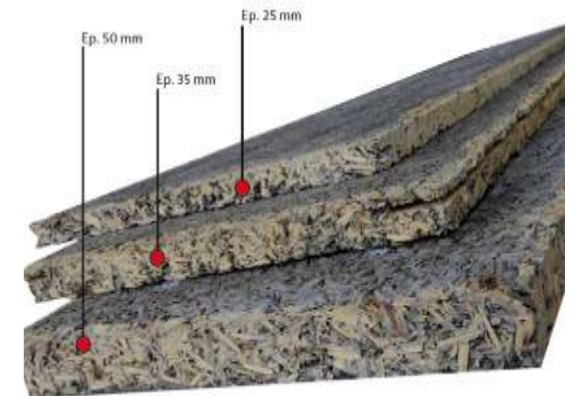
- excellente isolation thermique,
- réduction drastique des coûts de chauffage,
- pas de ponts thermiques prononcés,
- climat ambiant agréable,
- protection contre la chaleur en été,
- pas de dégradations dues à la température,
- grande liberté de conception des façades,
- valorisation du bâtiment.

# Matériaux composites

## Exemple du matériau IBS-AKU (Inertie Bâtiment Système)



Sources végétales+ ciment (minérale): Matériau innovant industrialisé → une meilleure esthétique et simplicité de transport et de pose



Masse volumique $\rho(m^3 / kg)$	370
Conductivité thermique $\lambda(W / m.k)$	0.11
Chaleur spécifique $C_p(J/kg.K)$	250



Ce composite se présente comme un milieu poreux dont différents mécanismes hygrothermiques se produisent

# Matériaux composites

## Procédé de fabrication du IBS-AKU



Matière première.



Copeaux



Mélange copeaux+ciment



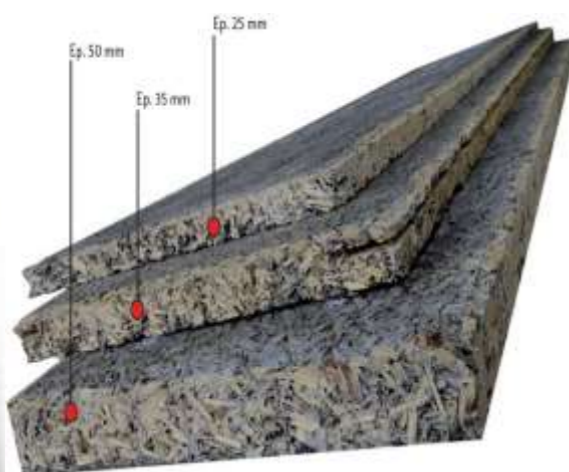
Moulage



Rectification



Rainurage



Produit fini

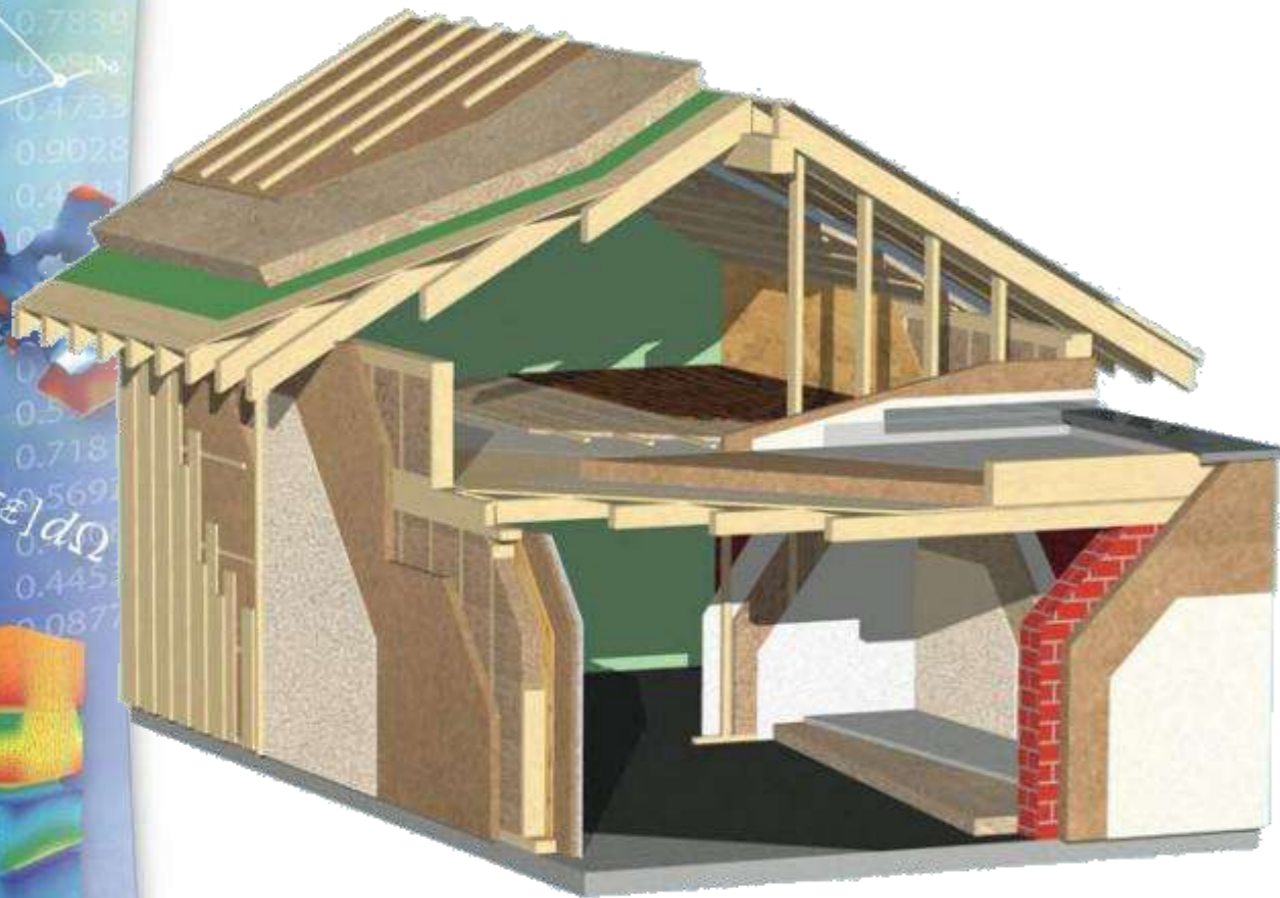


Préparation pour la pose

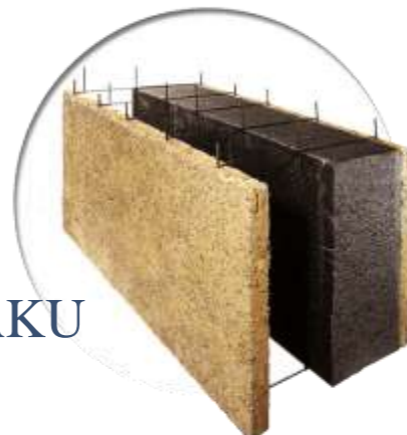
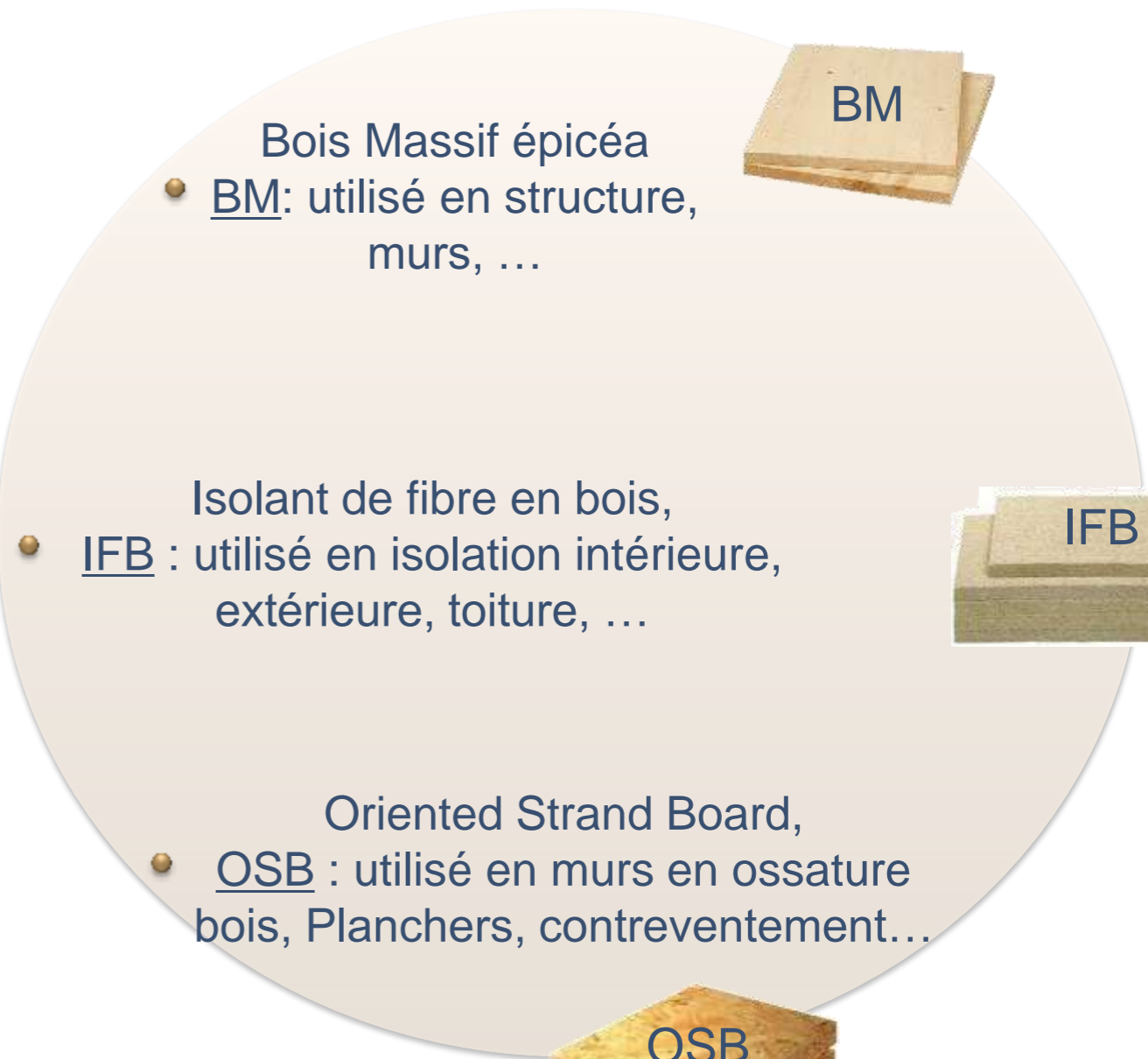


Matière première

# Matériaux étudiés



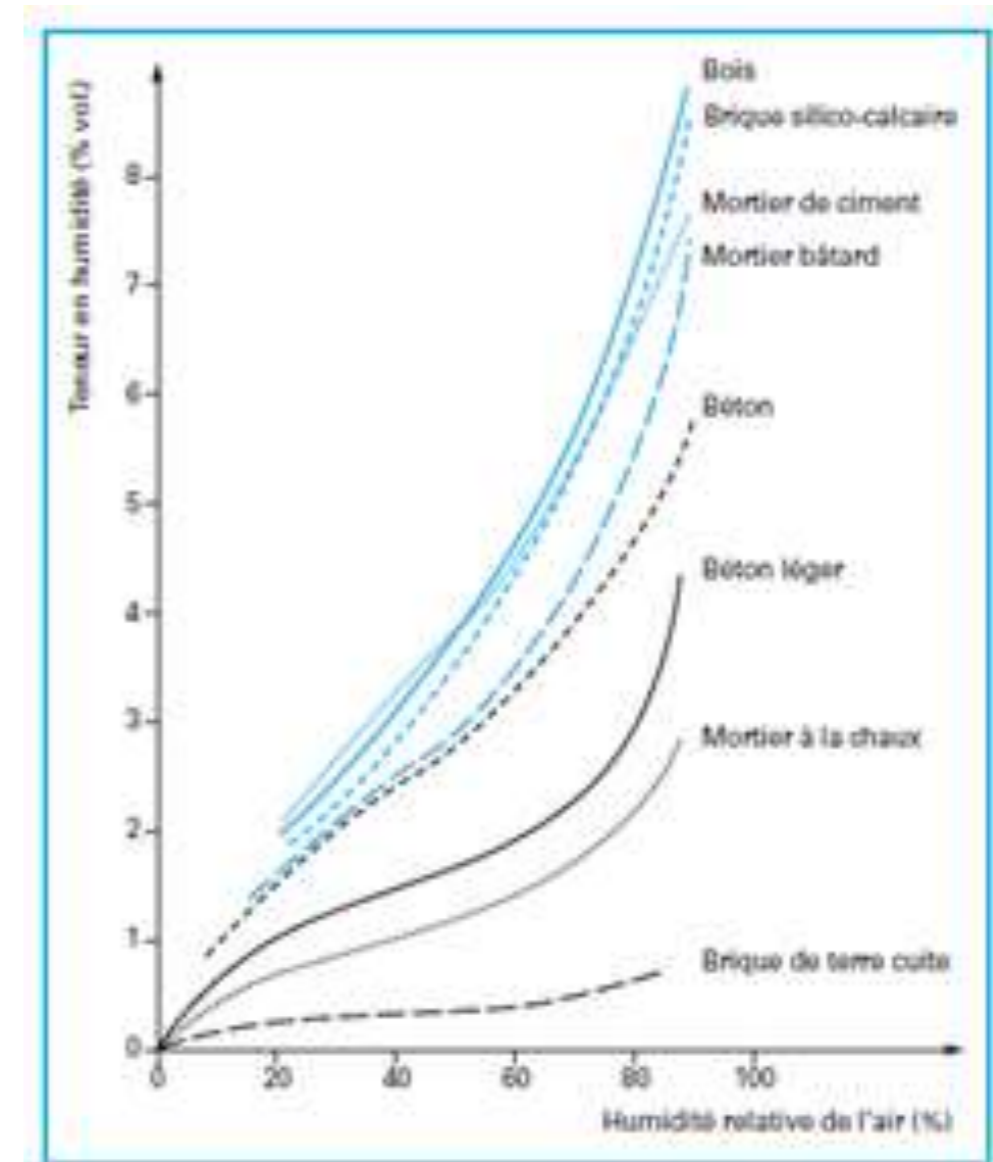
Projet HYGRO-BAT n° ANR-10-HABISOL-005



Matériau IBS-AKU

# Matériaux étudiés

## Aspect hygroscopique...



Sorption de l'humidité par différents matériaux  
(Kornmann *et al.*, 2009)

Les dimensions du bois varient en fonction de la teneur en eau, retrait ou gonflement, jusqu'à une teneur en eau de 30 %

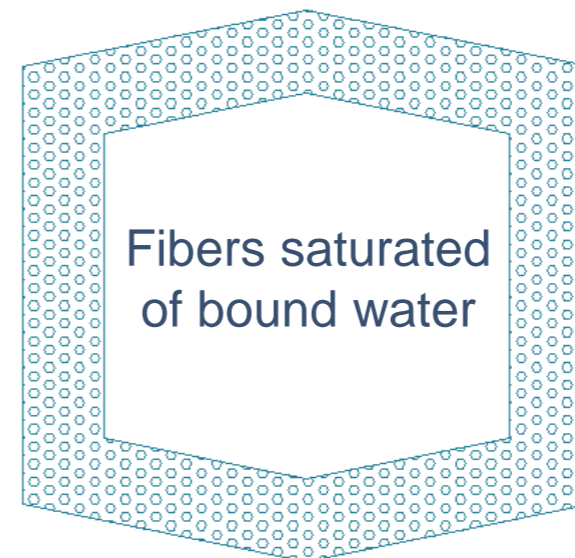
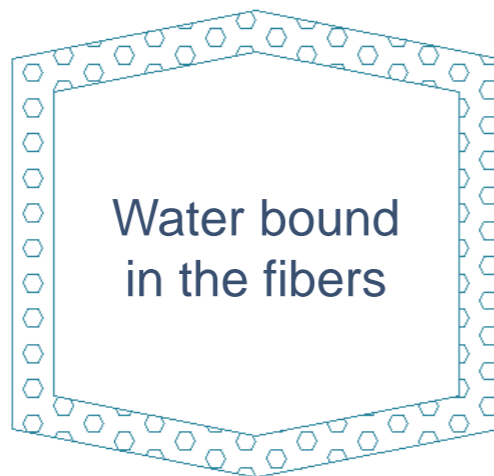
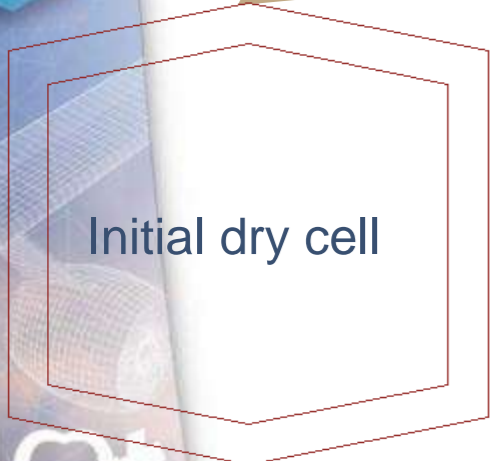
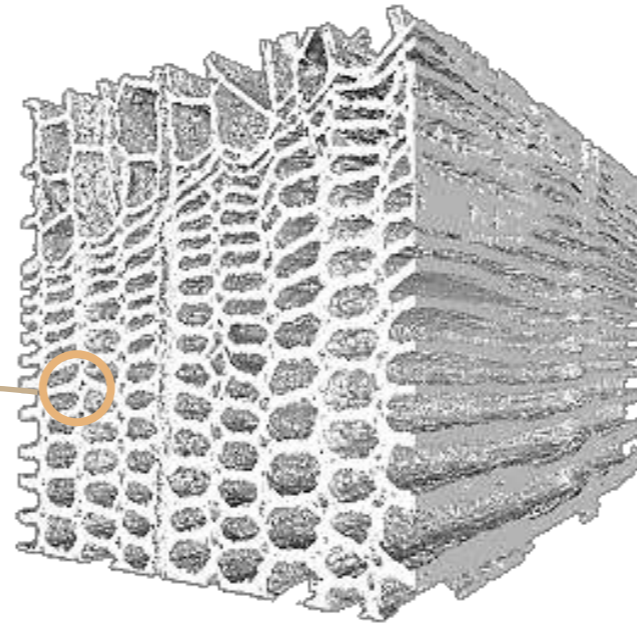


# Caractère hygroscopique

- Moisture buffering effect

- Effets non-Fickiens

- Besoin de caractérisation, d'outils de prédiction des propriétés de modèles de simulation



# Problématiques



## Durabilité

- Problème de gonflement ...
- Fragilisation structurelle
- Réduction de la durée de vie (Arliquie et al., 2003; Aït-Mokhtar et al., 2004)



## Qualité de l'air

- Allergies, problèmes de respiration...
- Moisissure (Radulescu 2006, Olaleakan et al., 2006)

# Durabilité....

Risque de developpement de moisissures ?



W FI

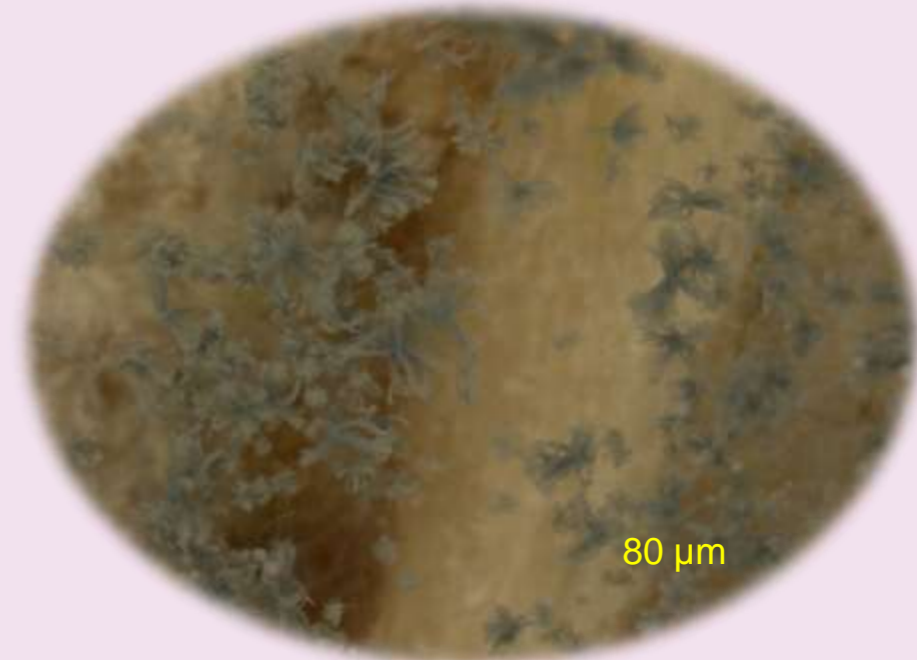


Bois

Observation microscopique



Identification



80 μm

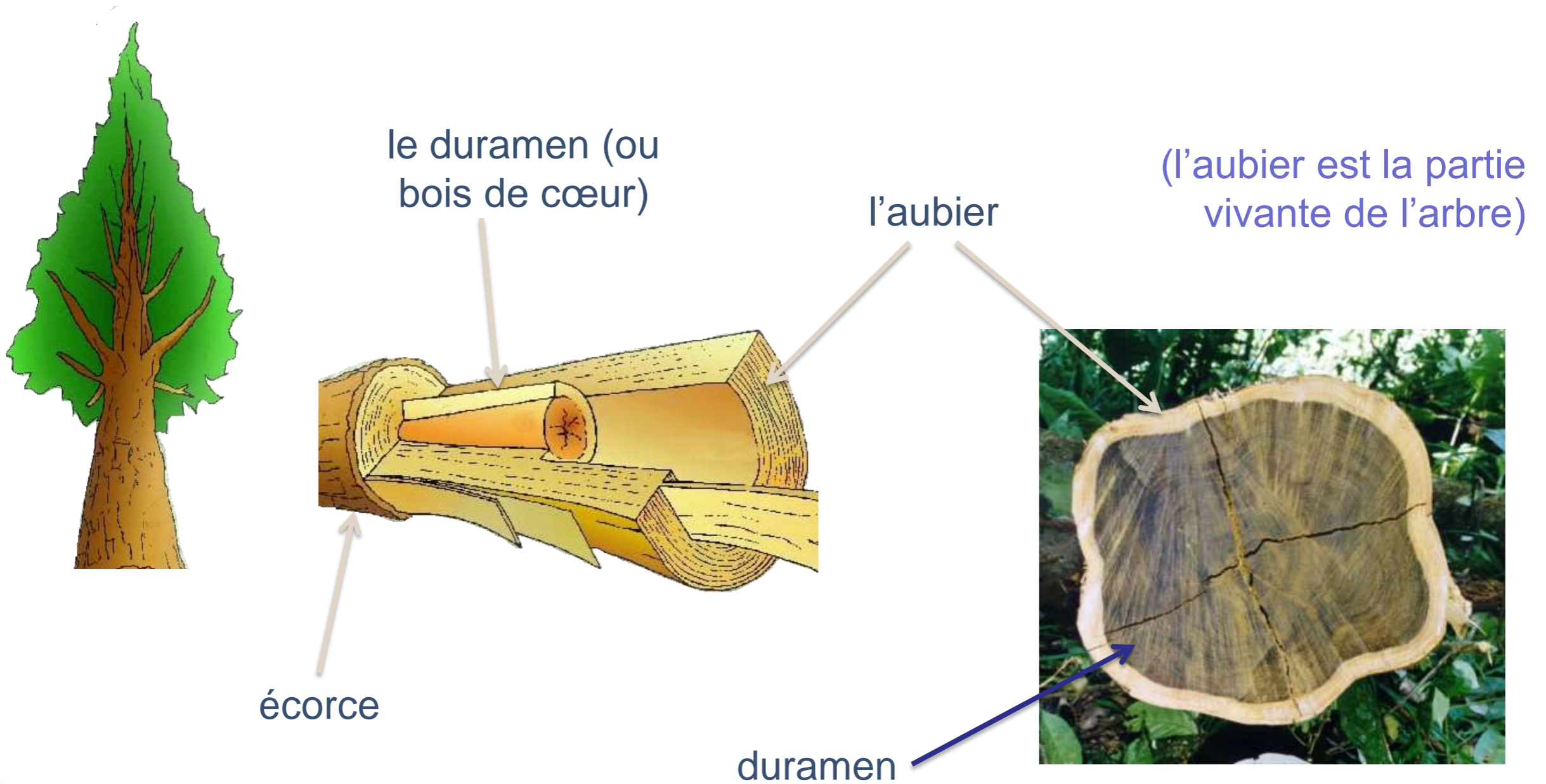


# Caractéristiques du bois massif



# De l'arbre au bois

## Echelle macroscopique



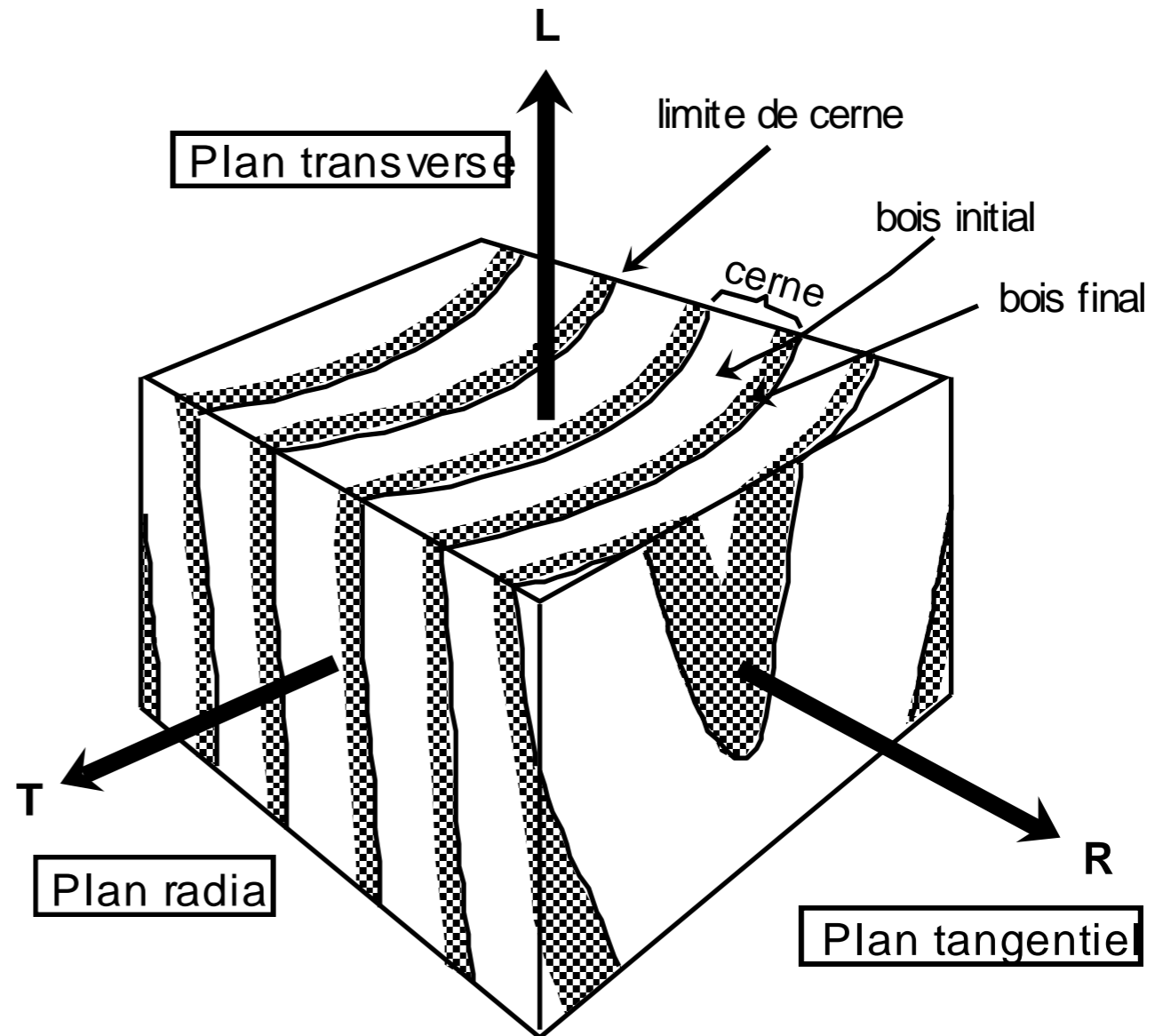
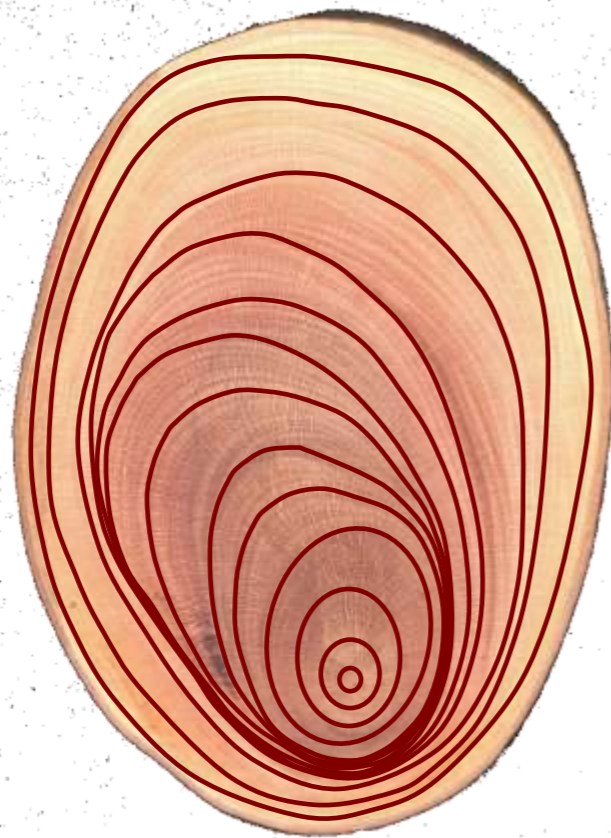
**Aubier** : bois conducteur où les parenchymes sont vivants

**Duramen** : Bois non conducteurs où les parenchymes sont morts

# De l'arbre au bois

## Les cernes de croissance

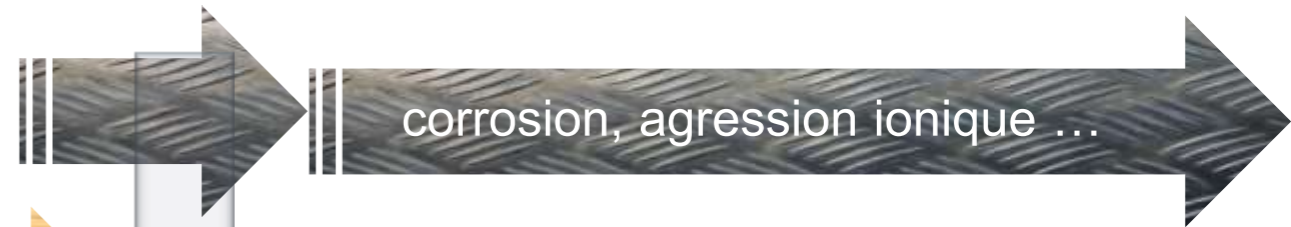
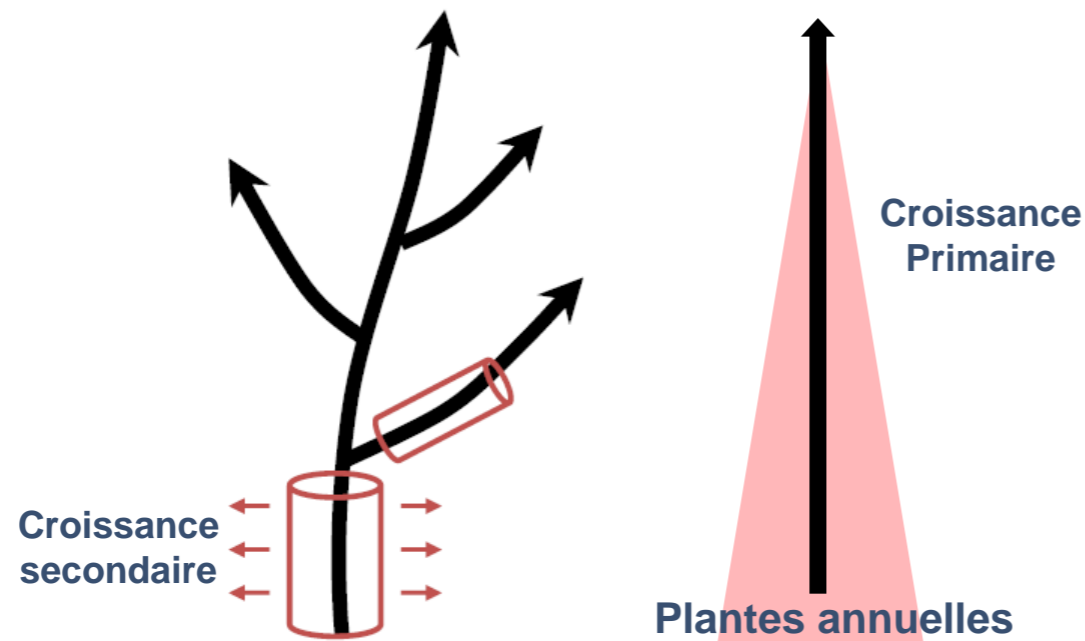
Les cernes montrent la rythmicité de la croissance



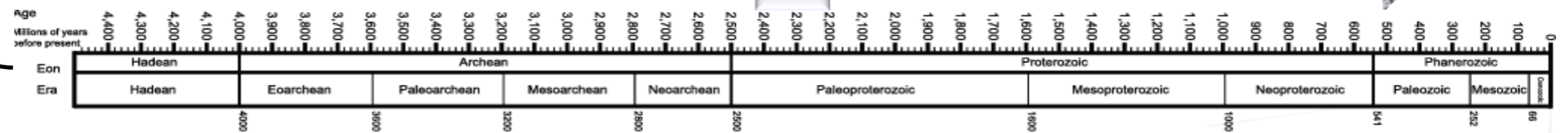
# Matériaux étudiés

## Principaux rôles des tiges dans les plantes

- Système vasculaire, support mécanique, forme d'adaptation, résistance aux attaques biologiques...



Partiellement biosourcés



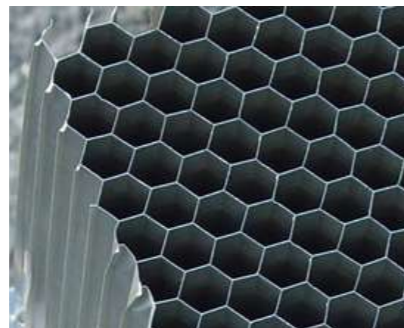
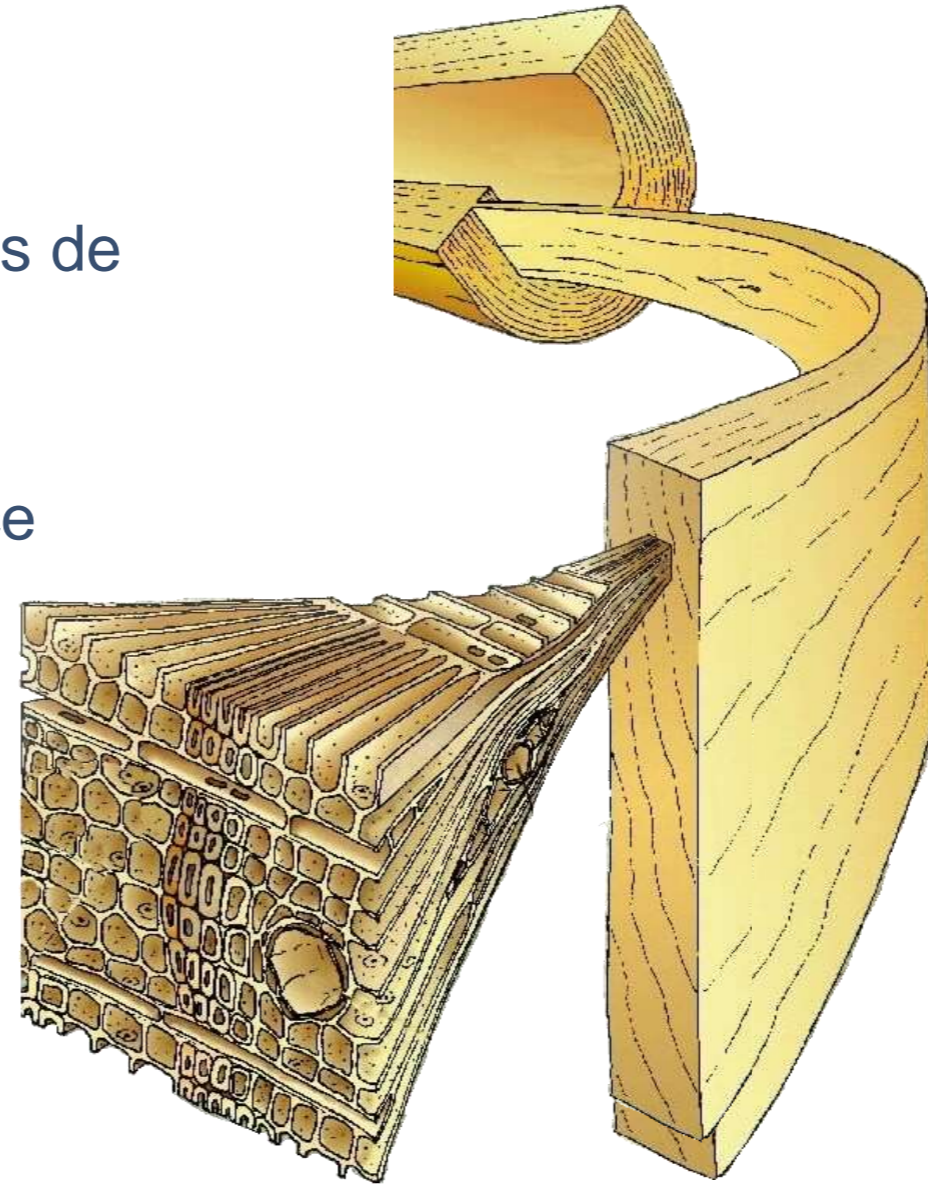
Plantes annuelles

# De l'arbre au bois

## Echelle des cellules

- Le bois est composé de cellules de différentes fonctions
- Les cellules composent le plan ligneux qui dépend de l'essence

structure en =  
nid d'abeille  
(mousse)



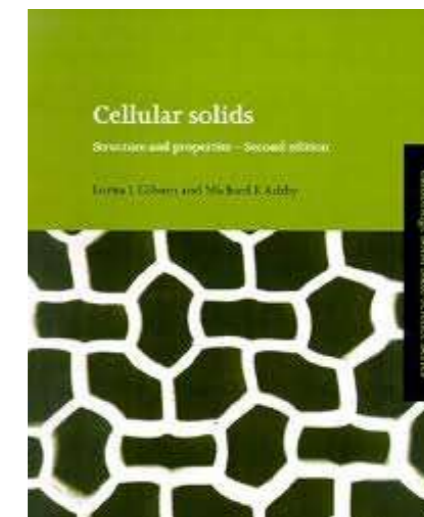
« nid d'abeille »  
Aluminium



Implant dentaire  
Mousse titane



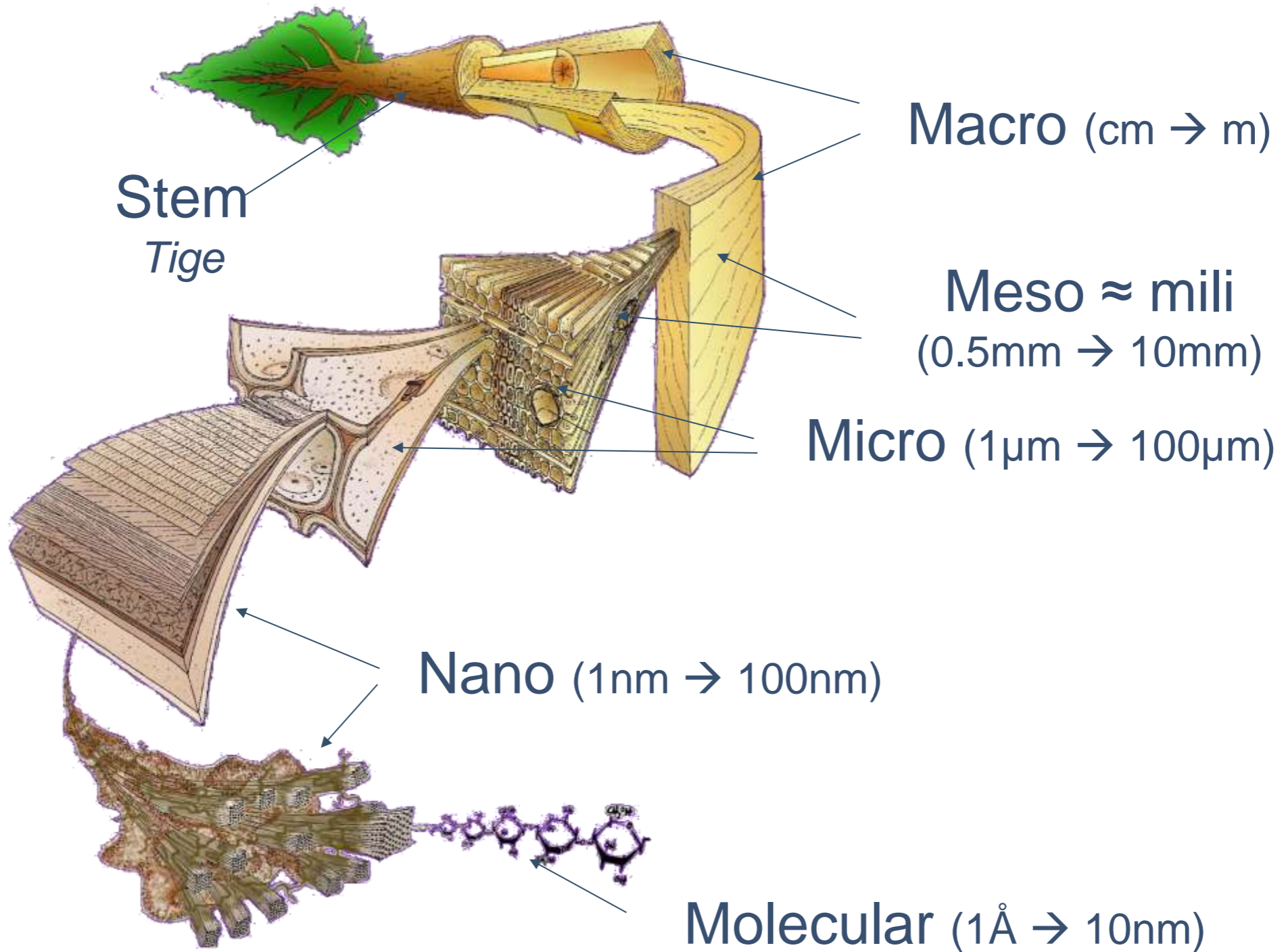
Mousse, polyéthylène  
Cellules fermées



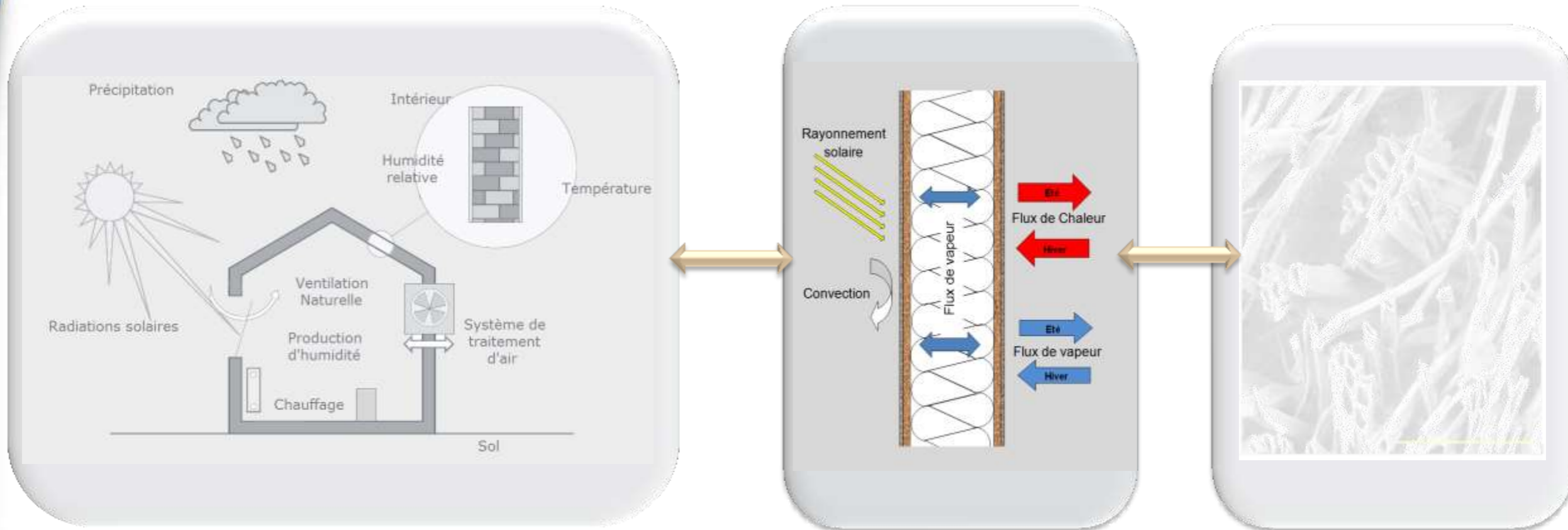


# De l'arbre au bois

## Echelle des cellules



# Echelle de l'enveloppe



# Modélisation des transferts hygrothermiques



## Equation de conservation de masse

• Vapor  $\frac{\partial u_v}{\partial t} = -div(\mathbf{j}_v) - \dot{m}$

$$\nabla \rho_v = \frac{\partial \rho_v(u, T)}{\partial u} \nabla u + \frac{\partial \rho_v(u, T)}{\partial T} \nabla T$$

$$\mathbf{j}_v = \underbrace{-D'_v \nabla \rho_v}_{\text{Vapor diffusion}} - \underbrace{f_v \nabla P}_{\text{Vapor transported by convection}}$$

$$\mathbf{j}_v = -D_v \rho_s [\nabla \omega + \delta_v \nabla T] - f_v \nabla P$$

• Liquid  $\frac{\partial u_l}{\partial t} = -div(\mathbf{j}_l) + \dot{m}$

$$\mathbf{j}_l = -D_l \rho_s [\nabla \omega + \delta_l \nabla T] - f_l \nabla P$$

• Dry air  $\frac{\partial u_a}{\partial t} = -div(\mathbf{j}_a)$

# Modélisation des transferts hygrothermiques



## Equation de conservation de l'énergie

$$C\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{j}_q) - h_{lv} \dot{m}$$

$$\mathbf{j}_q = \underbrace{-\lambda \nabla T}_{\text{Conductive transfer}} + \underbrace{h_l \mathbf{j}_l + h_v \mathbf{j}_v}_{\text{Convective transfer (liquid and vapor)}}$$

Conductive transfer      Convective transfer (liquid and vapor)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[D_m (\nabla \omega + \delta \nabla T + \alpha \nabla P)] \\ C\rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t} \\ h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t} \end{array} \right.$$

$$a_t = (\lambda + D_l \rho_s \delta_l h_l + D_v \rho_s \delta_v h_v) \quad \delta_t = \rho_s (D_l h_l + D_v h_v), \quad \zeta = (h_l f_l + h_v f_v) \quad \alpha = \frac{k_f}{D_m \rho}$$

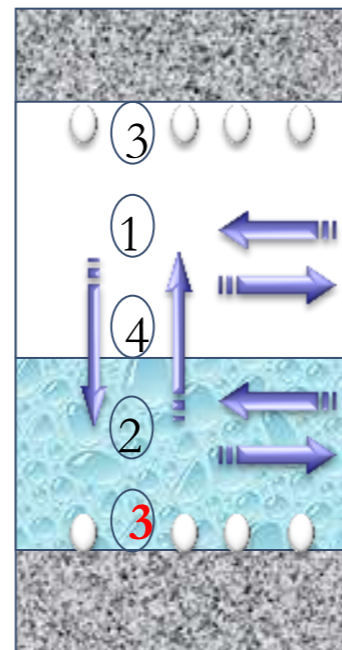
=> Non linéaire, fortement couplé **Partial Differential Equation**

# Capacité d'humidité

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$c \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$



Soli  
d  
Gas  
mixture:  
Air + water  
vapor  
Liquid  
water  
Soli  
d

1. Water vapor diffusion
2. Liquid water motion
3. Sorption / desorption
4. Evaporation / Condensation

Propriété de transferts hydrique

# Simulation numérique

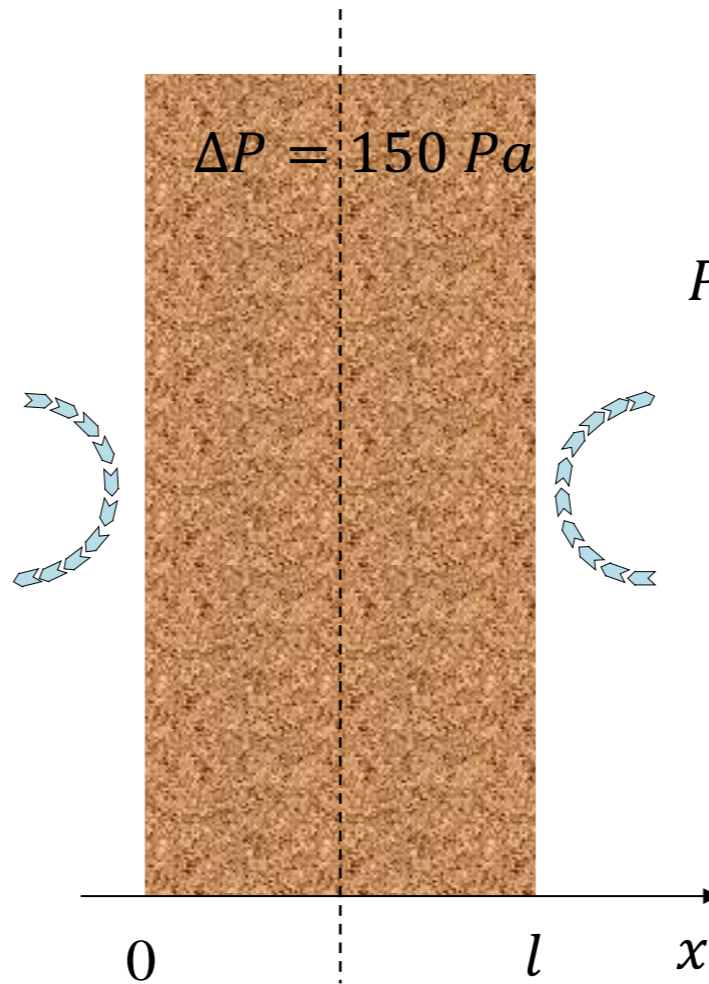


## Exemple de séchage du bois massif

$$P = 101\,475 \text{ Pa}$$

$$T_{\infty} = 110^{\circ}\text{C}$$

$$m_{\infty} = 4^{\circ}\text{M}$$



$$P = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$T_{\infty} = 110^{\circ}\text{C}$$

$$m_{\infty} = 4^{\circ}\text{M}$$

# Simulation numérique



## Conditions aux limites

$$\left\{ \begin{array}{l} D_m(\nabla m + \delta \nabla T + \alpha \nabla P) = \beta(m_\infty - m) \\ \lambda \nabla T = \varepsilon(T_\infty - T) + (1 - \chi)\beta(m_\infty - m) \end{array} \right.$$

$\beta$  Convective mass transfer coefficient

$\varepsilon$  Convective heat transfer coefficient

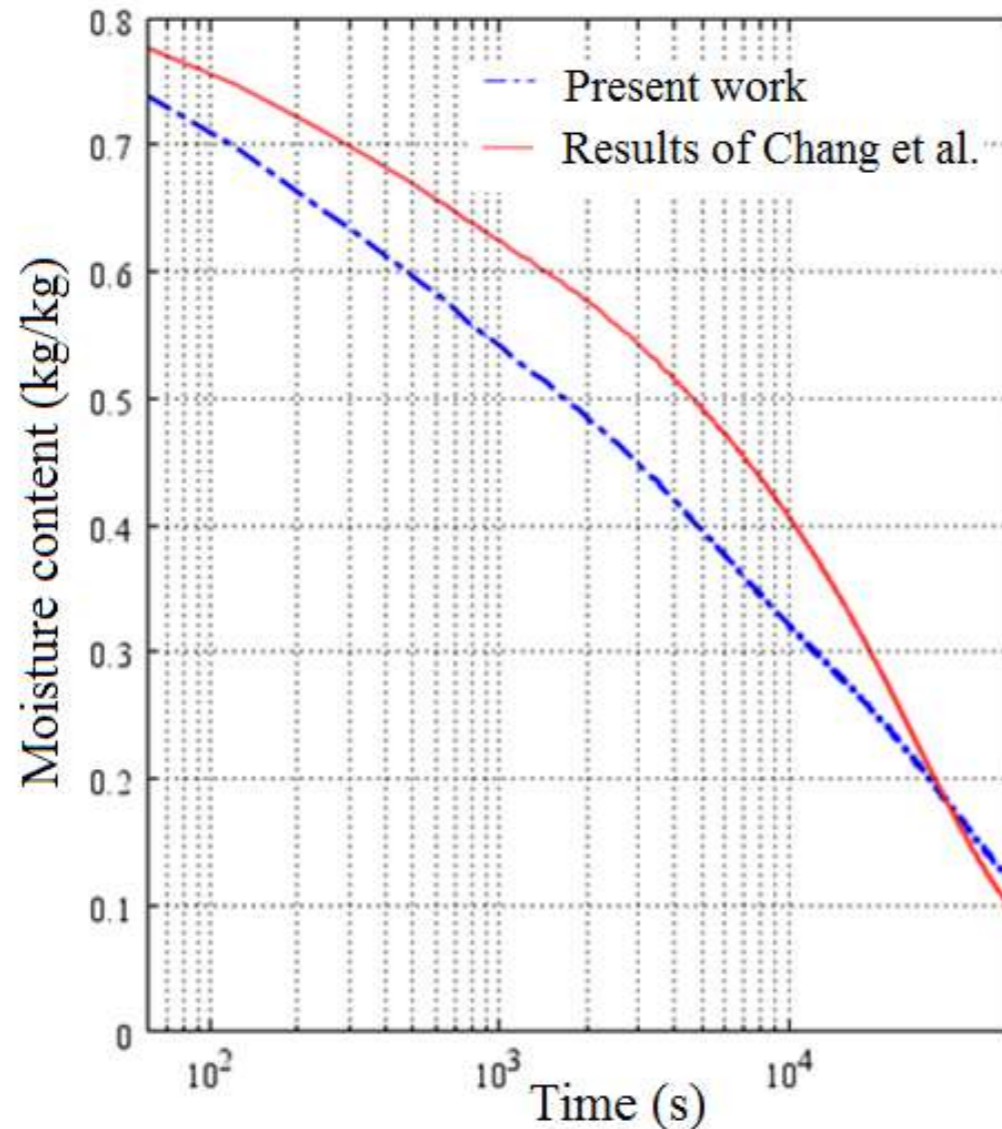


## Capacité d'humidité $C_m$

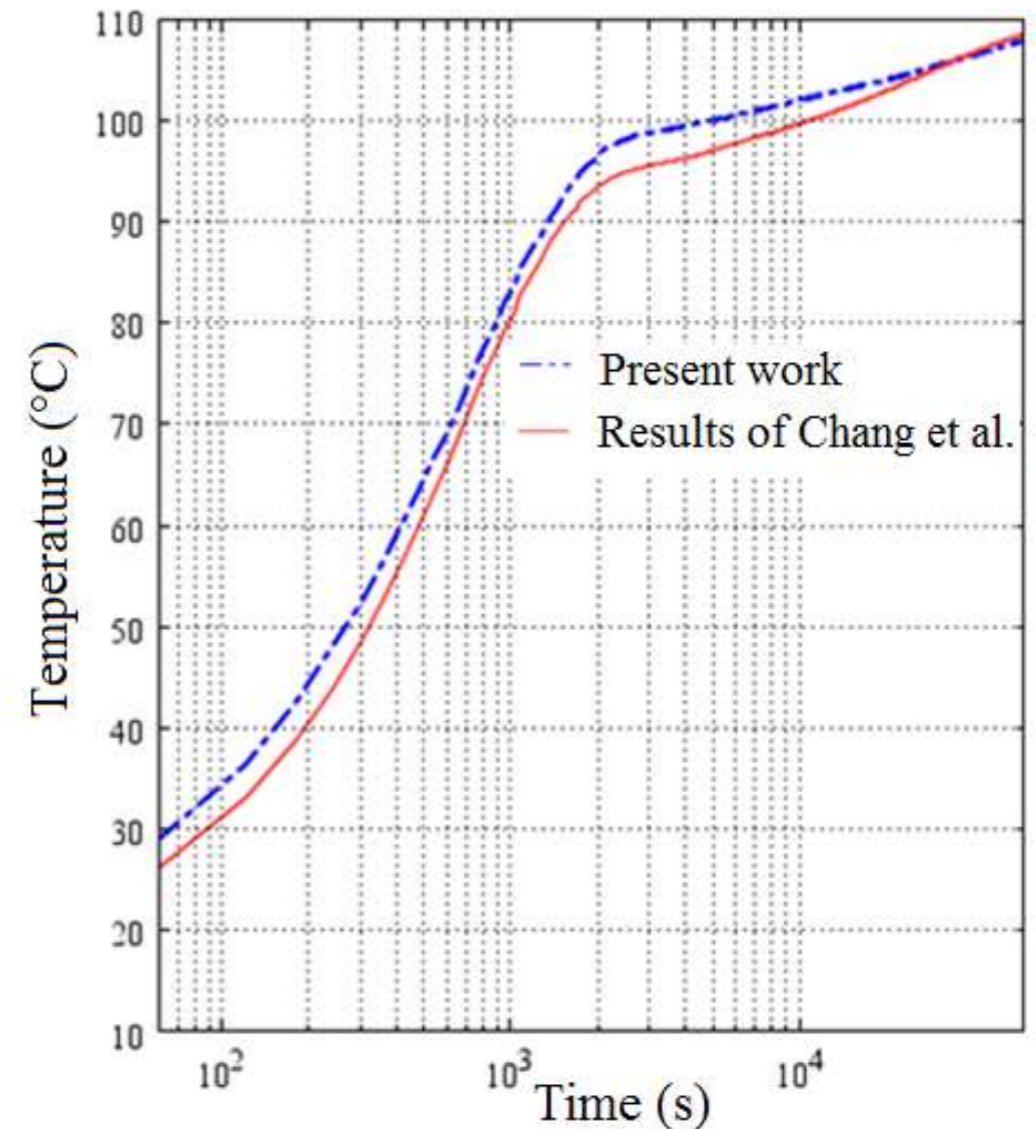


$w = C_m m$  Moisture potential

## Quelques résultats



Moisture content at the surface of wood specimen ( $x = 0 m$ )



Temperature at the surface of wood specimen ( $x = 0 m$ )

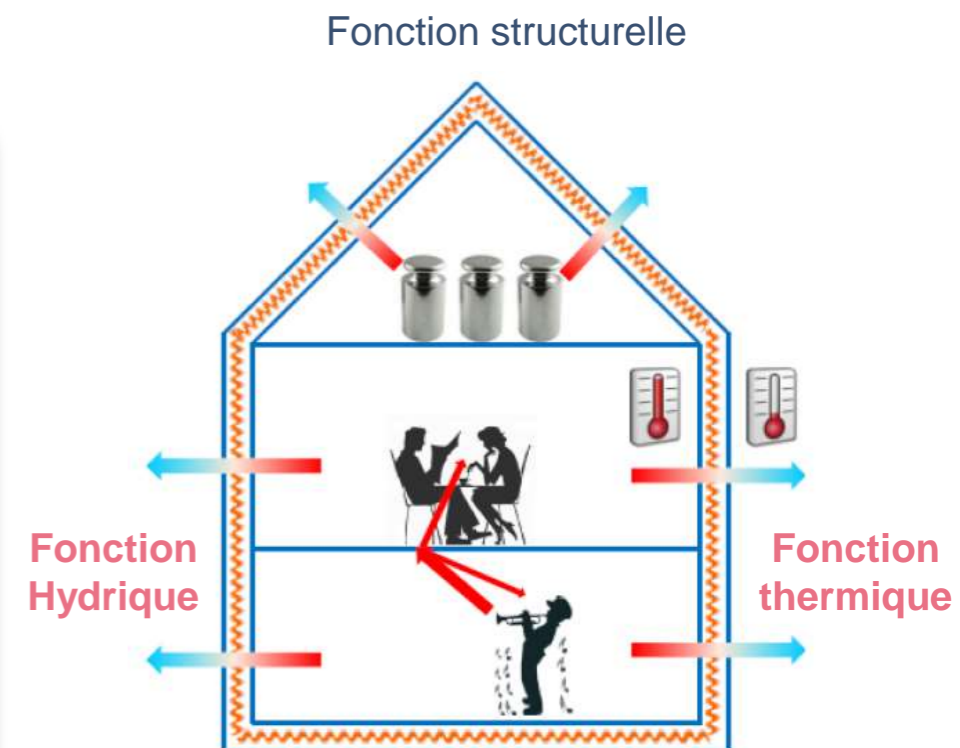
La pression totale joue un important sur la prédiction du comportement hygrothermique



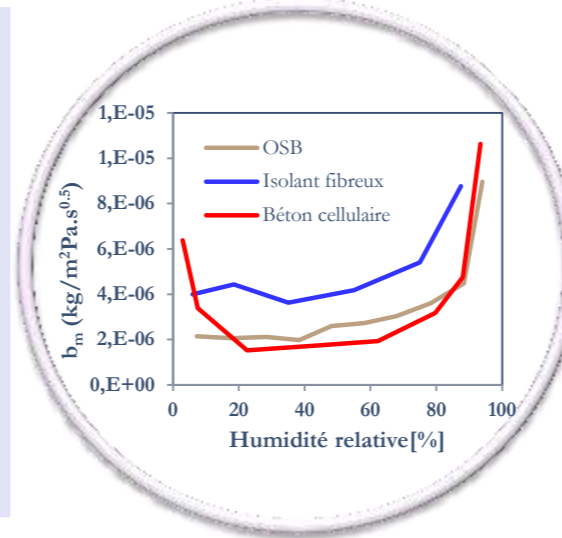
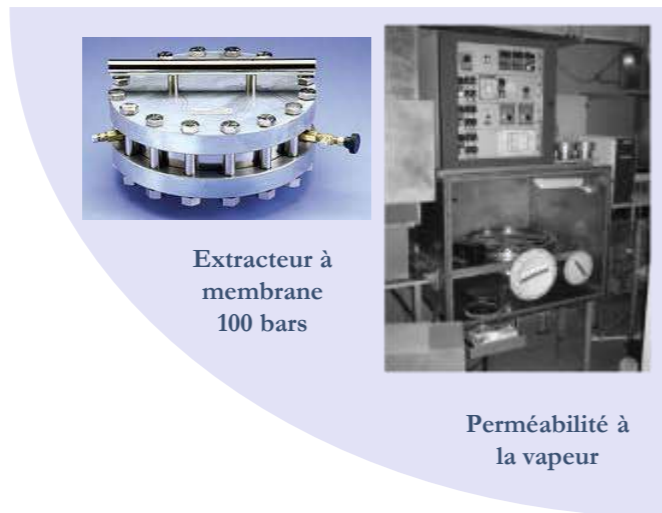
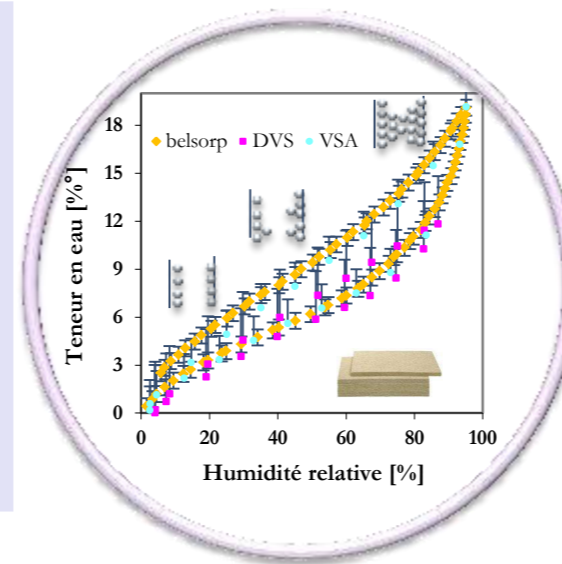
Un peu d'histoire...

**Besoins de caractérisation thermohydrrique**

Prédiction par changement d'échelle



# Caractérisation des propriétés thermohydriques



$$c_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

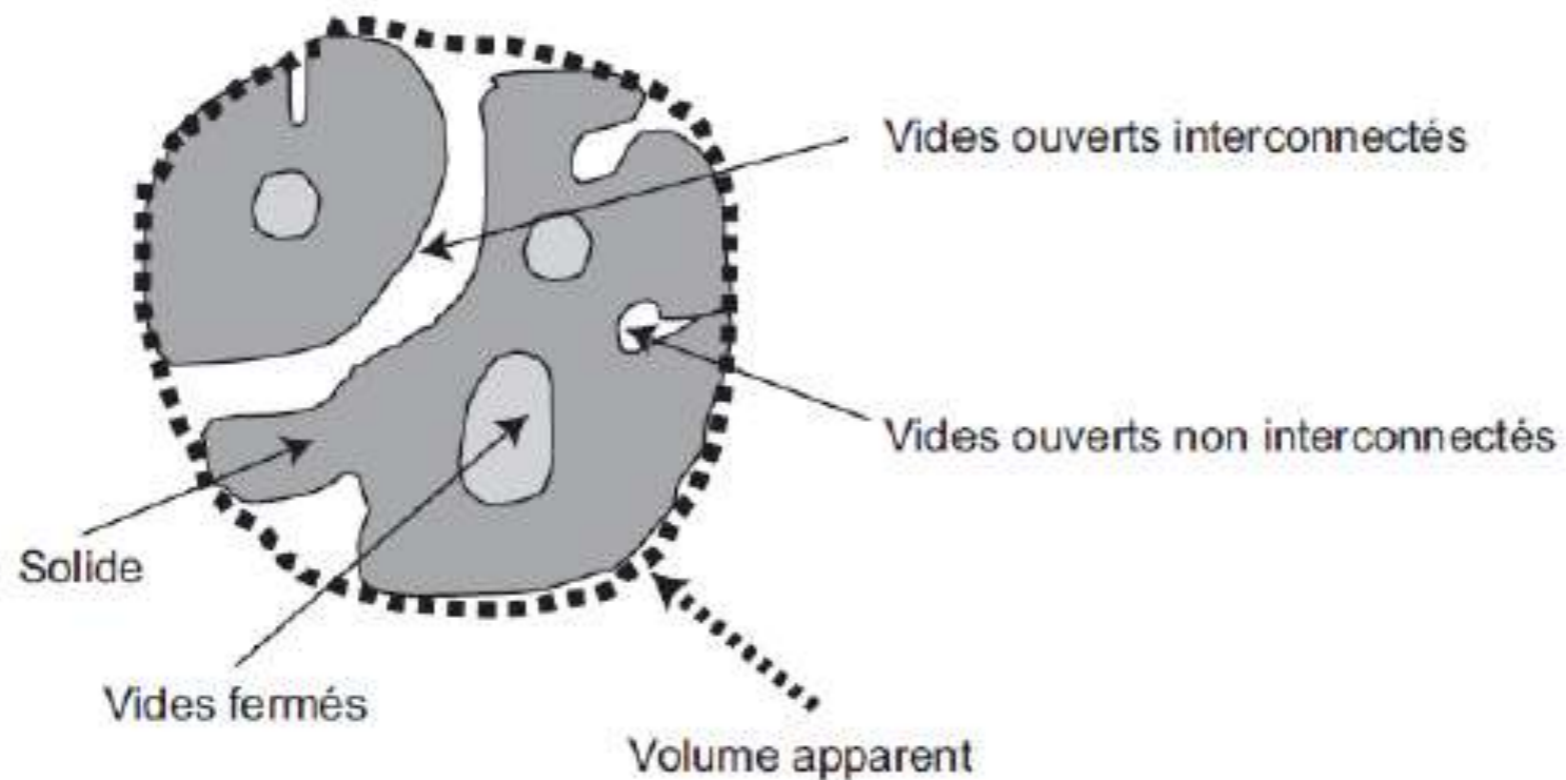
$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

# Porosité

La porosité est une propriété statistique...

Porosité ouverte : 
$$\varepsilon = \frac{V_l + V_g}{V_t}$$

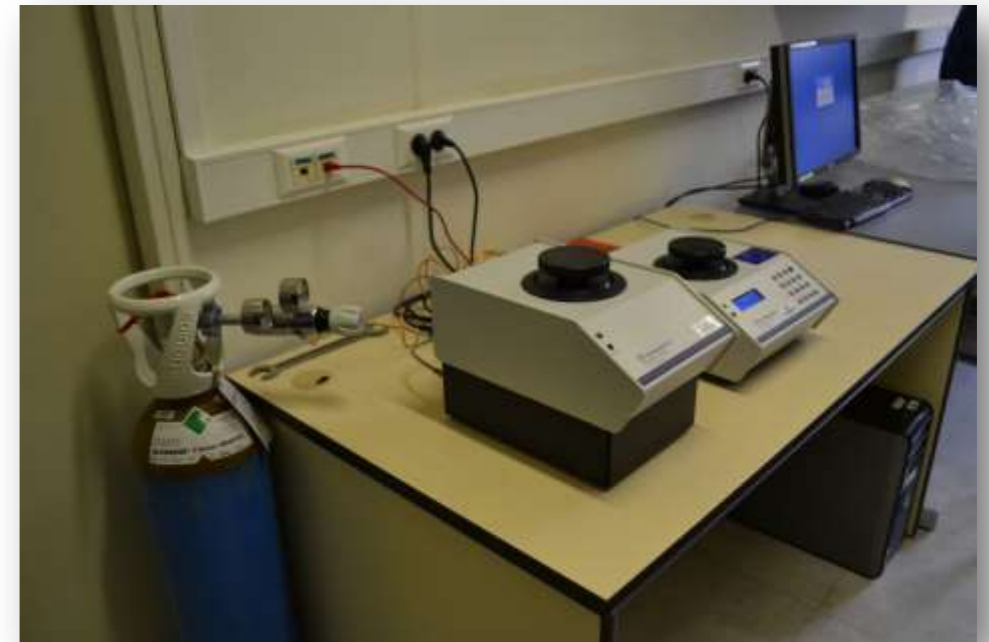
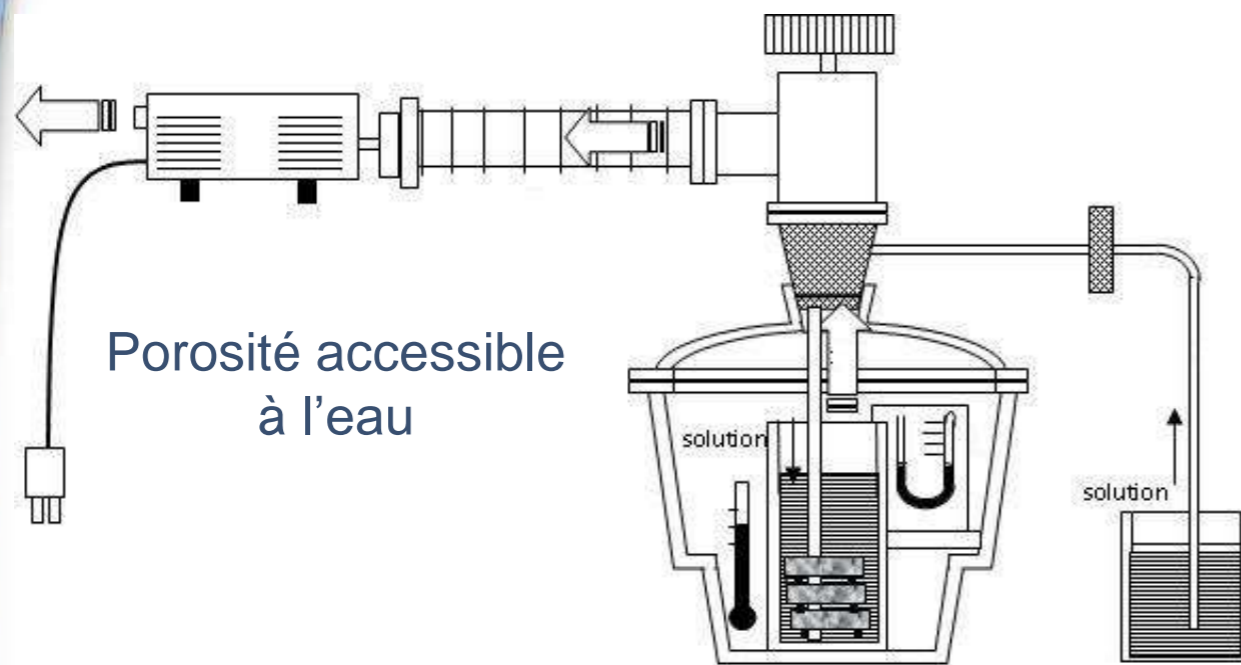
↳ impacte le plus la valeur de la diffusivité



Il peut exister dans le matériau des pores inaccessibles qui n'ont pas une influence sur les phénomènes de transport

# Porosité

## Techniques de mesure expérimentales



Pycnométrie à **Hélium**



La porosimétrie au **mercure**  
(Micromeritics-Autopore III 9420)



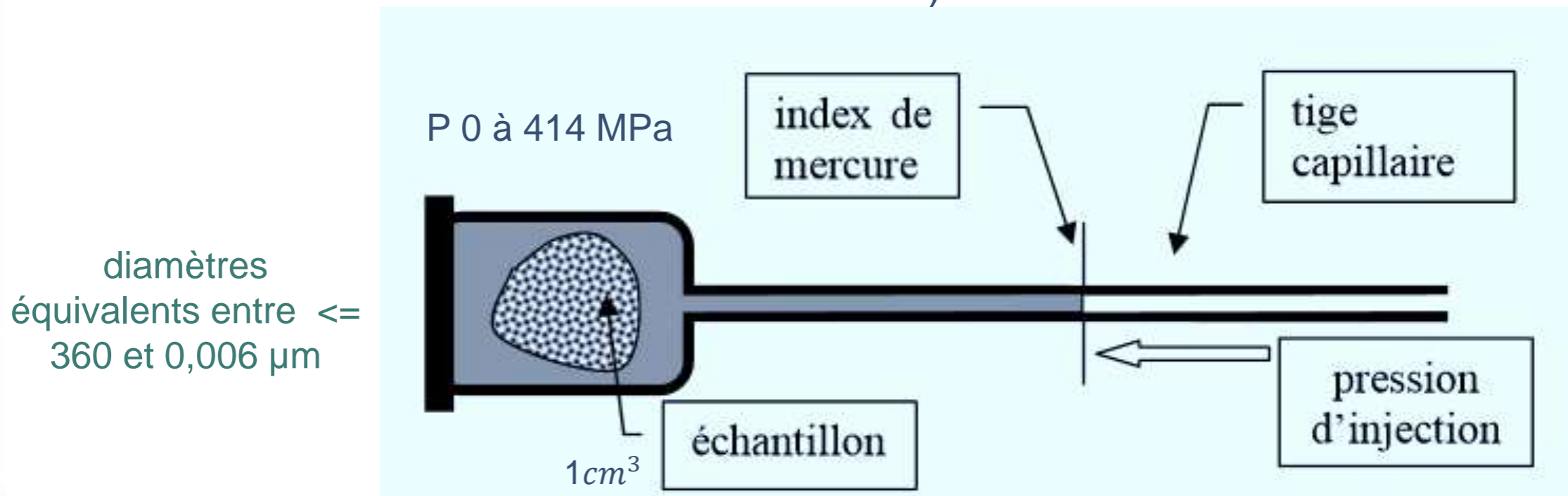
Porosimétrie à l'**Ethanol**

# Porosité



## Porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure est basée sur la mesure de la quantité de mercure qui peut être insérée dans les pores d'un solide à différentes pressions (intrusion de mercure).



**Principe** injecter sous pression un **liquide non mouillant**, le mercure, dans le réseau poreux de l'échantillon **sous vide**, séché au préalable à 45°C (15j)

Le mercure pénètre dans des pores de diamètre d'entrée d'autant plus petits que la **pression exercée** est élevée

# Porosité

## Porosimétrie au mercure

=> pour chaque palier de **pression** correspond un **volume** injecté



Equation de Washburn

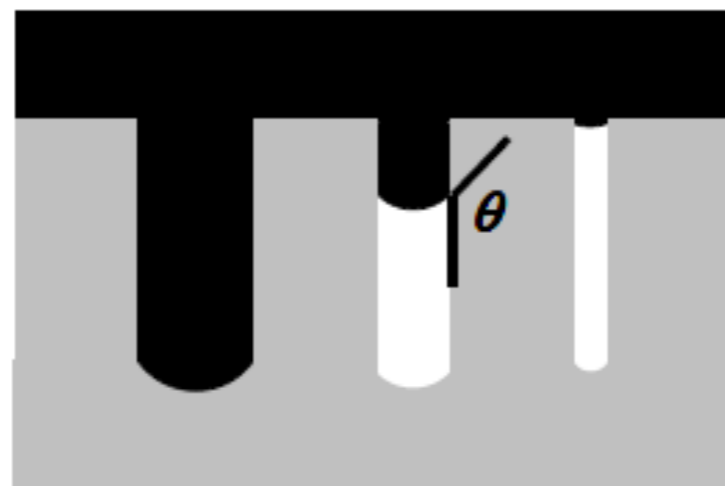
$$D = \frac{4\gamma}{P_c} \cos \theta$$

$D[m]$  est le diamètre de pore

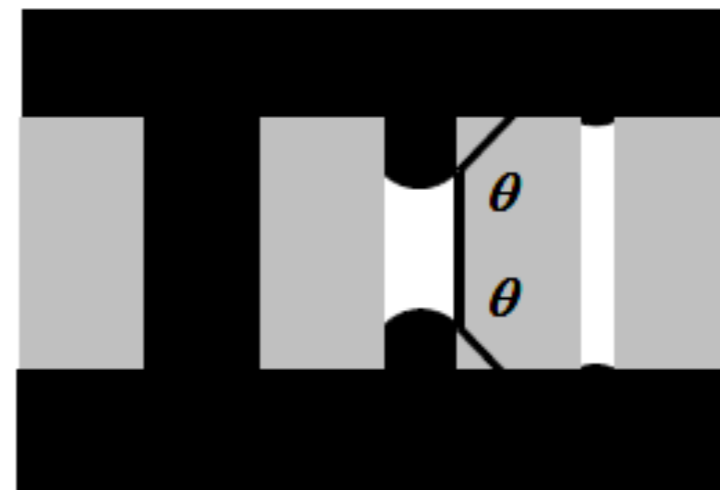
$\gamma[N/m]$  est la tension superficielle du mercure. La valeur couramment utilisée est de 0,485 [N/cm]

$\theta$  est l'angle de contact entre le mercure et la paroi solide.

$P_c[Pa]$  est la pression exercée sur le mercure (Micromeritics, 1995)



*Pores en cul de sac*



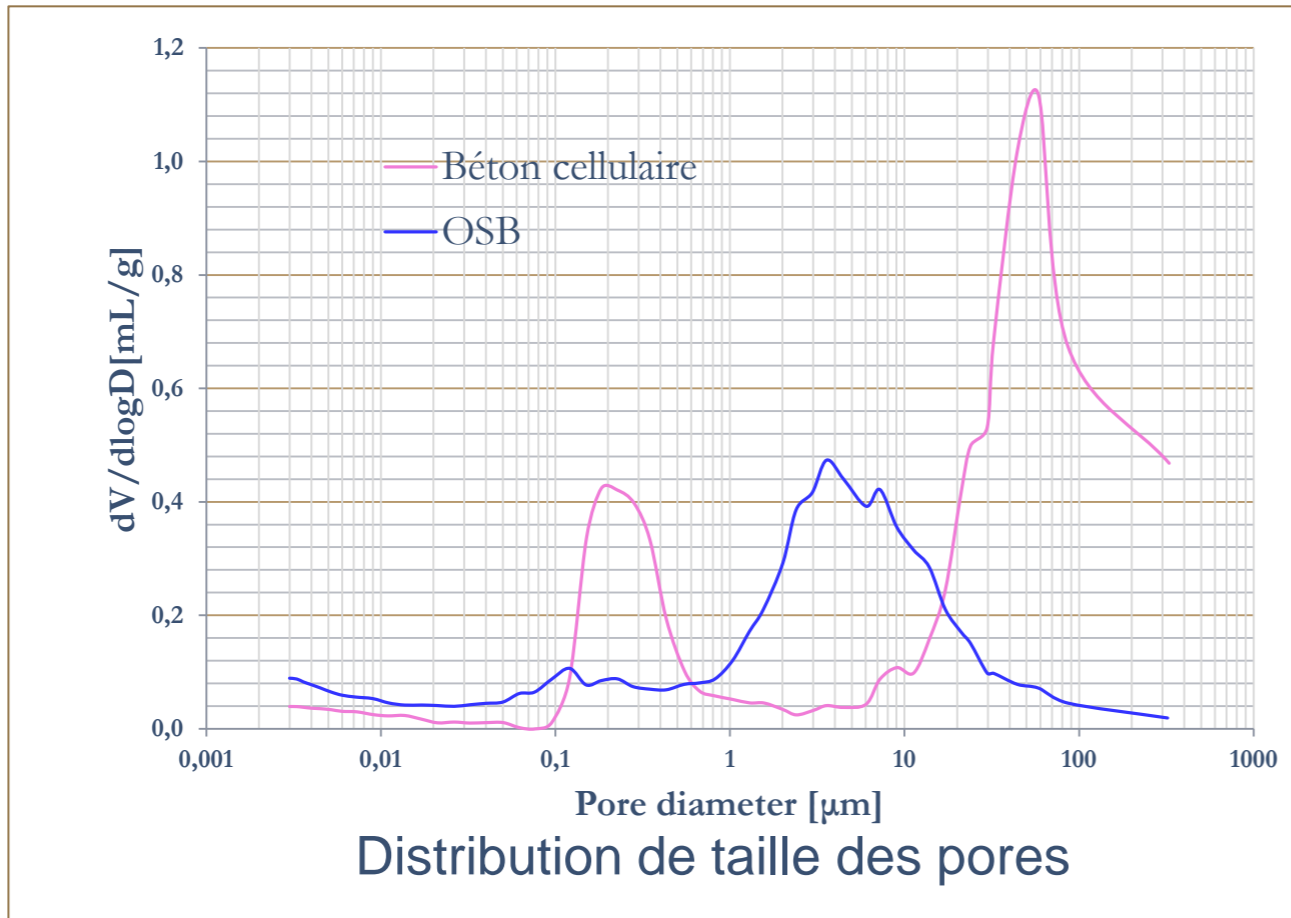
*Pores débouchants*

A la pression  $P$ , les pores de diamètre supérieur à  $D$  seront totalement remplis de mercure, les pores de diamètre inférieur resteront vides

# Porosité



## Porosimétrie au mercure



Mercury penetrometer

## Porosité de quelques matériaux



≈ 50%

Oriented Strand Board



≈ 90%

Wood fibrous insulation



> 80%

Aerated concrete

# Porosité

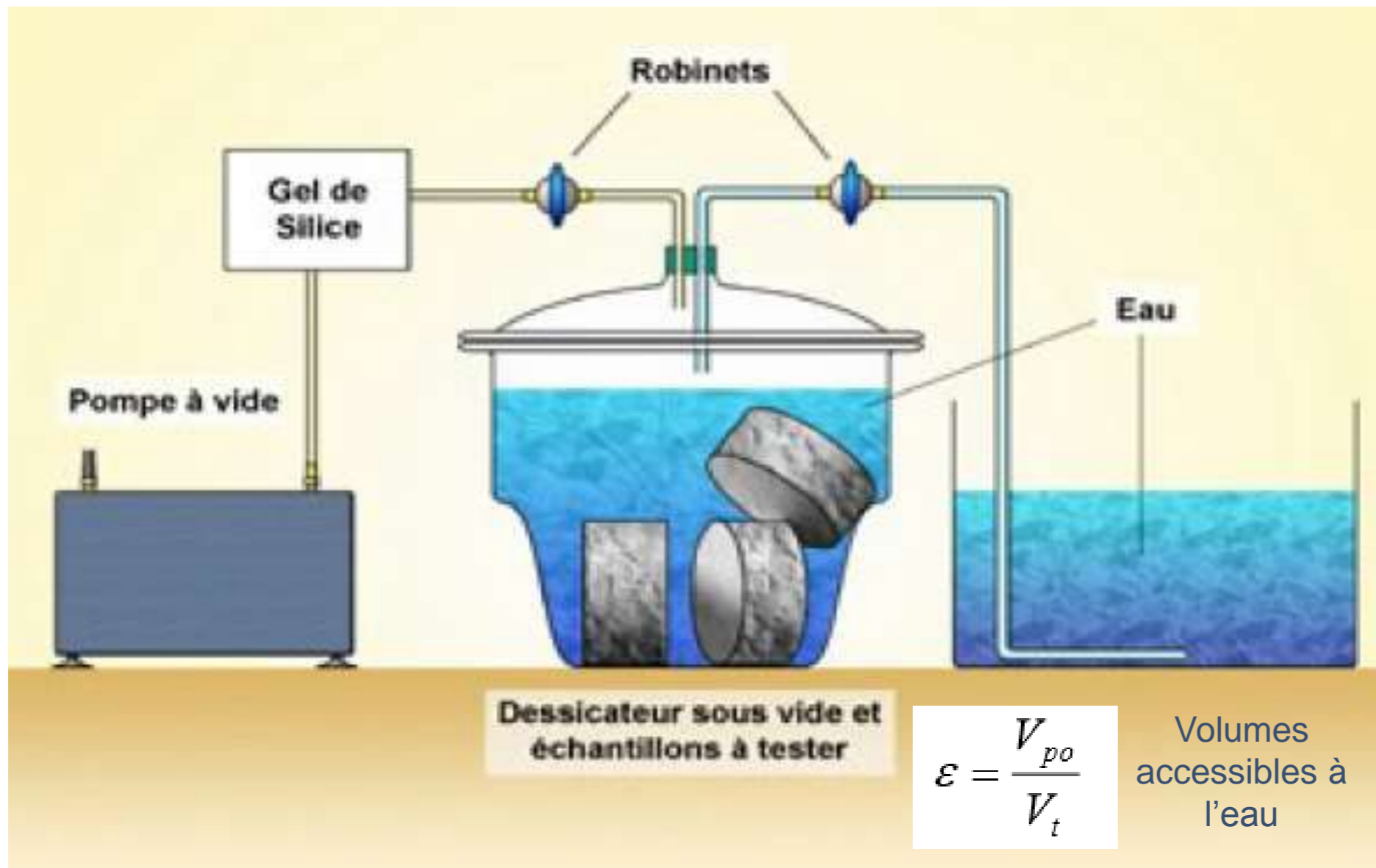
## Porosité accessible à l'eau

NF EN 18-459 Essai de porosité et de masse volumique

### Principe

Mesurer le pourcentage des vides connectés avec la surface, à l'intérieur de la masse du bois

### Préparation des corps d'épreuve





# Porosité

## Porosité accessible à l'eau

**Pesée hydrostatique**  $M_{eau}$  est la masse en grammes pesée sous l'eau

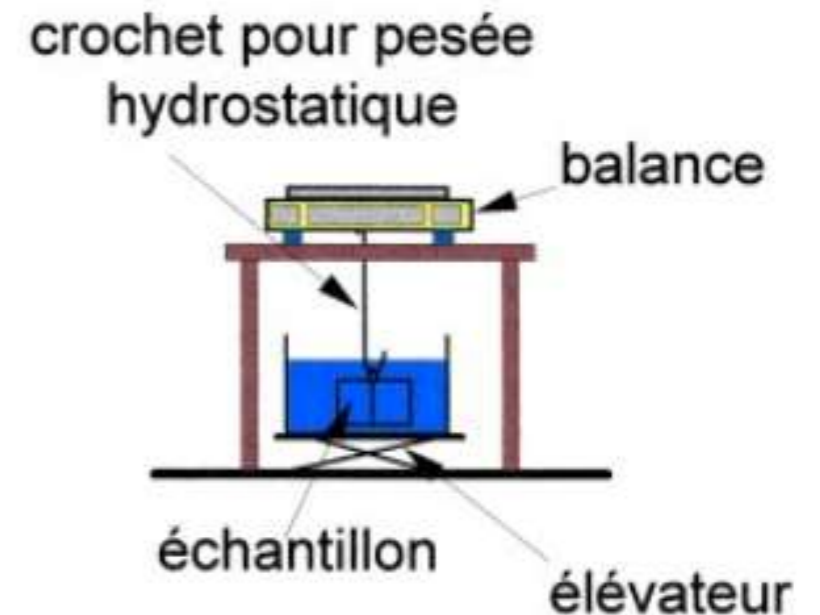
**Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau**,  $M_{air}$

**Séchage** à  $T = 105^\circ$  jusqu'à masse constante ( 2 pesées espacées de 24 h ne s'écartent pas plus de 0,05%)

**Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche**  $M_{sec}$

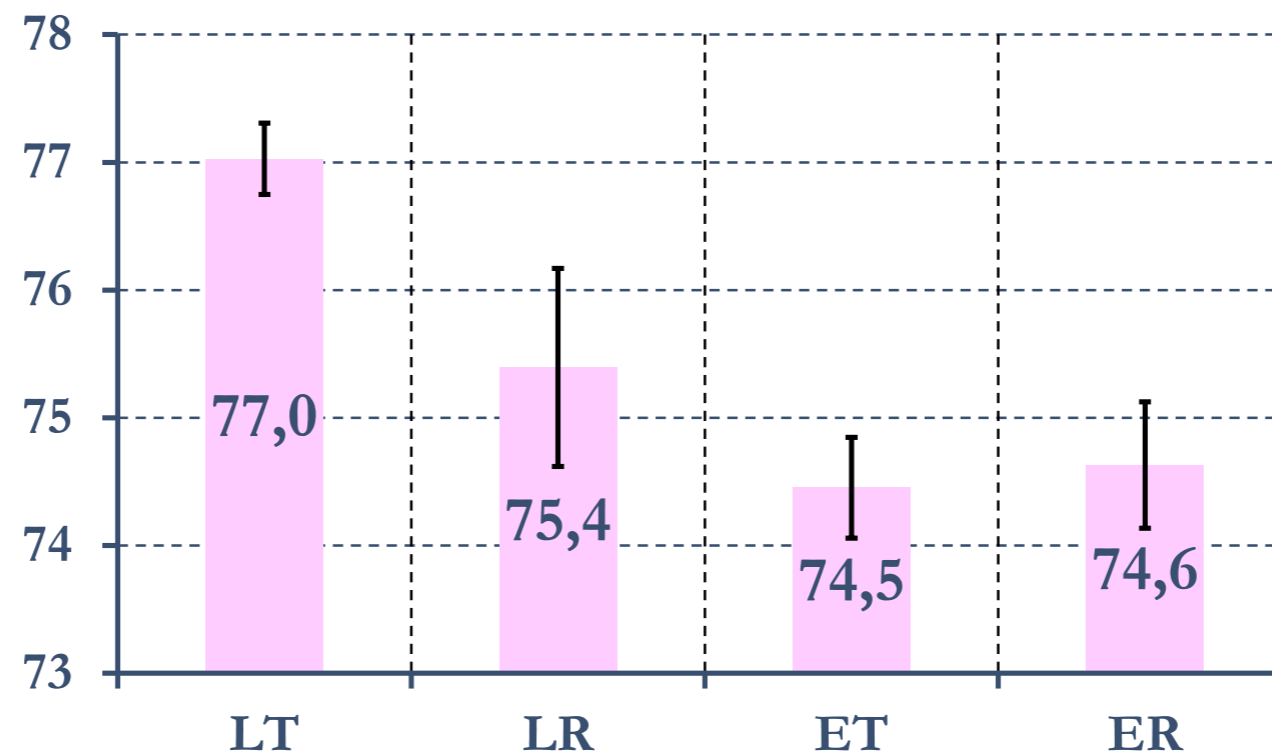
$$\rightarrow P_{eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

$$(AFPC-AFREM [1]) \quad \epsilon_{eau} = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{\rho_{eau} V_0}$$



# Porosité

## Porosité accessible à l'eau exemple bois massif



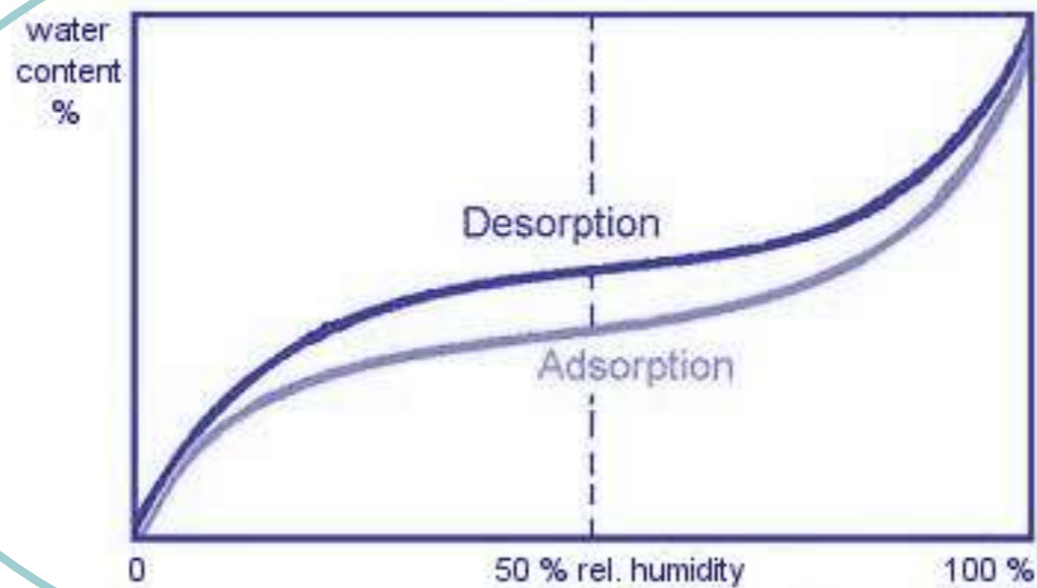
Echantillon	Masse sèche (g)	Masse saturée (g)	Masse saturée mesurée dans l'eau (g)	Volume total (cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)	Porosité moyenne (%)
LT <sub>1</sub>	13.614	43.811	4.566	39.2	76.9	<b>77.0</b>
LT <sub>2</sub>	13.765	43.964	4.609	39.4	76.7	
LT <sub>3</sub>	13.446	43.599	4.452	39.1	77.0	
LT <sub>4</sub>	13.307	43.649	4.449	39.2	77.4	
LR <sub>1</sub>	14.378	44.23	4.826	39.4	75.8	<b>75.4</b>
LR <sub>2</sub>	15.067	44.818	5.108	39.7	74.9	
LR <sub>3</sub>	15.141	44.763	5.055	39.7	74.6	
LR <sub>4</sub>	14.015	44.027	4.692	39.3	76.3	
ET <sub>1</sub>	14.156	44.163	3.695	40.5	74.1	<b>74.5</b>
ET <sub>2</sub>	14.582	44.81	4.242	40.6	74.5	
ET <sub>3</sub>	14.22	44.947	3.972	41.0	75.0	
ET <sub>4</sub>	14.659	44.796	4.159	40.6	74.2	

# Capacité d'humidité

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$c \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

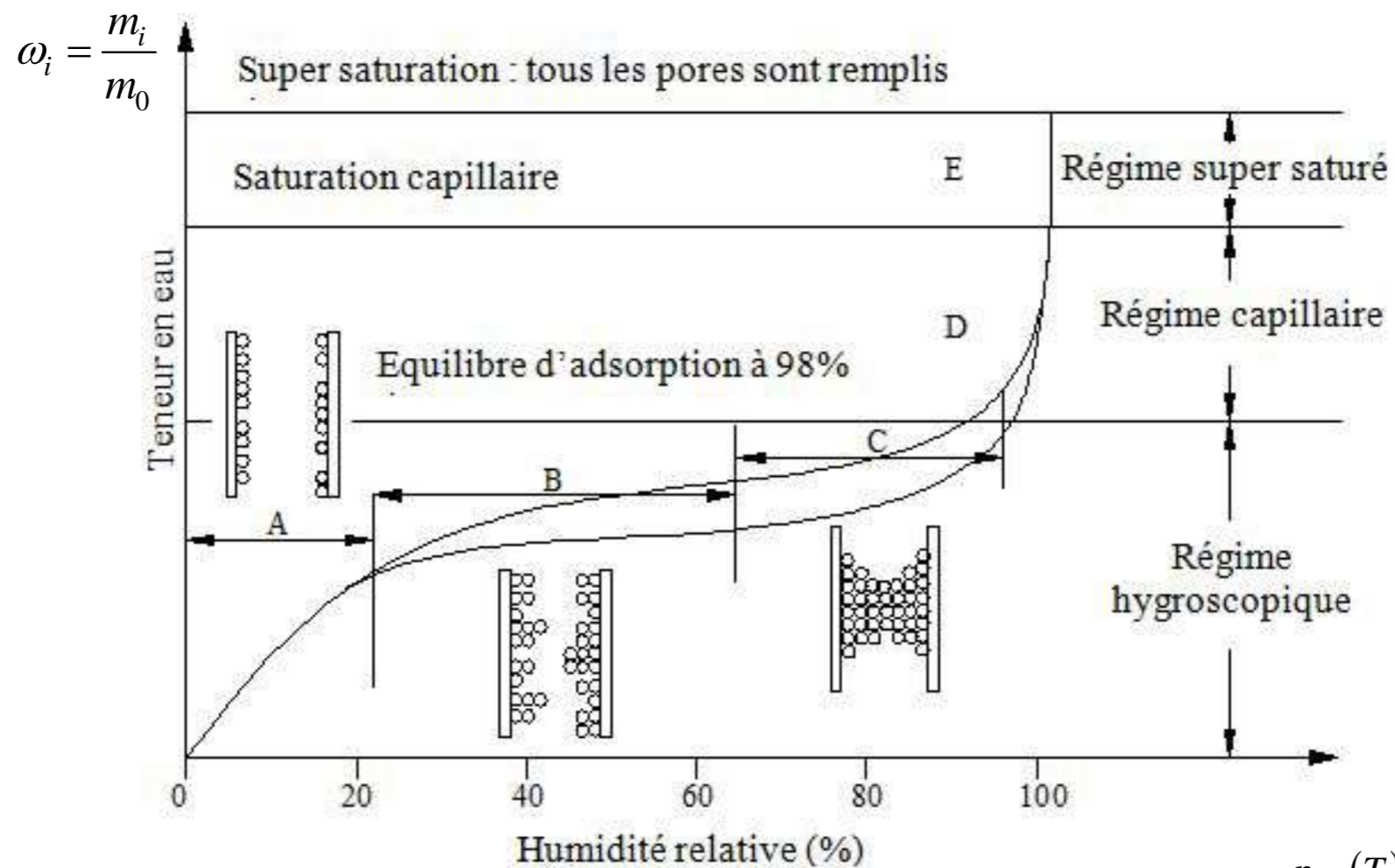
$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$



Pente de l'isotherme de sorption désorption

# Isotherme de sorption désorption

- Le passage de l'état d'équilibre initial à l'état d'équilibre final s'accompagne par un transfert de masse avec rétention ou encore restitution d'humidité.  
=> mécanisme de rétention de l'humidité dans un milieu poreux du bâtiment



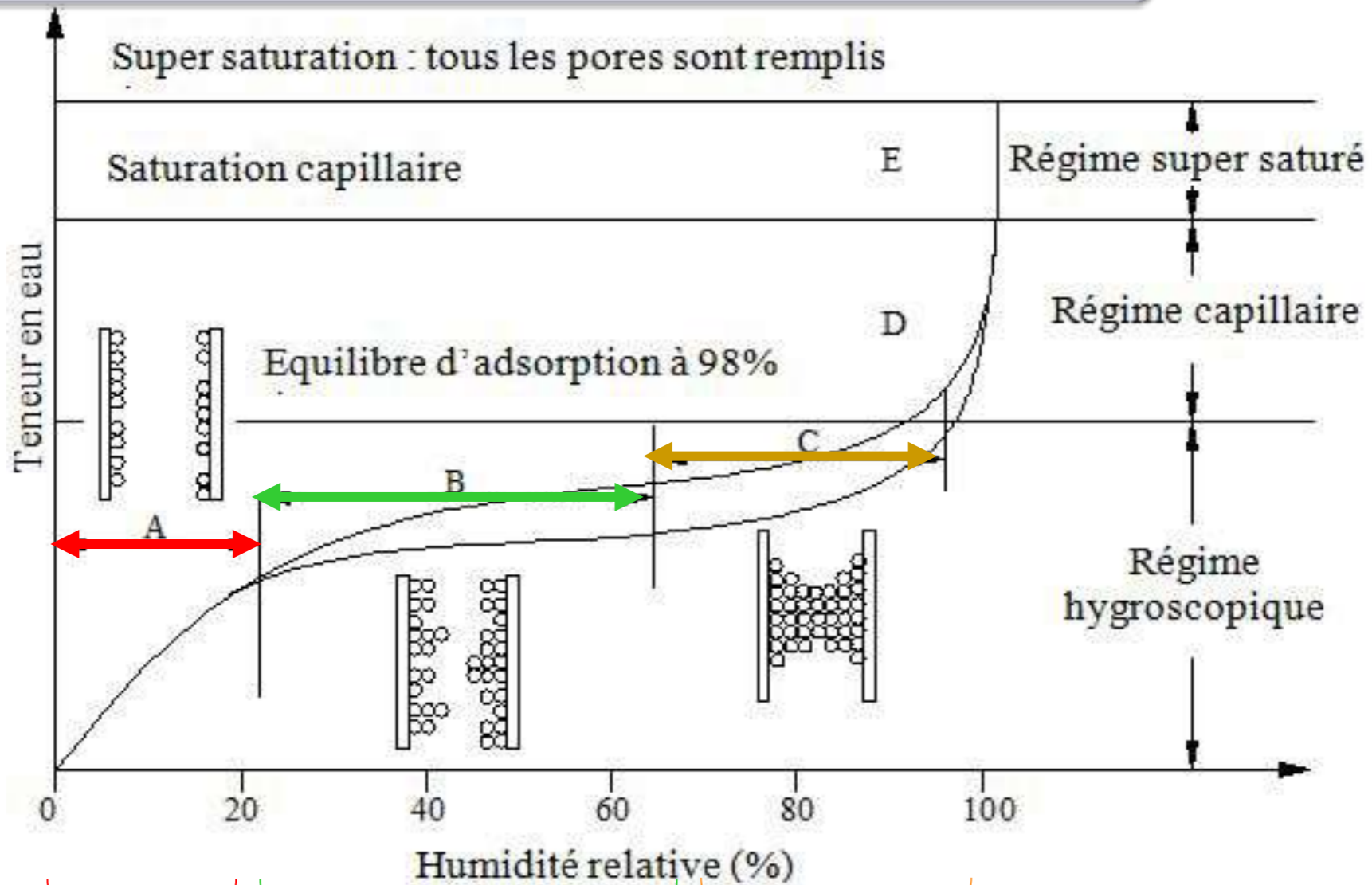
$$HR = 100 \frac{P_v}{P_{sat}}$$

$$P_{sat}(T) = \exp\left(23.5771 - \frac{4042.9}{T - 37.58}\right)$$



Ces courbes sont caractéristiques d'un matériau donné et d'une température donnée.

# Isotherme de sorption désorption



une seule couche d'eau recouvre la surface des pores,  $\Rightarrow$  d'adsorption monomoléculaire  $\Rightarrow$  Le seul mode de transfert possible est la diffusion gazeuse

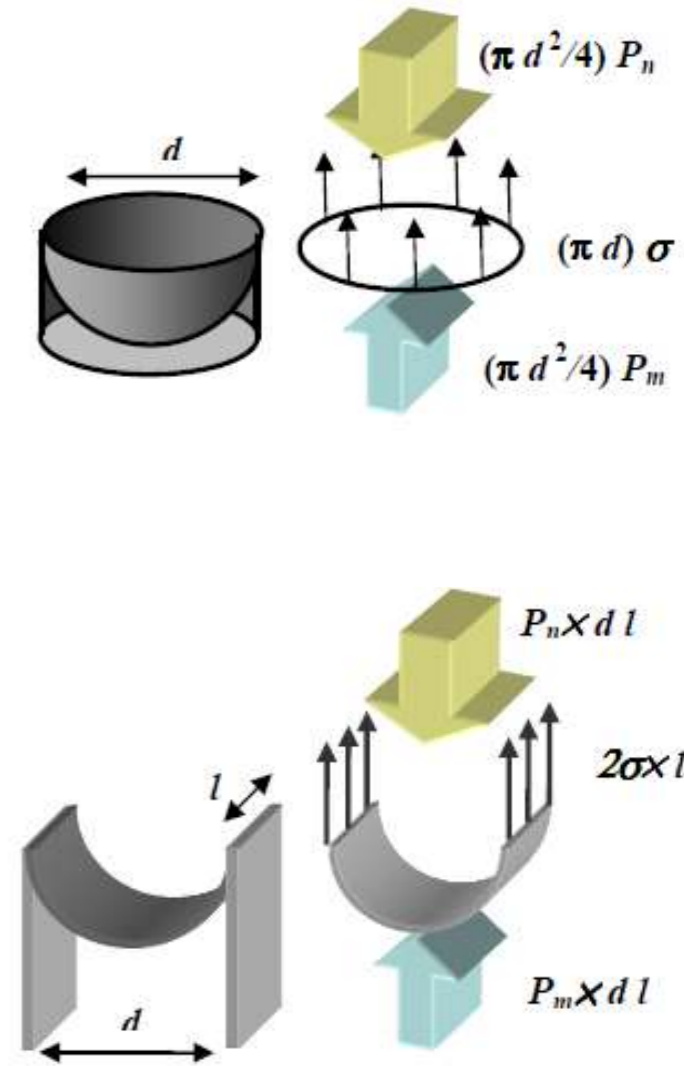
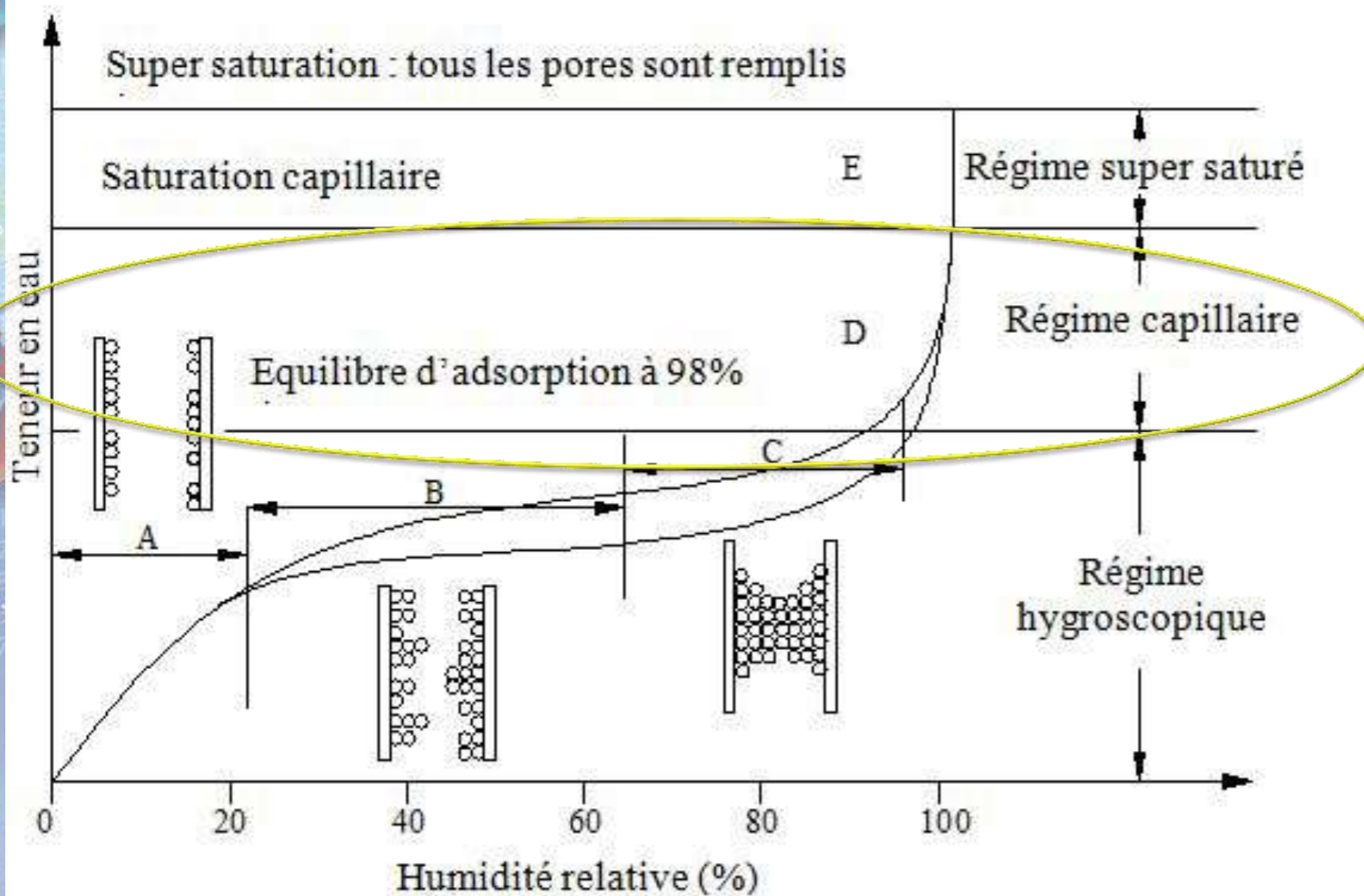
le transfert en phase gazeuse reste dominant. La surface des pores est recouverte de couches moléculaires superposées

augmentation de l'épaisseur de la couche d'eau avec l'augmentation de HR  $\Rightarrow$  l'apparition de ponts liquides entre les parois des pores

condensation capillaire remplissage pores de petits diamètres

Région Hygroscopique (A-B-C)

# Isotherme de sorption désorption

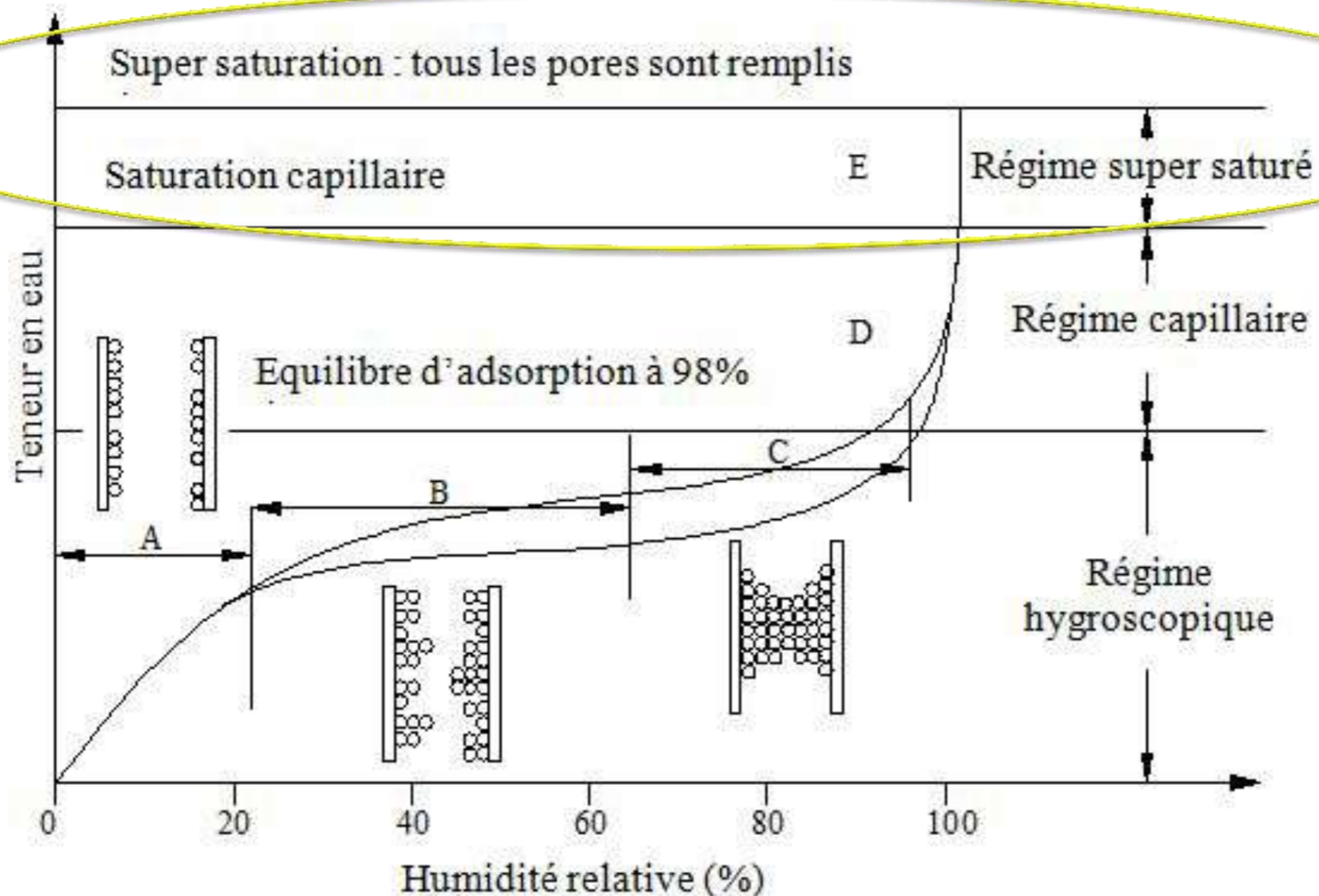


**Région D** : caractérisé par une phase capillaire continue  
 ⇒ le transfert se fait principalement en phase liquide  
 C'est la pression capillaire qui gouverne le mouvement.

$$P_c = -\Psi = P_n - P_m = \frac{\sigma}{R_c} = \frac{4\sigma}{d}$$

$$p_c = \frac{RT \rho_l}{M} \ln(\varphi)$$

# Isotherme de sorption désorption



**Région E** : Cet état peut être atteint par **succion** après une longue durée d'immersion dans l'eau, durée nécessaire pour la dissolution de l'air dans l'eau. En laboratoire cet état peut être atteint par succion sous pression.

A partir de ce régime il n'y a plus d'autres états d'équilibre, l'humidité relative est toujours égale à 100%.

# Isotherme de sorption désorption

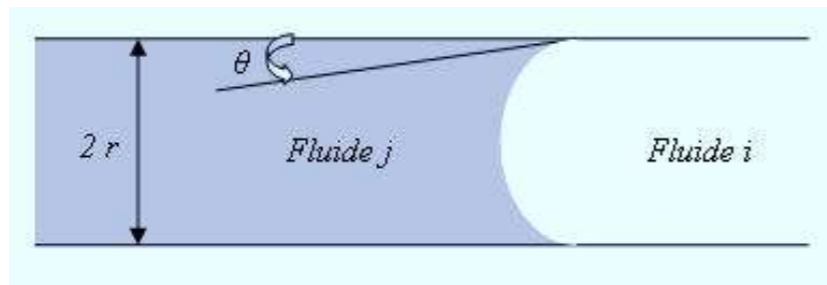
- Mouillage d'un matériau poreux => l'existence de part et d'autre d'une différence de pression positive entre l'air humide et l'eau  $P_c = P_a - P_l$

Loi de Laplace 
$$P_c = \sigma \cdot \cos \theta \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

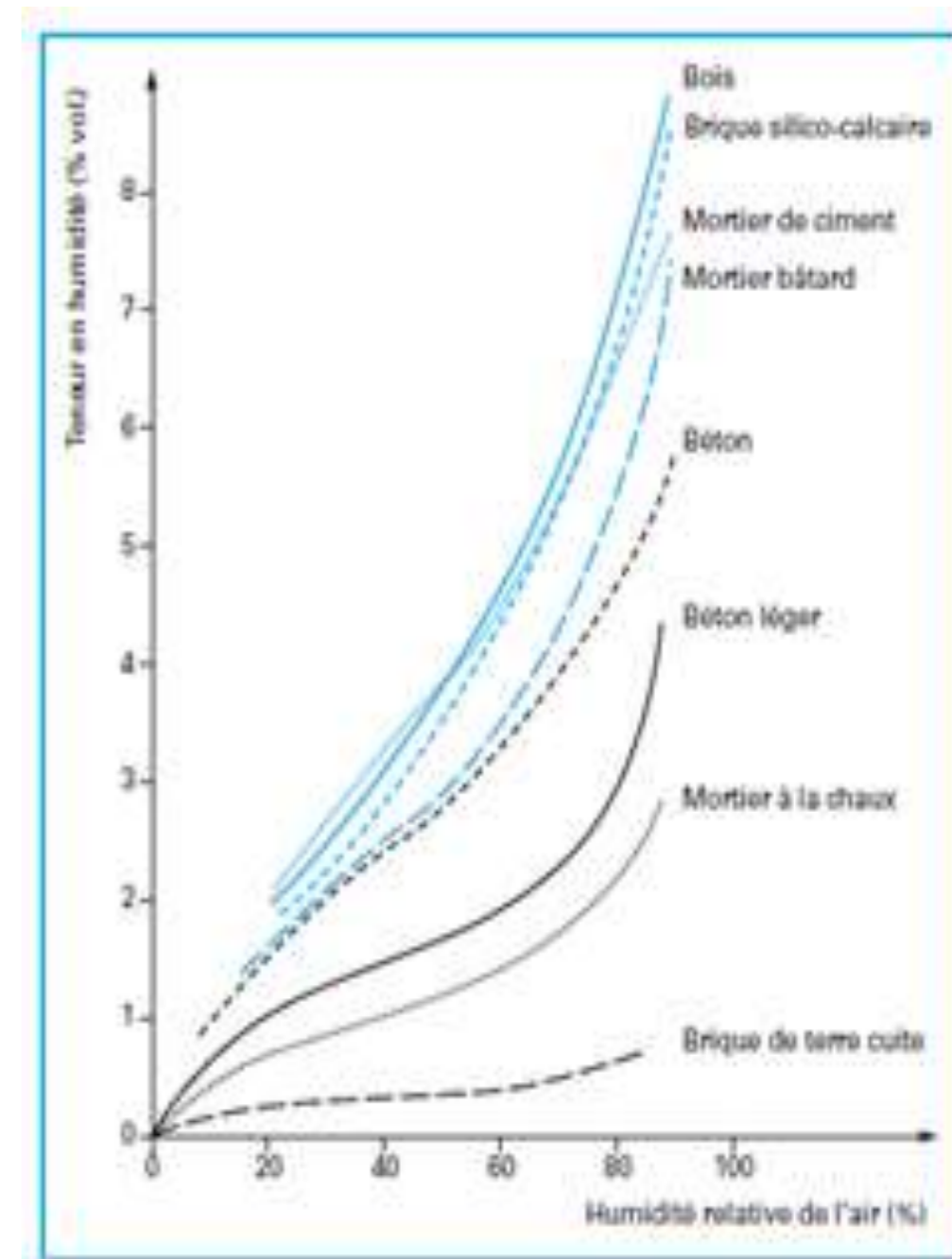
=> En hauteur d'eau : succion 
$$\psi = -\frac{P_c}{\rho_l g} = \psi(T, u)$$

- La succion totale dans le **domaine hygroscopique** est souvent exprimé par la **Loi de Kelvin**

$$P_c = \frac{RT \rho_l}{M} \ln(\varphi)$$



Distribution de fluide dans un capillaire de rayon "r"

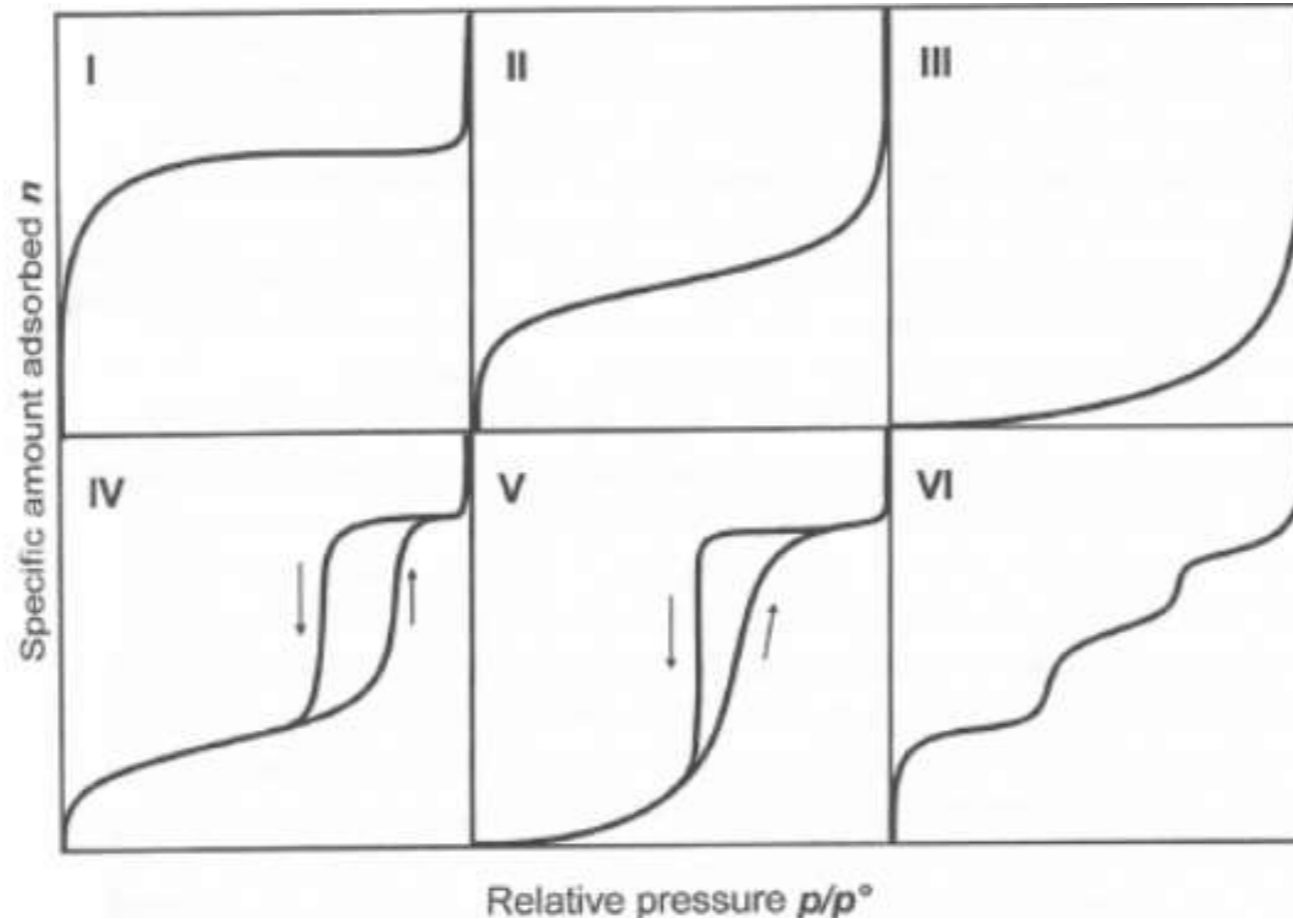


le bois est le matériau le plus hygroscopique





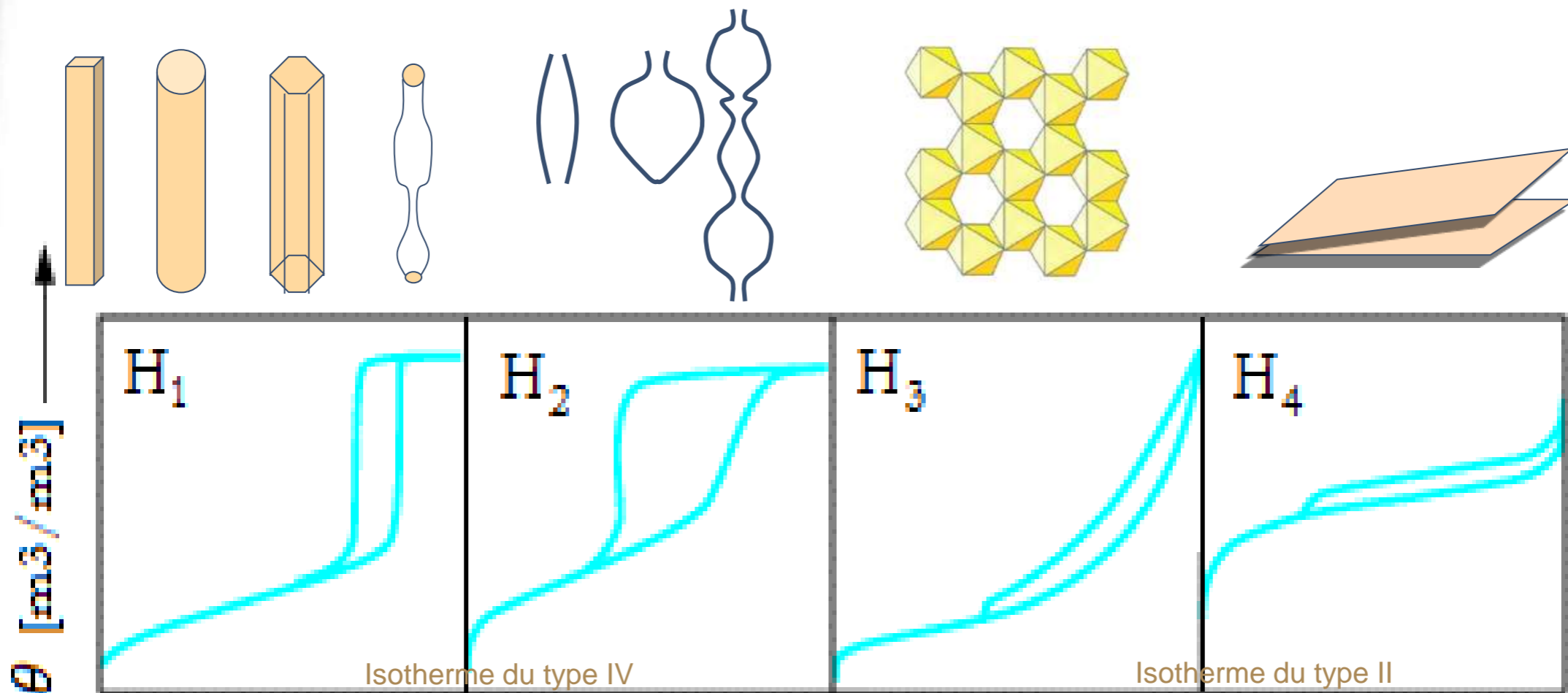
# Isotherme de sorption désorption



- Type I : Le milieu ne contient que des micropores saturés pour de faibles valeurs de  $p/p_s$ , il ne se produit ensuite aucune adsorption pour les valeurs plus élevées qui permettraient de remplir des mésopores.
- Type II : Le milieu est non poreux ou macroporeux, cette isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire : épaissement progressif de la couche adsorbée.
- Type III : Le milieu est du même type que pour les isothermes de type II mais les interactions milieu poreux / gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- Type IV : L'isotherme est identique à celle de type II aux basses pressions, un palier de saturation se développe aux hautes pressions. Elle correspond à un milieu mésoporeux dans lequel se produit une condensation capillaire. Le phénomène n'est pas réversible, on observe en général un hystérésis entre les courbes d'adsorption et de désorption.
- Type V : Le milieu est du même type que pour les isothermes de type IV mais les interactions milieu poreux / gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- Type VI : Cette isotherme correspond à un milieu poreux dans lequel les couches adsorbées se forment les unes après les autres.

# Isotherme de sorption désorption

## Phénomène d'hystérésis



Matériau possède une distribution très **étroite** de mésopores

Matériaux ayant des **mésopores** en intercommunication

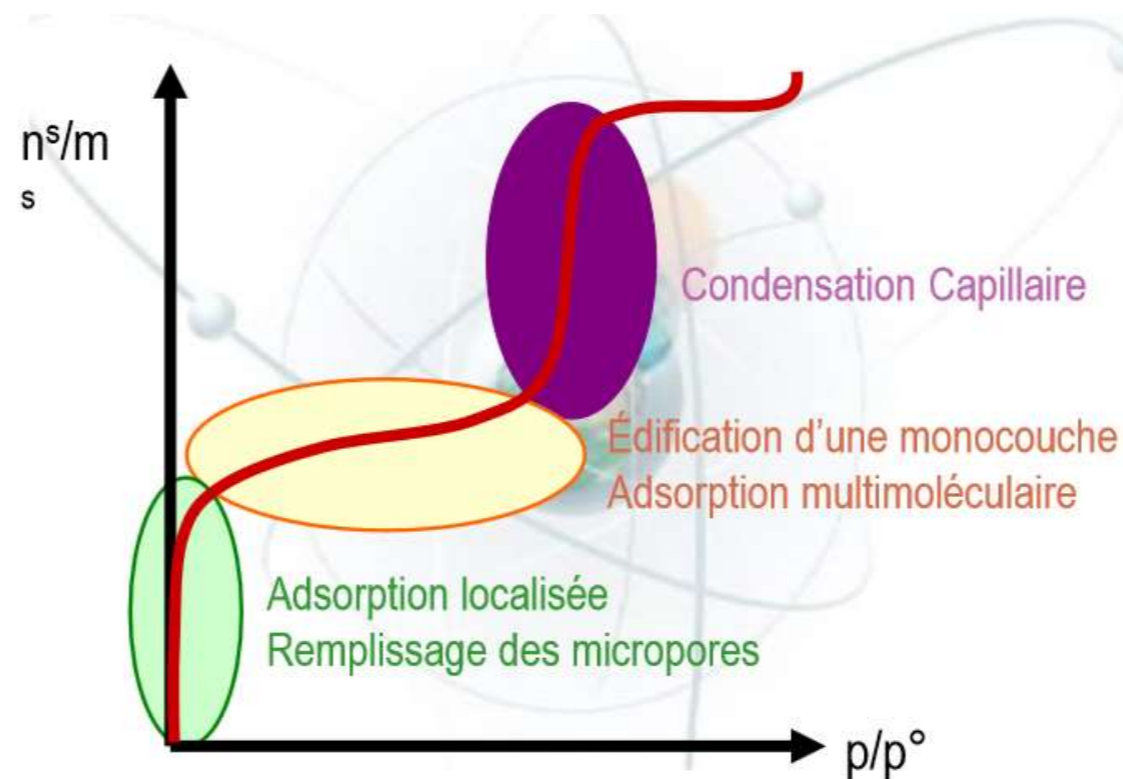
Matériau forme des **agrégats** => condensation capillaire s'effectuant dans une texture non rigide

Adsorbants microporeux ayant des **feuilletés liés** entre eux de façon plus ou moins rigide et entre lesquels peut se produire une condensation capillaire

# Isotherme de sorption désorption

## Raisons du phénomène d'hystérésis

- l'accessibilité de certains pores par des pores de diamètre inférieur, en configuration « bouteille d'encre ».
- ⇒ En sorption le remplissage des pores d'accès empêche le remplissage du pore de diamètre supérieur. L'air reste piégé aussitôt que les gorges d'accès sont remplies.
- ⇒ En désorption, la vidange du pore de diamètre plus grand ne commence qu'à partir du moment où l'humidité relative descend assez bas pour vider le pore de diamètre plus petit.



# Isotherme de sorption désorption

## Méthodes gravimétriques



Dynamic Vapor Sorption  
DVS



Masse ~ 30mg  
Précision de la balance 0.1  $\mu$ g

2 semaines



Vapor Sorption Analyzer  
VSA



Masse ~ 500-5000mg  
Précision de la balance 0.1 mg

2 semaines



Chambre climatique  
EN ISO 12571 (2000)

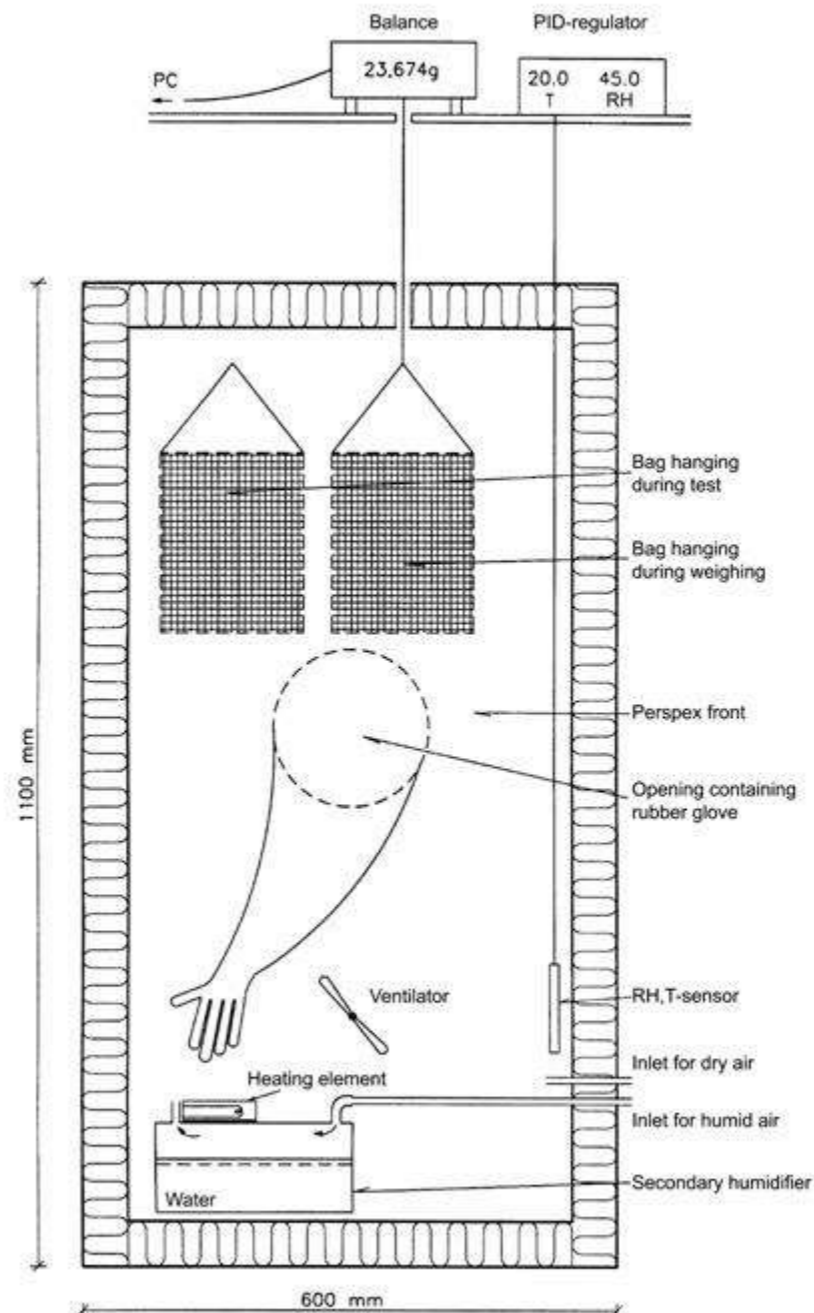


Masse min. 10000mg  
Précision de la balance 1 mg

2 ans

# Isotherme de sorption désorption

Méthodes gravimétriques => enceinte climatique



# Isotherme de sorption désorption

## Méthodes gravimétriques



Chambres climatiques

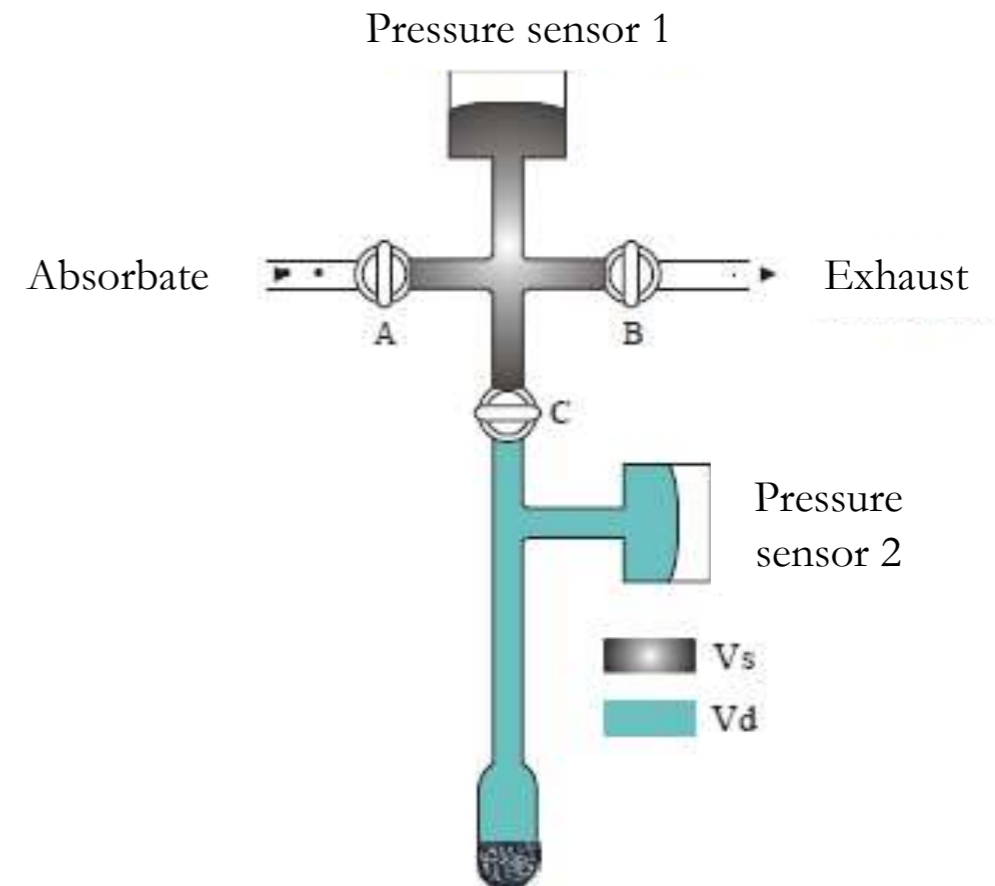


Préparation échantillons bois (IFB)

# Isotherme de sorption désorption

## Méthodes volumétriques

### Belsorp Aqua 3



Définir une quantité de gaz adsorbée par l'échantillon en passant par le principe de conservation du nombre de mole

# Isotherme de sorption désorption

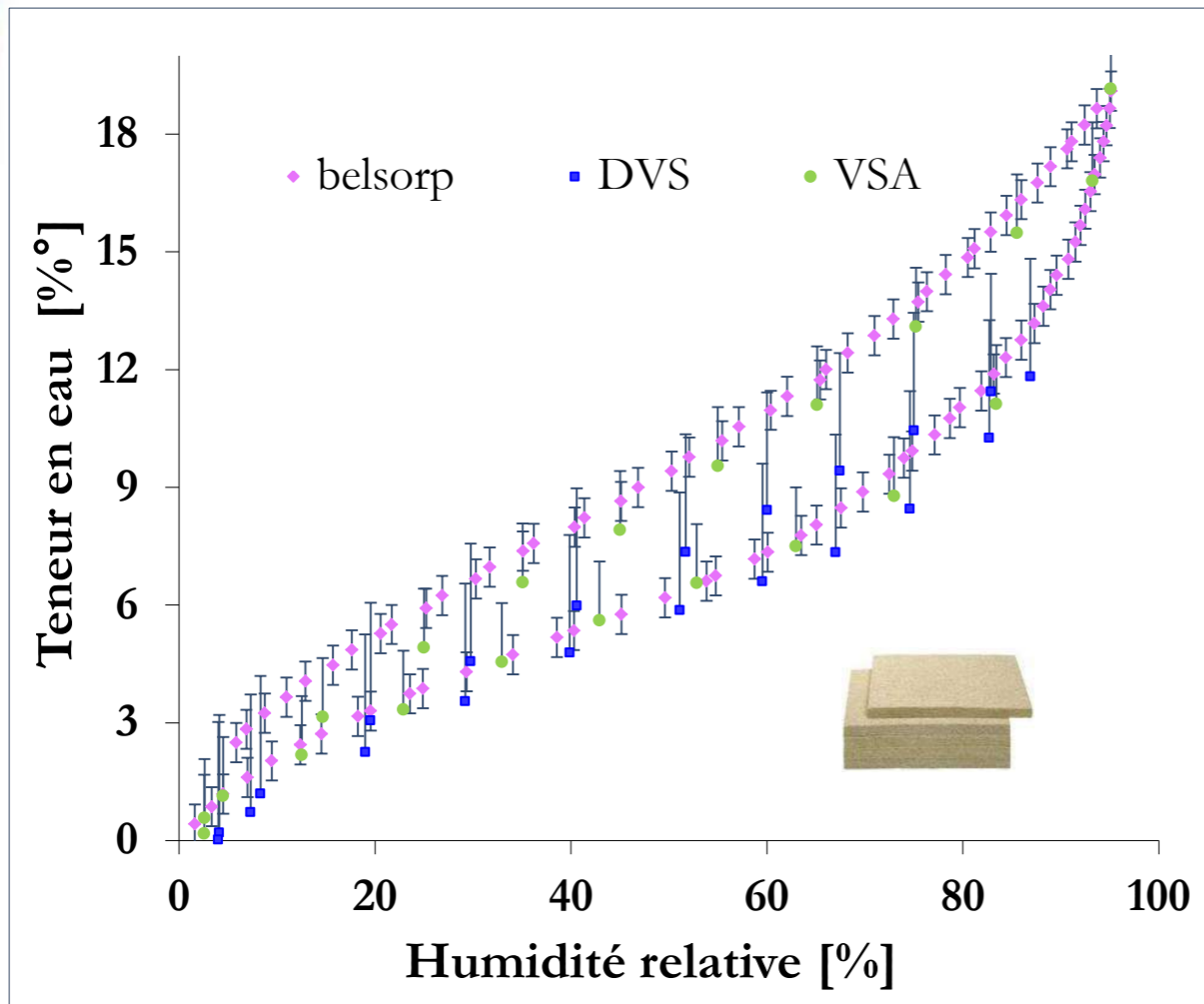
## Méthodes volumétriques

Belsorp Aqua 3

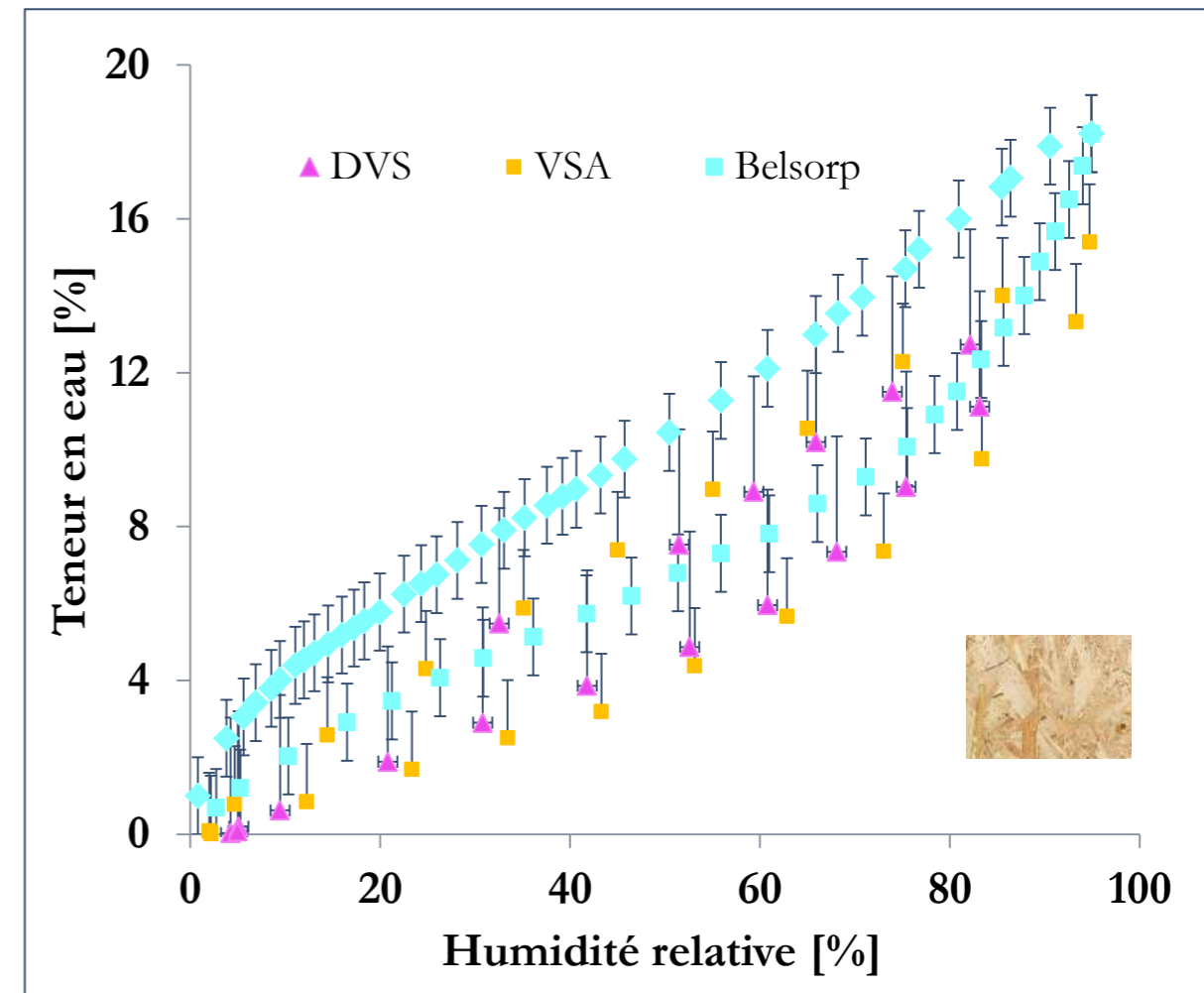




# Isotherme de sorption désorption



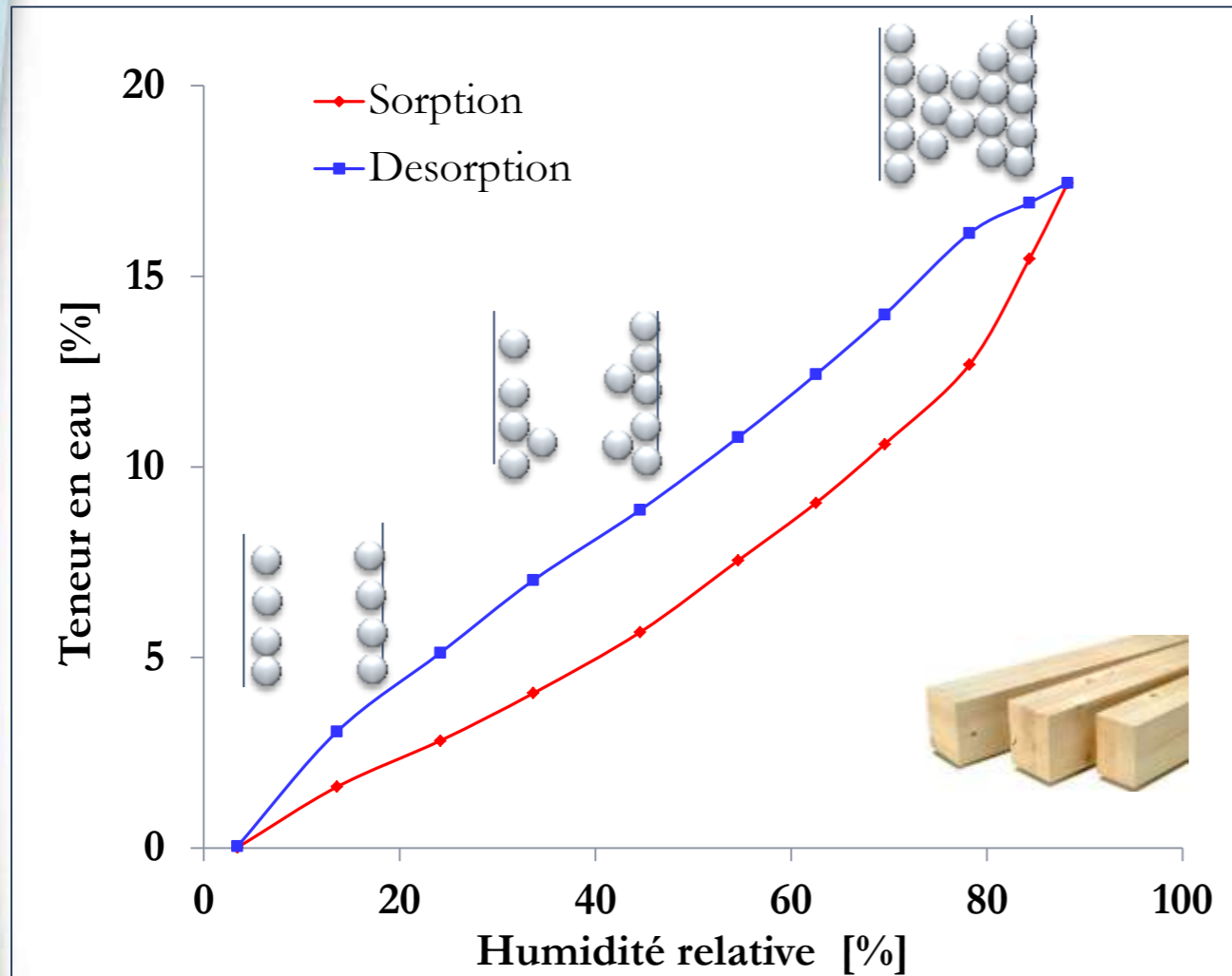
Comparaison de l'isolant de fibre en bois à 20 °C par différentes méthodes



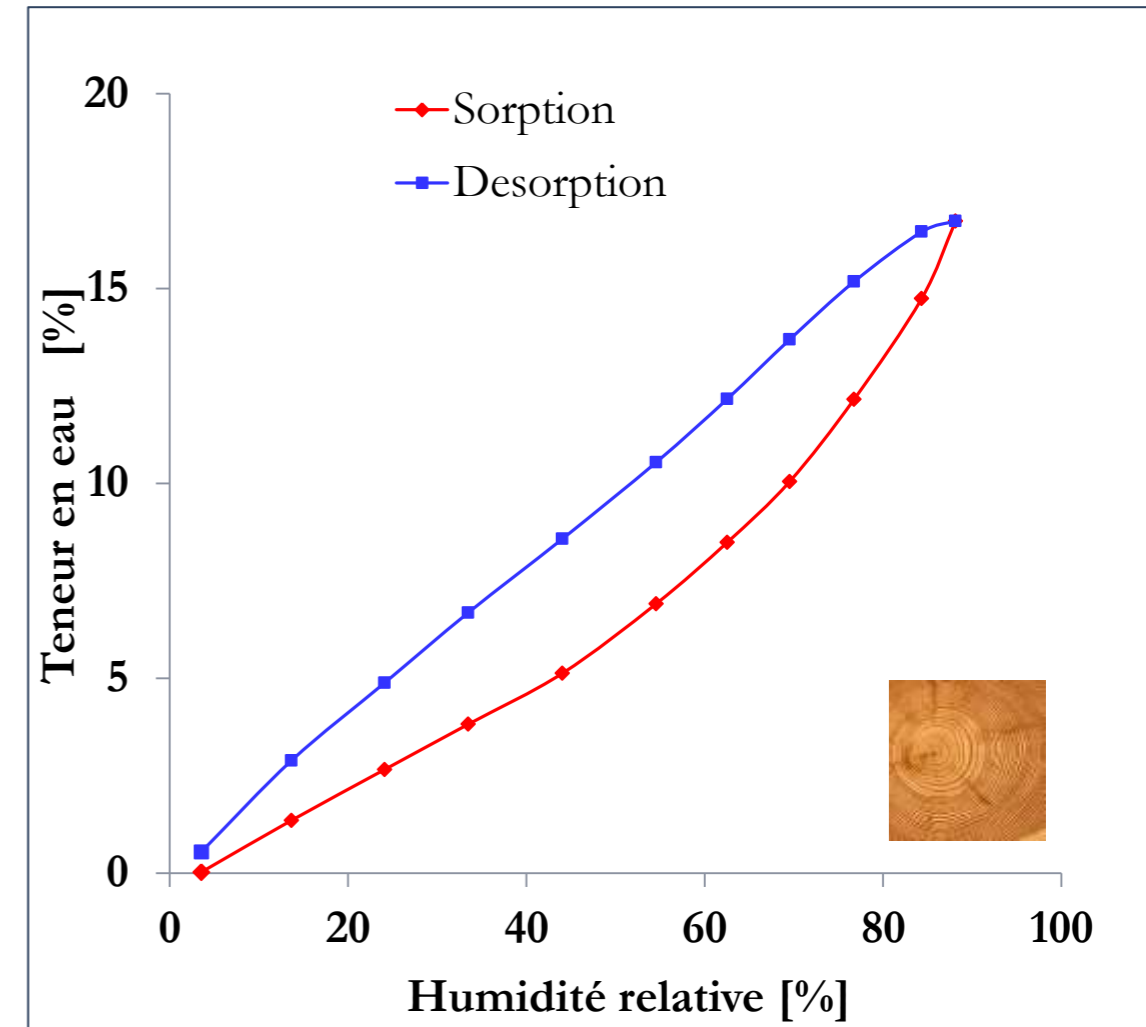
Comparaison de l'OSB à 20°C par différentes méthodes

La méthode gravimétrique ISO 12571 (2000) reste la plus **fiable** vu le respect de la représentativité. Par contre, elle a souvent été critiquée à cause de sa **lenteur**

# Isotherme de sorption désorption



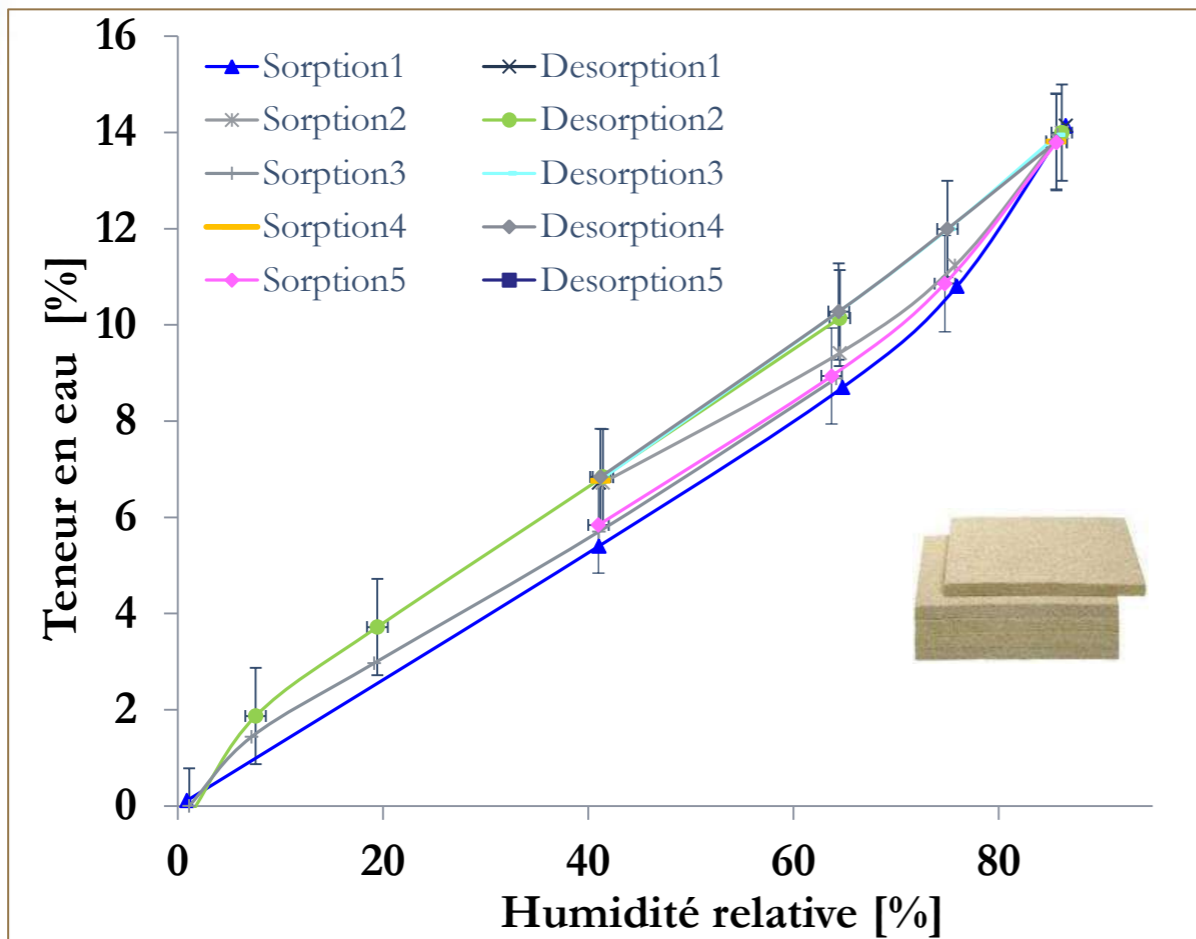
Isothermes de sorption désorption à 20°C du bois de type Etroit **Tangentiel**



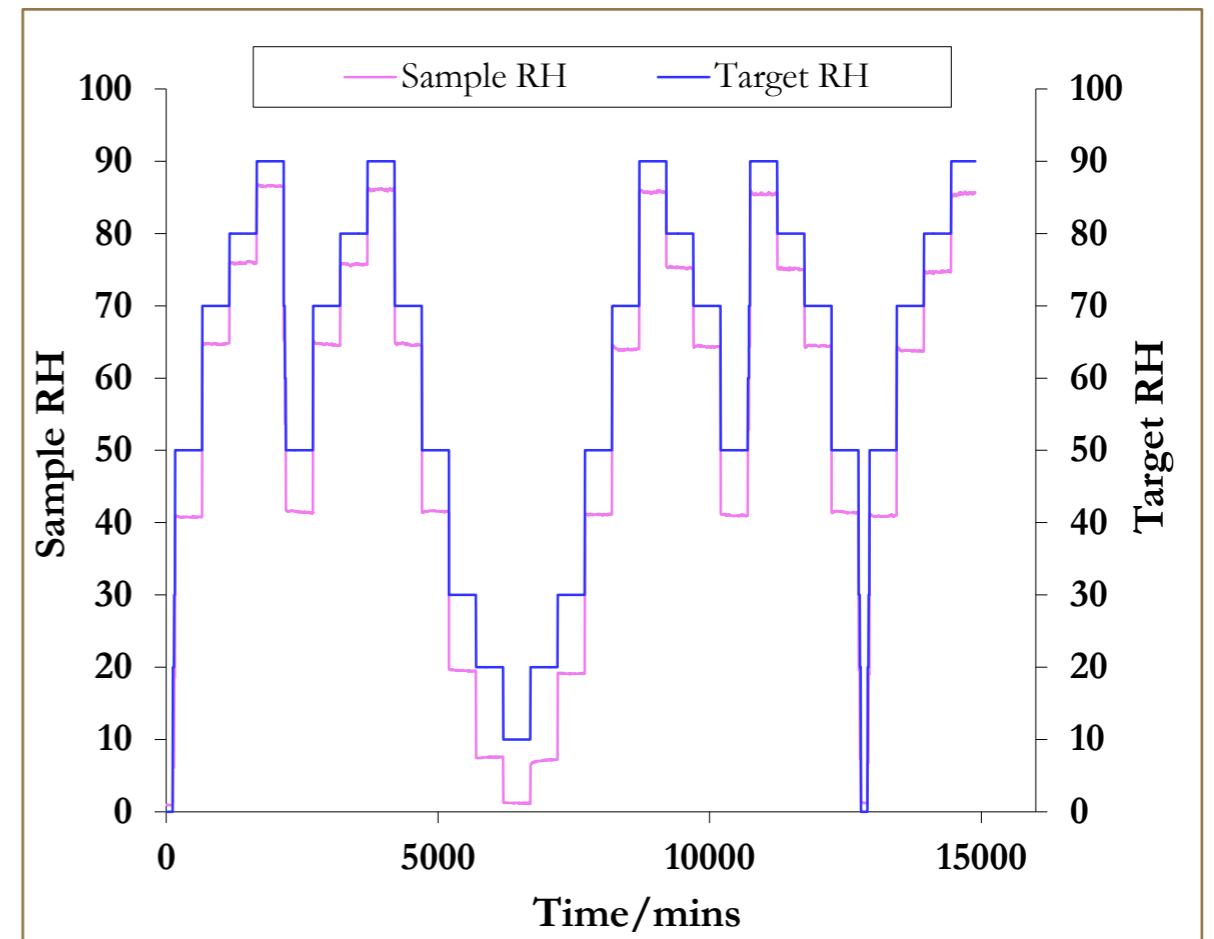
Isothermes de sorption désorption à 20 °C du bois de type Etroit **Radial**

La distribution tangentielle **favorise** le remplissage des canaux par rapport à la distribution radial

# Hystérésis



Hystérésis de l'isolant de fibre en bois à 30° C



Méthode adoptée pour la détermination de l'hystérésis

Apparition d'une courbe **enveloppe**, même phénomène a été observé sur d'autres matériaux de type béton, (Trabelsi et al., 2009)

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

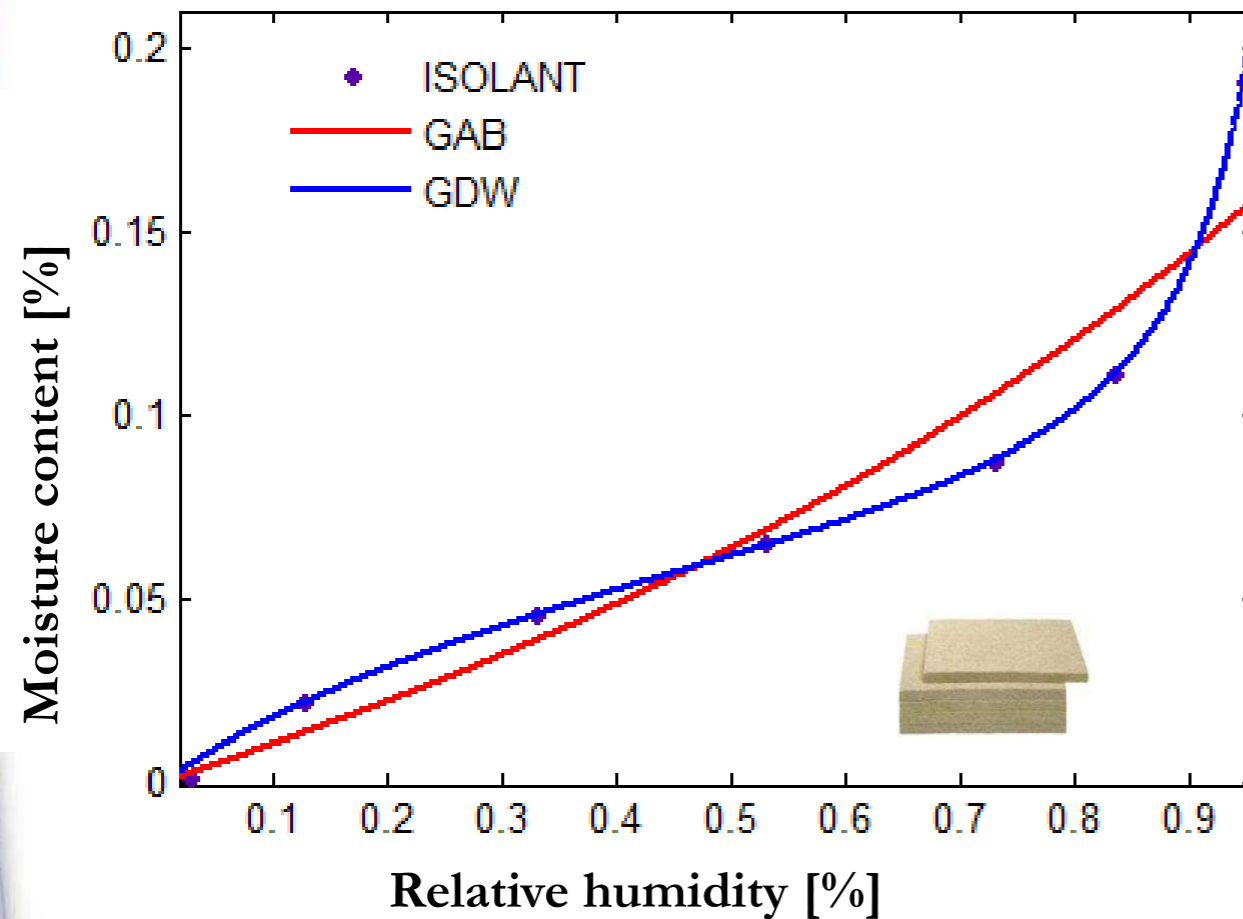
$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

## Modélisation des isothermes de sorption-desorption

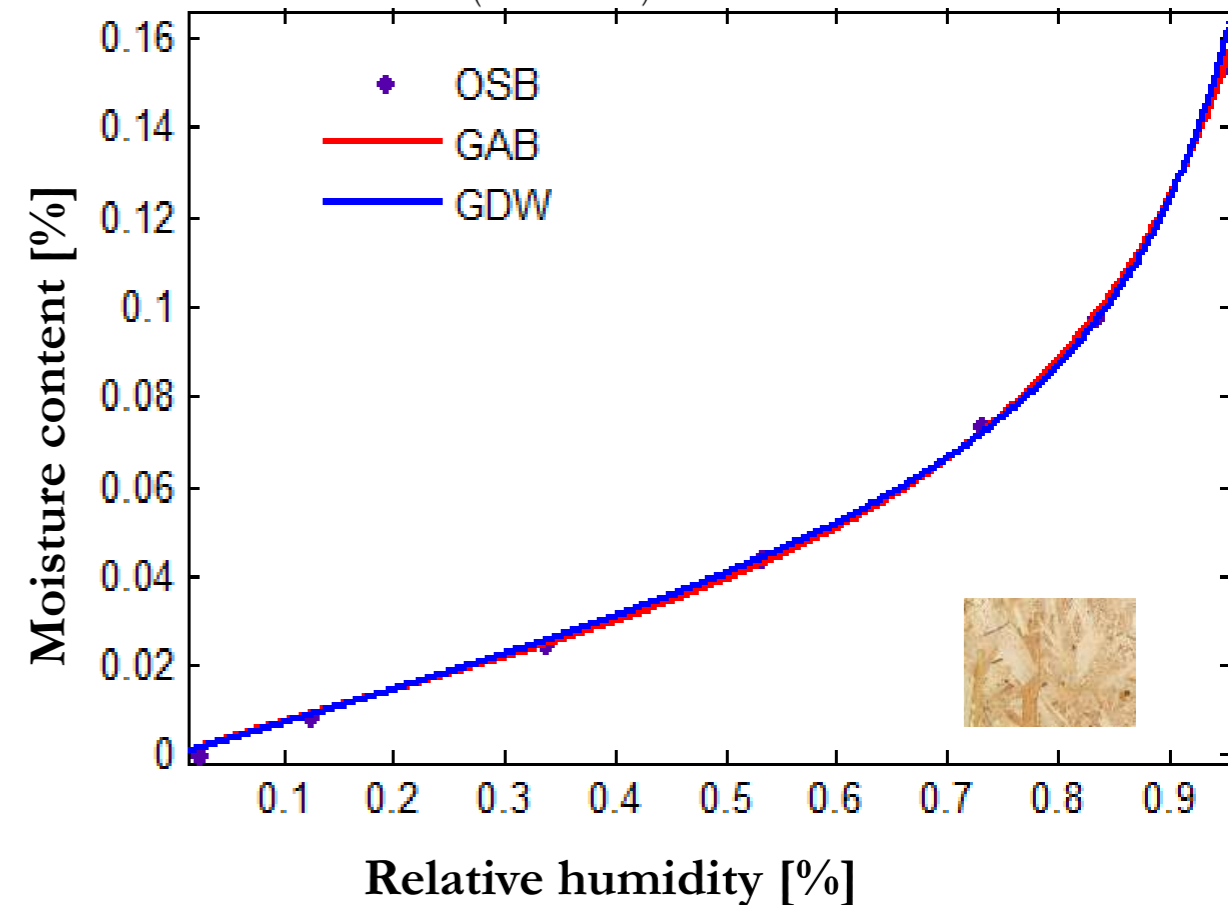
### GAB model

$$u = \frac{A.B.C.\varphi}{(1-C\varphi)(1-C\varphi+B.\varphi)}$$



### GDW model

$$u = \frac{A.C.\varphi}{(1+C.\varphi)} \cdot \frac{1-E(1-D)\varphi}{1-E.\varphi}$$



Le modèle **GDW** est le plus adapté à reproduire les isotherme de sorption désorption déterminé expérimentalement

# Isotherme de sorption désorption

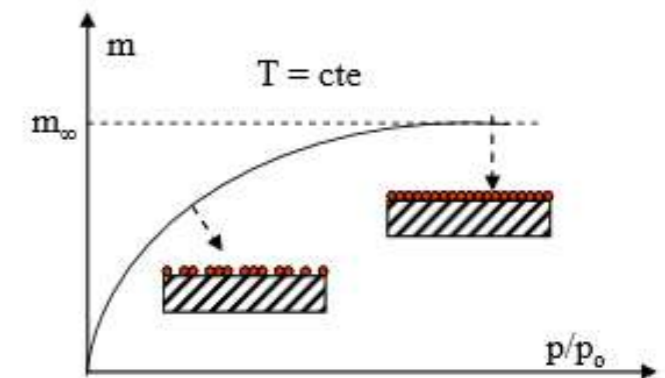
## Théorie de LANGUMUIR

- Les molécules sont adsorbées sur des sites bien définis à la surface de l'adsorbant
- Tous les sites sont identiques
- Chaque site ne peut fixer qu'une molécule => adsorption s'effectue suivant une **couche monomoléculaire**
- L'énergie de chaque molécule adsorbée est indépendante de sa position sur la surface

$$\frac{m}{m_{\infty}} = \frac{k_L P}{1 + k_L P}$$



Existence d'un **équilibre dynamique** entre les molécules qui se fixent sur la surface et celles qui quittent la surface



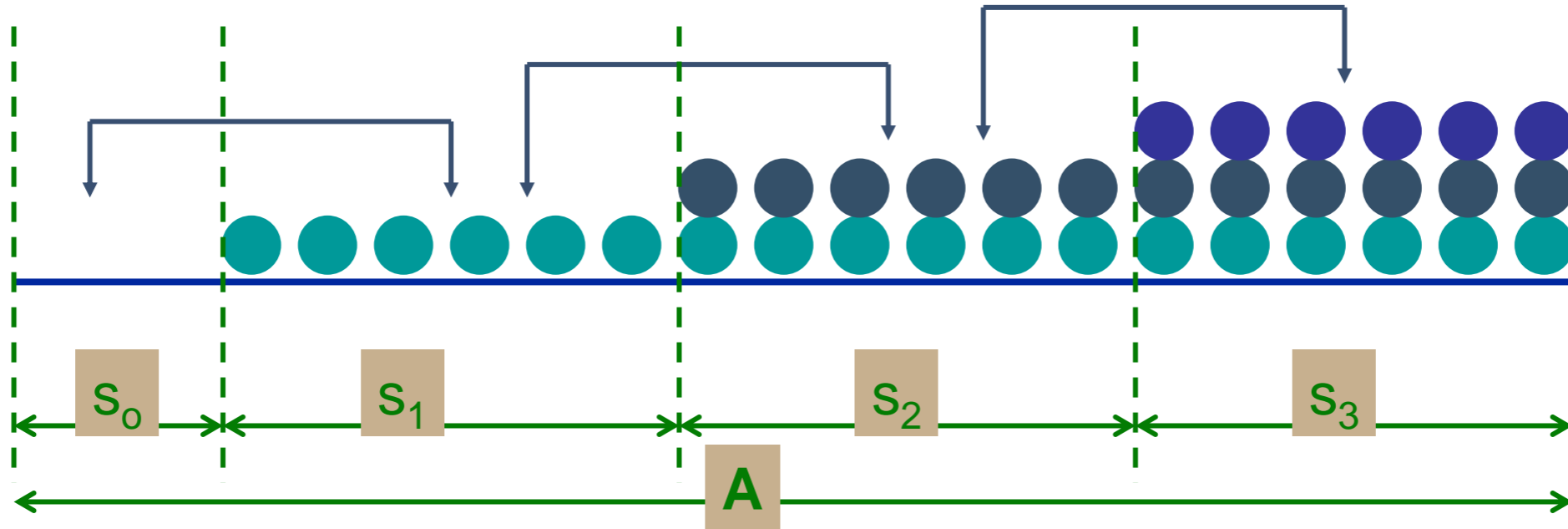
$k_l$  est une fonction de la température et de l'enthalpie d'adsorption d'une molécule de soluté  
 $m$  est la masse de soluté adsorbé à la pression partielle  $P$  par l'unité de masse d'adsorbant frais  
 $m_{\infty}$  est la masse qui serait adsorbée si toute la surface était complètement recouverte par une couche monomoléculaire de soluté



L'équation de Langmuir représentent assez convenablement les **isothermes de type I**

# Isotherme de sorption désorption

Hypothèse principale du modèle BET...



surface  $s_0$  covered with 0 adsorbed layers

...	$s_1$	...	1
...	...	...	...
...	$s_i$	...	$i$

$$\theta = \frac{C \cdot e_m \cdot S_0 \varphi}{(1 - \varphi)(1 + (C - 1)\varphi)}$$

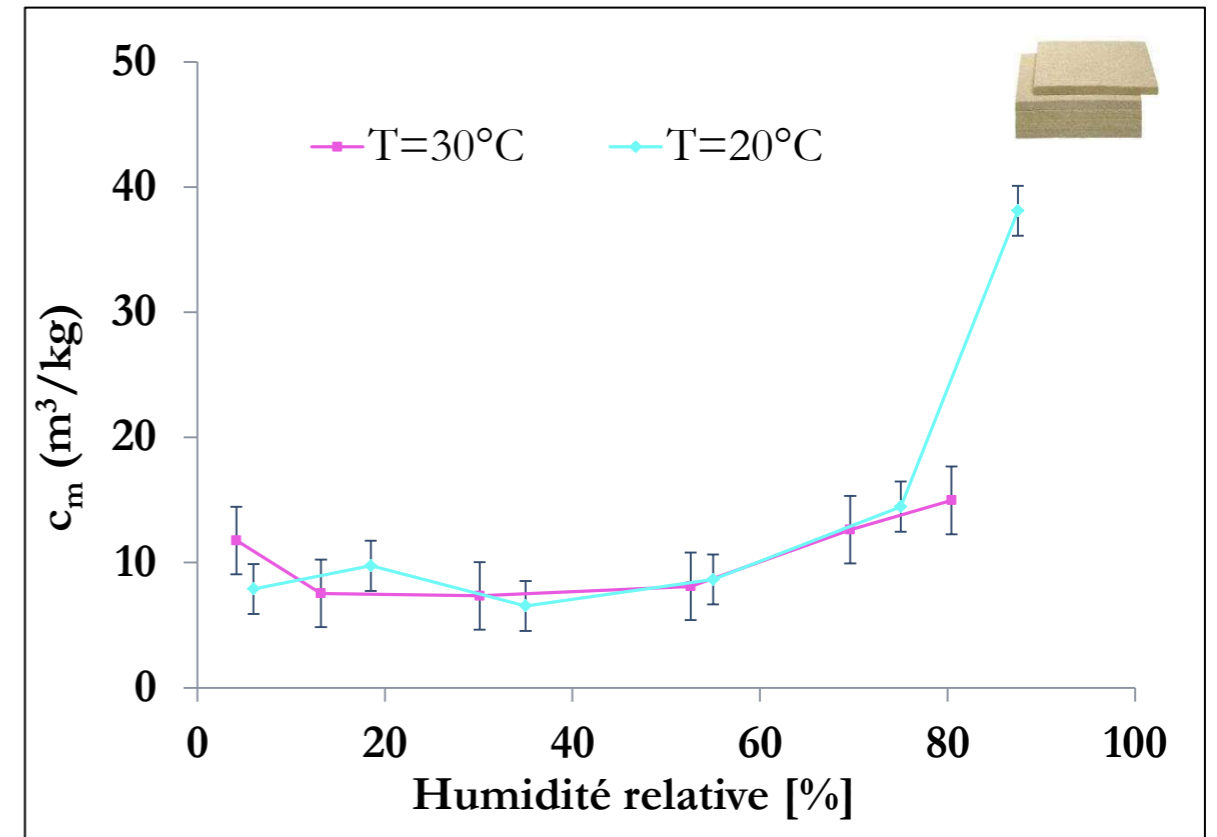
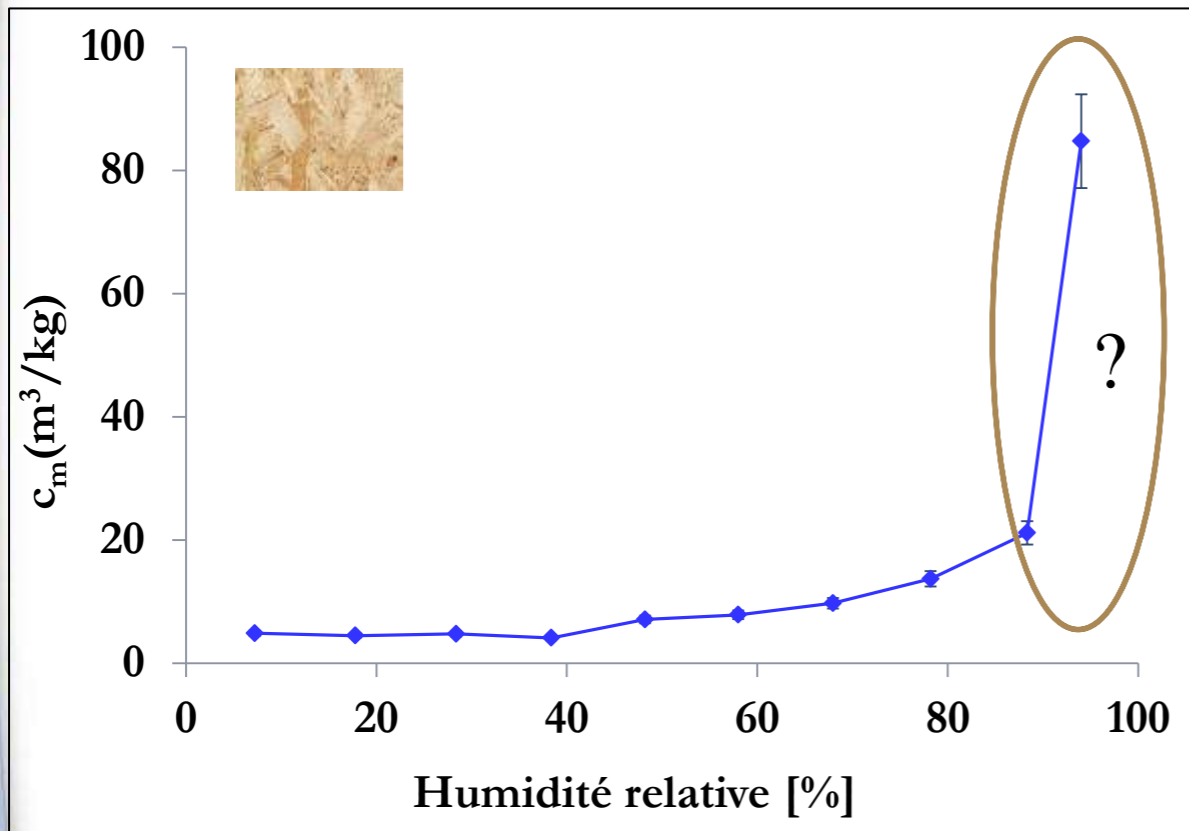
Accessible surface  $A = s_0 + s_1 + \dots + s_i + \dots$

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

## Capacité d'humidité

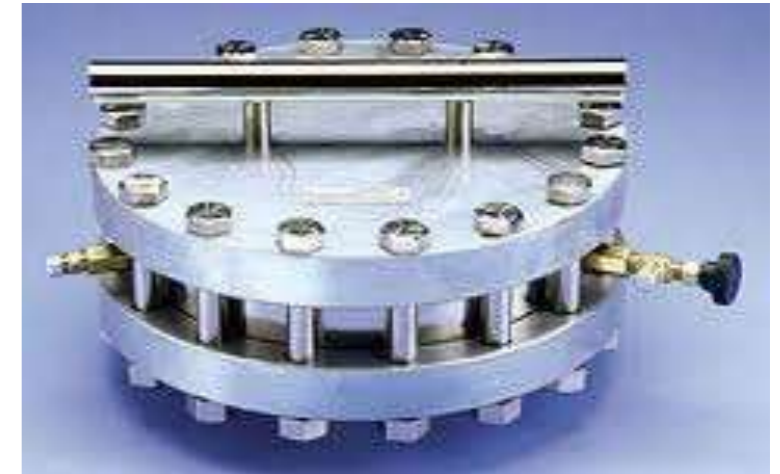


Pente de l'isotherme de sorption désorption

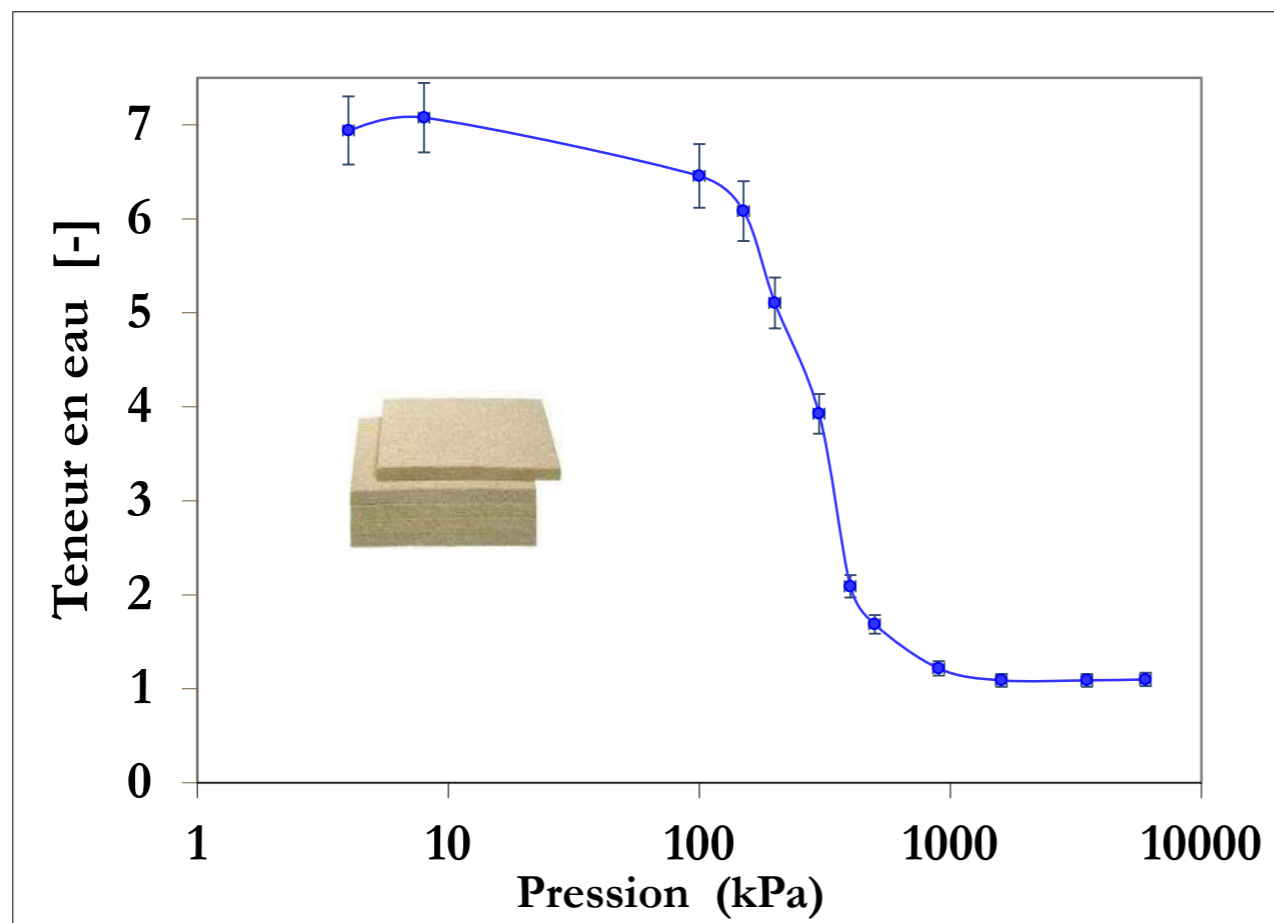
$$c_m = \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \frac{1}{\rho_{vsat}(T)}$$

# Courbe de Rétention d'Eau (CRE)

- Relation entre la teneur en eau à l'équilibre du matériau et la succion mesurée dans un pore
- Relation de Kelvin  $p_c = -\frac{RT\rho_l}{M}\ln(\varphi)$



Extracteur à membrane  
100 bars



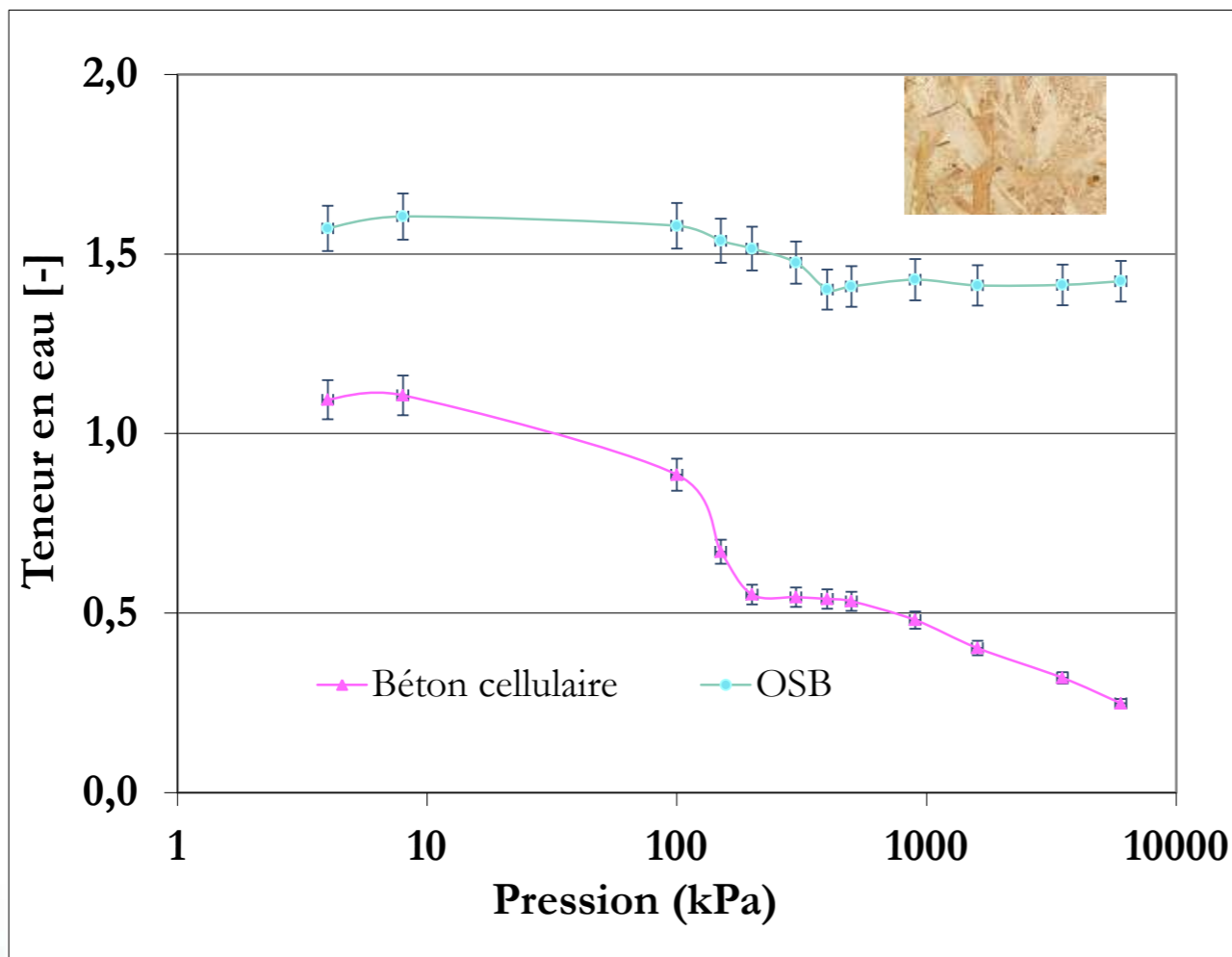


# Courbe de Rétention d'Eau (CRE)

- Plus d'informations sur le processus de sorption-désorption dans la région humide

=> La relation entre l'humidité relative et la succion ( $p_a - p_l$ )

$$p_c = p_a - p_l = \frac{RT}{gM} \ln(\varphi)$$



Succion (kPa)	Humidité relative (%)
0	100
4	99,99
8	99,99
100	99,92
150	99,89
200	99,85
300	99,78
400	99,71
500	99,63
900	99,34
1600	98,84
3500	97,49
6000	95,74
9000	93,67

# Pérmeabilité à la vapeur

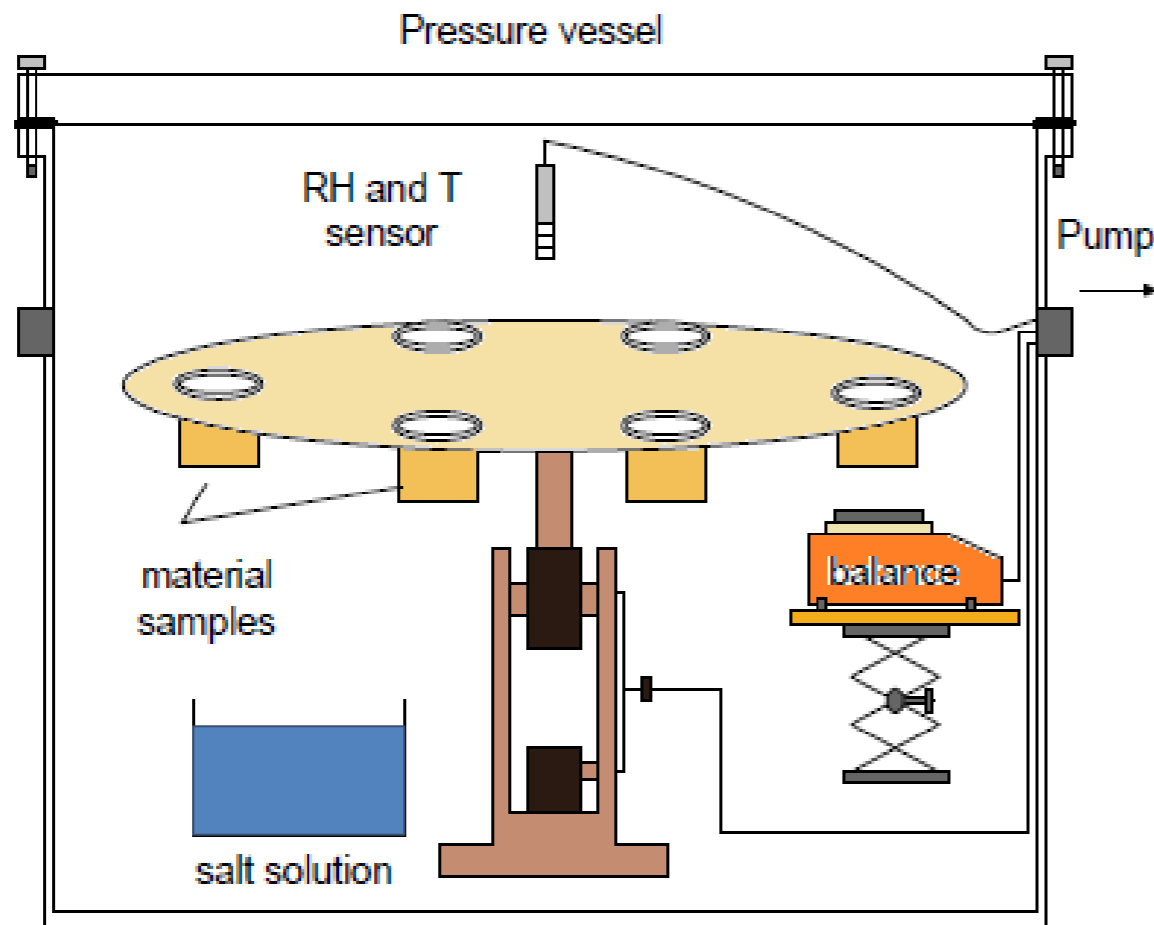


Principe de mesure = suivi de l'effet d'une perturbation extérieure

- **Régime permanent (coupelle)** : on impose un statut de HR et on mesure le flux qui en résulte en régime permanent,
- **Régime transitoire** : on soumet l'échantillon à une variation brusque de HR et on mesure l'évolution de sa masse,
- Sollicitations moins maîtrisées => **méthodes inverses**

# Pérmeabilité à la vapeur

Méthode expérimentale basée sur la mesure du flux de vapeur



→ Méthode Coupelle (ISO 12572, 2001)

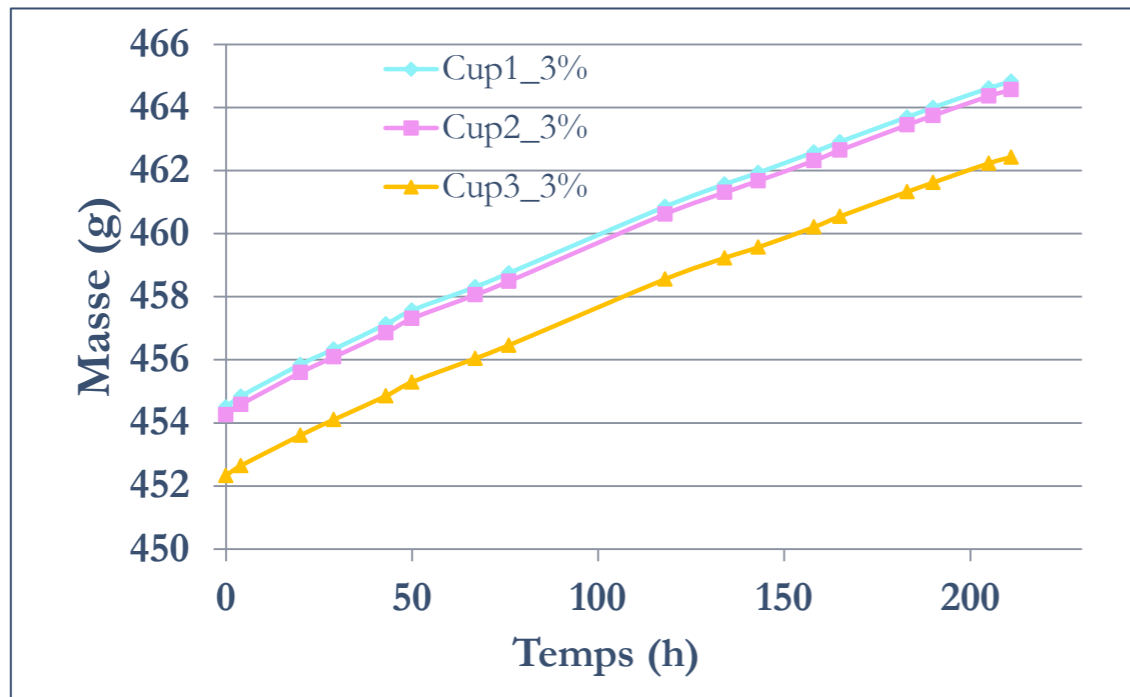
$$\rightarrow j_v = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}$$

Chambre de mesure de perméabilité à la vapeur

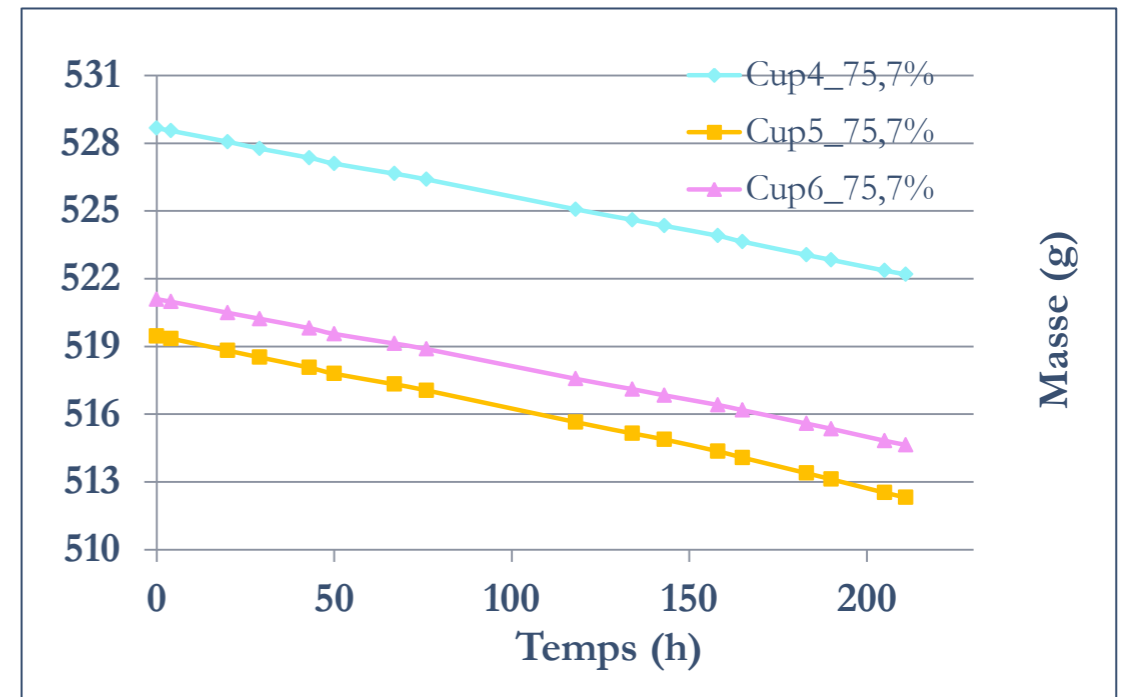
# Pérmeabilité à la vapeur

	Méthode utilisée	Conditions opératoires	Matériaux et taille des éprouvettes recommandées	Etat initial des éprouvettes	Résultats
Perméabilité à la vapeur	Méthode de la coupelle Selon NF EN ISO 12572	Conservation à 20°C ; 50% HR	Diamètre $\Phi=7$ à 11 cm  Epaisseur = 1-2-3 cm Nombre = 3 échantillons de chaque dimension	Secs (40°C ; 20%HR) Humides (20°C ; 100%HR)	<p>*Perméabilité apparente :</p> $\pi_{app} = J_v \cdot \frac{e}{p_{v2} - p_{v1}} \text{ [s]}$ $J_v = \frac{m_v}{S} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{s]}$ <p>*Perméabilité corrigée de la lame d'air :</p> $\pi_{clida} = \frac{e}{J_v - \frac{e_{air}}{\pi_{air}}} \text{ [s]}$ <p><math>\pi_{air} = 1,96 \cdot 10^{10} \text{ [kg/(m.s.Pa)] à } 20^\circ\text{C}</math></p> <p>*Perméabilité vraie :</p> $\pi_v^o = \frac{e}{\frac{e}{\pi_{clida}} - \frac{1}{h_m}} \text{ [s]}$ <p><math>h_m</math> : coef. d'échange de masse à la surface externe de l'éprouvette tel que lorsque <math>e \rightarrow 0</math> ; <math>e/\pi_{clida} \rightarrow 1/h_m</math></p> <p>* Coef. de résistance à la diffusion :</p> $\mu = \frac{\pi_{air}}{\pi}$ <p>* Epaisseur équivalente de la lame d'air :</p> $S_d \text{ [m]} = \frac{\pi_{air}}{\pi} \cdot e = \mu \cdot e$
			<p><math>J_v</math> : densité de flux de masse [kg/(m<sup>2</sup>.s)]  <math>p_{v1}</math> et <math>p_{v2}</math> : pressions partielles de vapeur externe interne à la coupelle  <math>p_{v1s}</math> et <math>p_{v2s}</math> : pressions partielles de vapeur aux frontières du matériau  <math>e</math> : épaisseur du matériau [m]  <math>e_{air}</math> : épaisseur de la lame d'air [m]  <math>h_m</math> : coefficient d'échange de masse à la surface externe du matériau</p>		
isothermes de sorption - désorption	Mise en équilibre d'échantillons avec ambiances contrôlées par solutions salines	Conservation à 20°C Solutions salines utilisées : <ul style="list-style-type: none"> <li>* 22,5% HR : acétate de potassium (CH<sub>3</sub>COOK) ;</li> <li>* 43,2% HR : carbonate de potassium (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ;</li> <li>* 66% HR : nitrite de sodium (NaNO<sub>2</sub>) ;</li> <li>* 94,3% HR : chlorure de potassium (KCl) ;</li> <li>* 97% HR : sulfate de potassium (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</li> </ul>	coté x coté x hauteur (cm <sup>3</sup> ) : *Dimensions : 5,5 x 5,5 x 2 Nombre échantillons = 15	Sorption : séchage 57°C ; 7%HR puis mise en ambiances contrôlées. Désorption : 20°C 97% HR ;, Puis mise en ambiances contrôlées.	Graphes teneurs en eau volumiques $\theta$ en fonction de HR : moyenne sur 5 échantillons et sur 4 demières échéances (10 derniers jours sur durée totale de 45 jours). Variations de masse inférieures à 0,05%

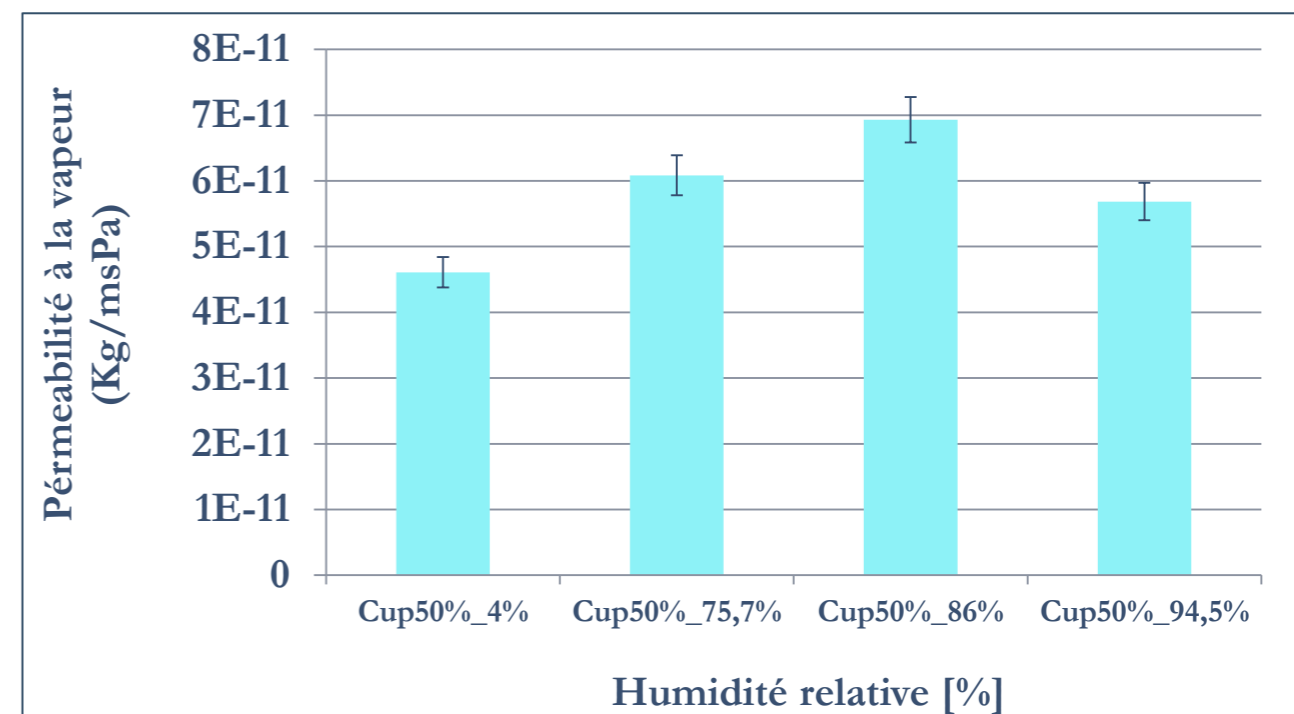
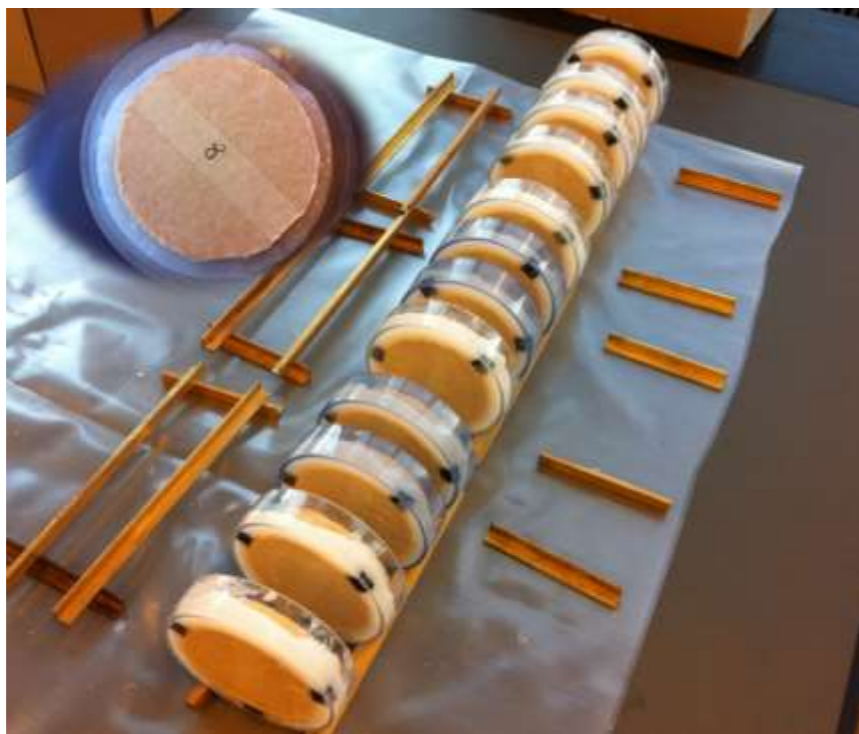
# Pérmeabilité à la vapeur



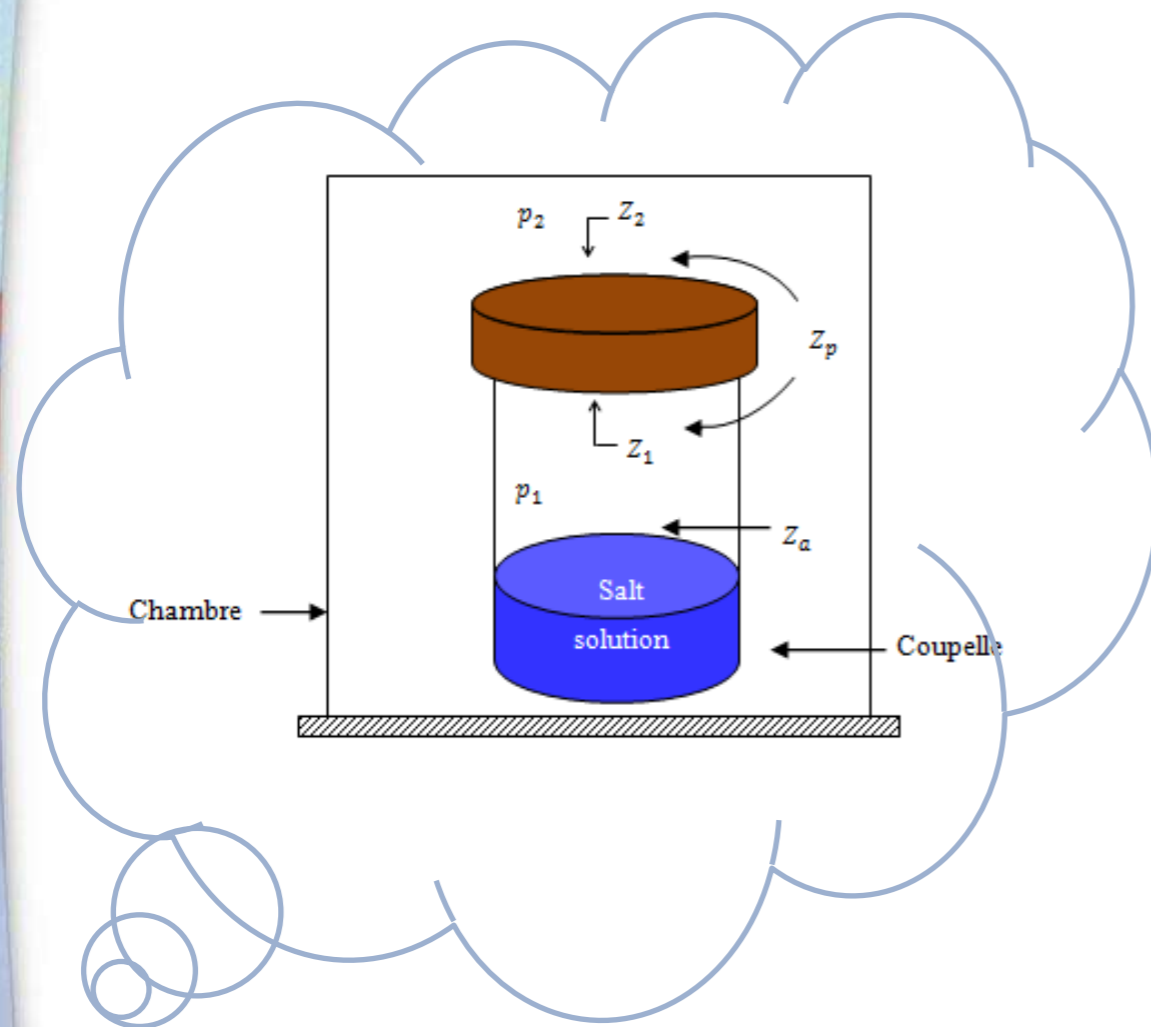
Variation relative de la masse des 3 coupelles au cours du temps pour HR=3% à l'intérieur



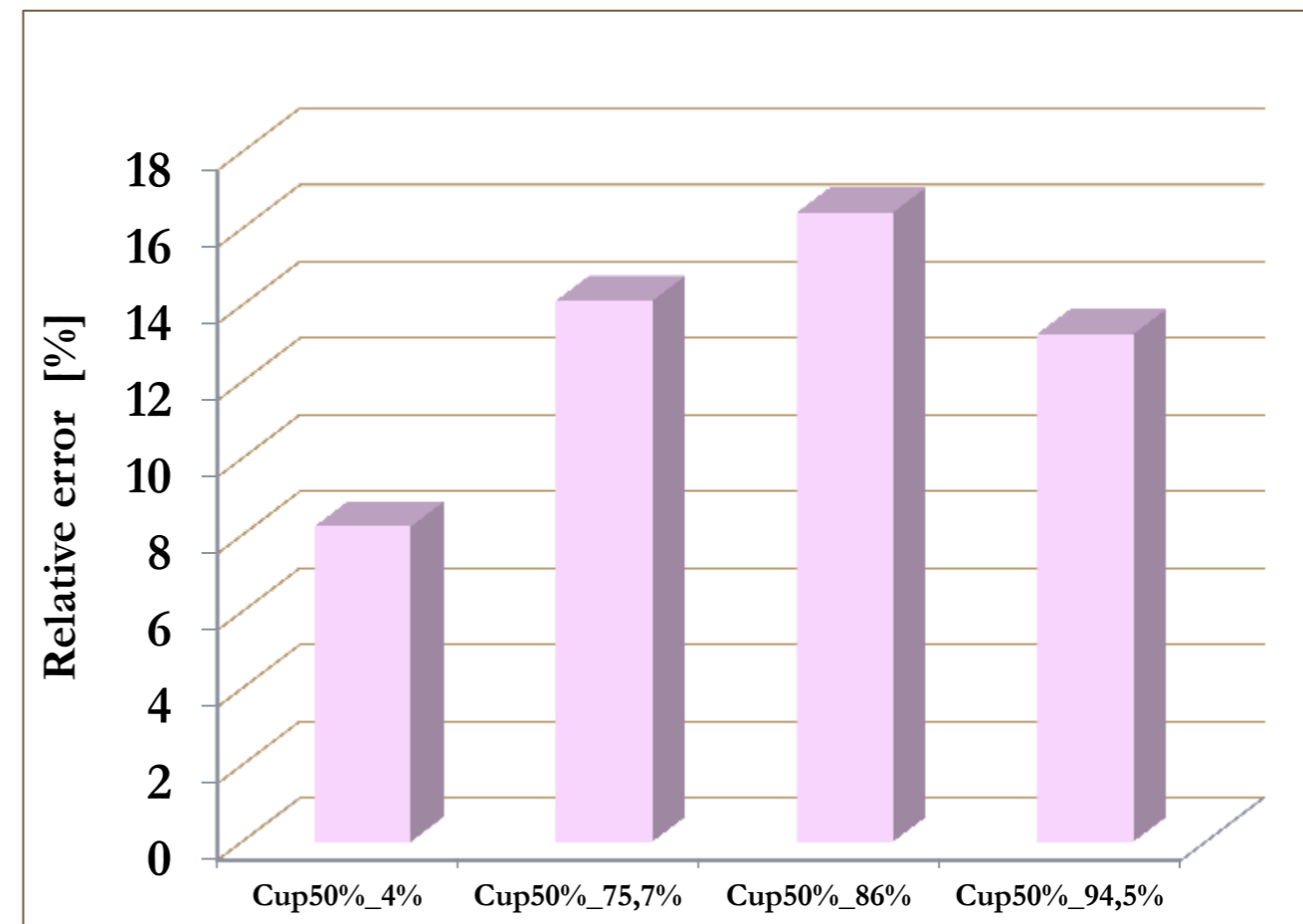
Variation relative de la masse des 3 coupelles au cours du temps pour HR=75.5% à l'intérieur



# Pérmeabilité à la vapeur



Est-il important de prendre en considération la **résistance** à la vapeur ?



Erreur relative due à la non-prise en compte des corrections de résistance à la vapeur pour le calcul de perméabilité (méthode de la coupelle).

# Pouvoir tampon à l'humidité (MBV)

## Exemple de caractérisation du MBV

- La valeur tampon hydrique (Moisture Buffer Value) caractérise la capacité d'un matériau, ou d'un composant multicouches, à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant
- Le principe du protocole d'essai associé est de soumettre les échantillons à des cycles d'humidités relatives journaliers, afin d'être représentatifs des cycles rencontrés dans les bâtiments.

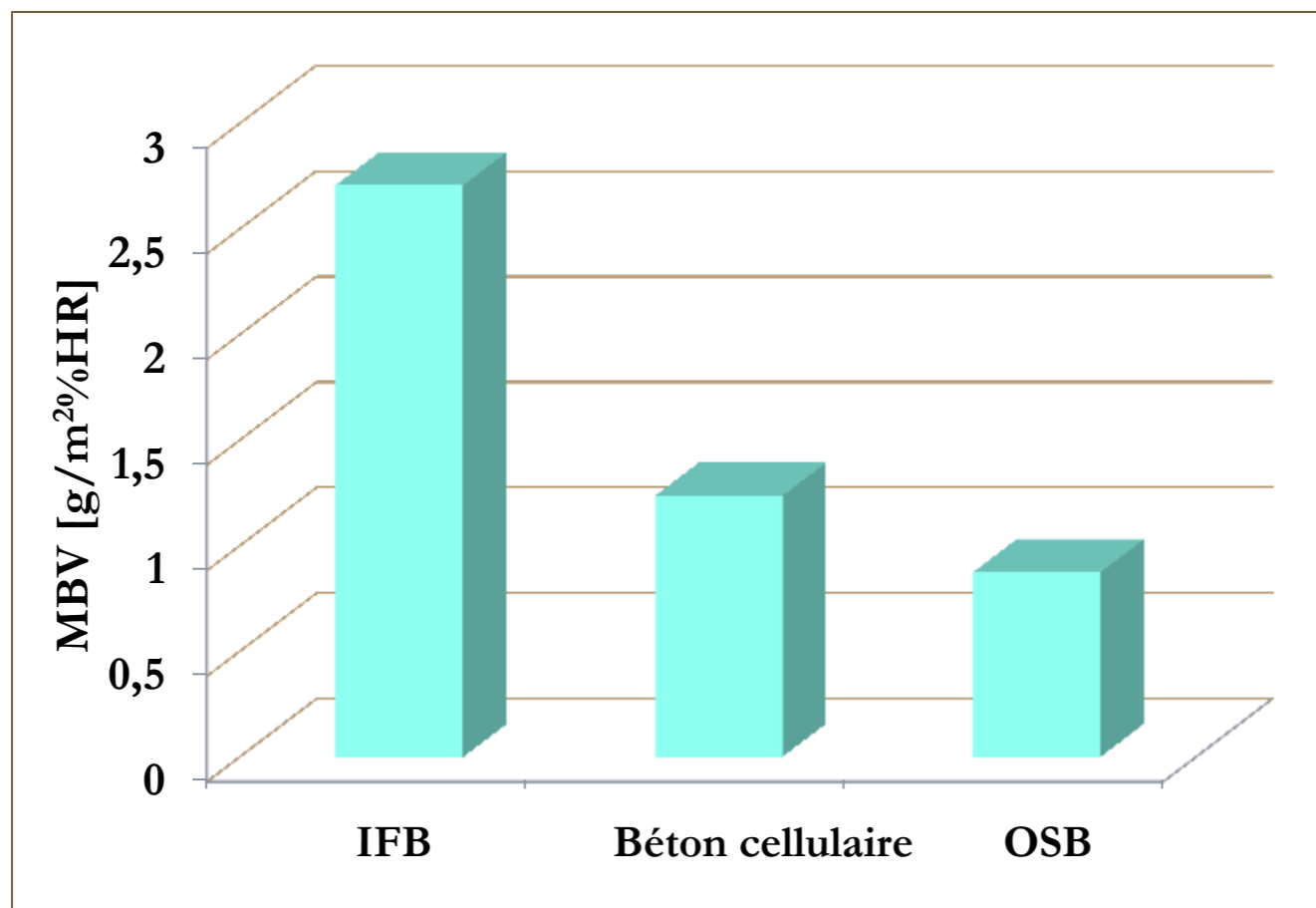


Cette grandeur est utile lors de la conception et de la régulation d'un climat intérieur passif ou lors de l'étude de la résistance d'une construction à la condensation interstitielle

# Pouvoir tampon à l'humidité (MBV)

MBV mesuré suivant le protocole Nordetest (Rode *et al.*, 2007)

$$MBV_{8h} = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{A \cdot (HR_{\text{humidification}} - HR_{\text{séchage}})}$$



Les performances de stockage dépendent du MBV de chaque matériau



Les échantillons sont exposés à des cycles d'humidification séchage pour 8 et 16 heures respectivement



# Pouvoir tampon à l'humidité (MBV)

## Exemple de caractérisation du MBV

- Le principe du protocole d'essai associé est de soumettre les échantillons à des cycles d'humidités relatives journaliers, afin d'être représentatifs des cycles rencontrés dans les bâtiments.

=> Des échantillons en panneaux: d'IBS, de Placo, de Placo hydrofugé, de Polystyrène extrudé, d'Aggloméré



Matériaux	Masse surfacique Ms (kg/m <sup>2</sup> )	Poids maximum Pm (gr)	Surface maximum Sm (cm <sup>2</sup> )	Longueur L (cm)	Largeur L (cm)
IBS	26	200	80.77	8.987	8.987
Paco	13		161.54	12.71	12.71
Placo hydrofuge	16		131.25	11.45	11.45
Aggloméré	10		210	14.49	14.49
Polystyrène extrudé	2.5		840	28.98	28.98

# Matériaux composites

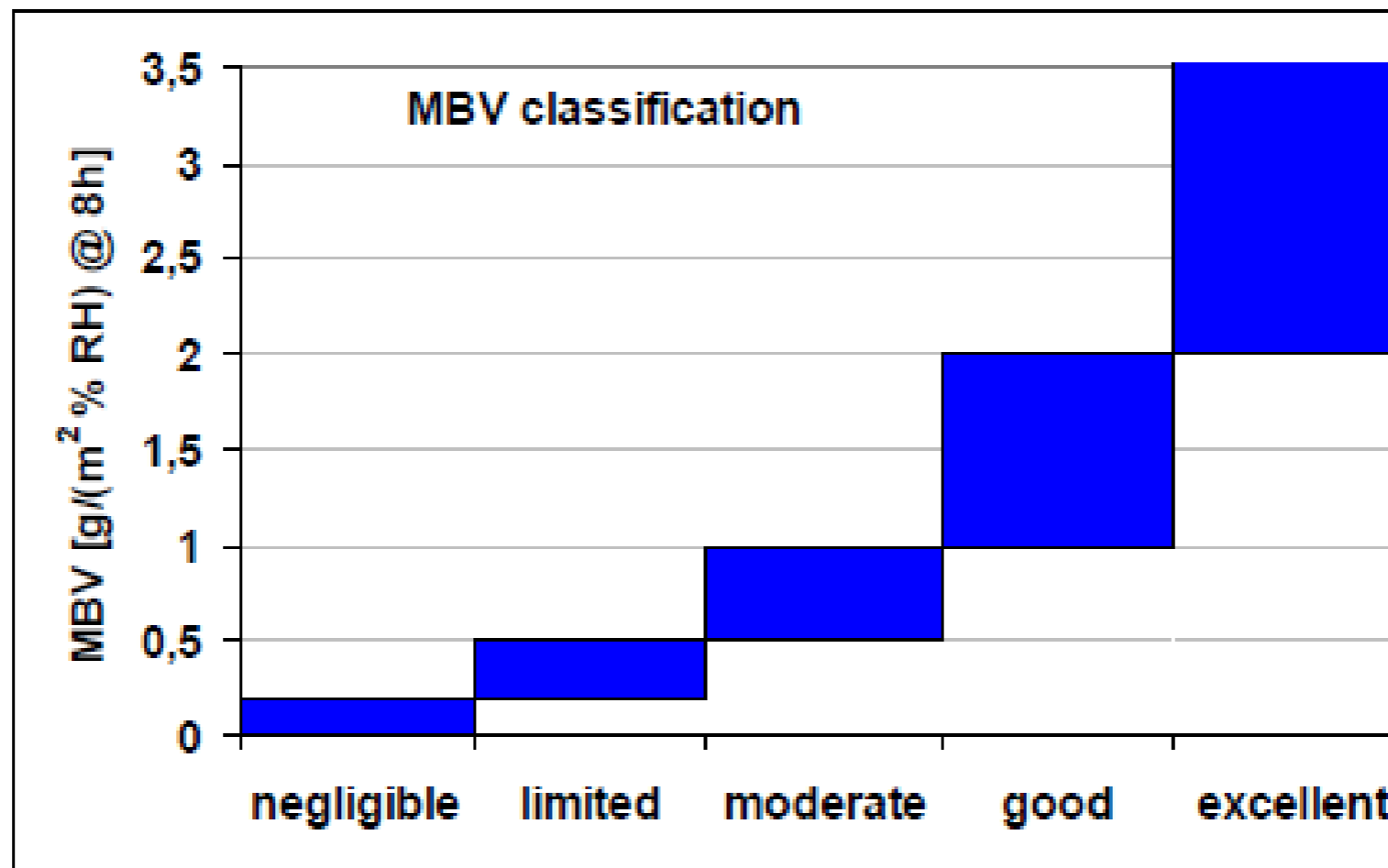
## Résultats MBV

	Polystyrène extrudé	Placo hydrofuge	Placo	IBS	Aggloméré
Surface utile : Su (m <sup>2</sup> )	0,0000664	0,00004225	0,0000403	0,00006	0,000078
MBV 1	0,035857717	0,732600733	0,649887747	2,777777778	2,106227106
MBV 2	0,035857717	0,788954635	0,827129859	3,412698413	2,258852259
MBV 3	0,035857717	0,845308538	0,945291268	3,452380952	2,411477411
MBV 4	0,035857717	0,958016343	0,886210564	3,293650794	2,258852259
MBV 5	0,035857717	0,90166244	0,886210564	3,571428571	2,258852259
MBV moyen	0,035857717	0,845308538	0,838946	3,301587302	2,258852259

# Pouvoir tampon à l'humidité (MBV)

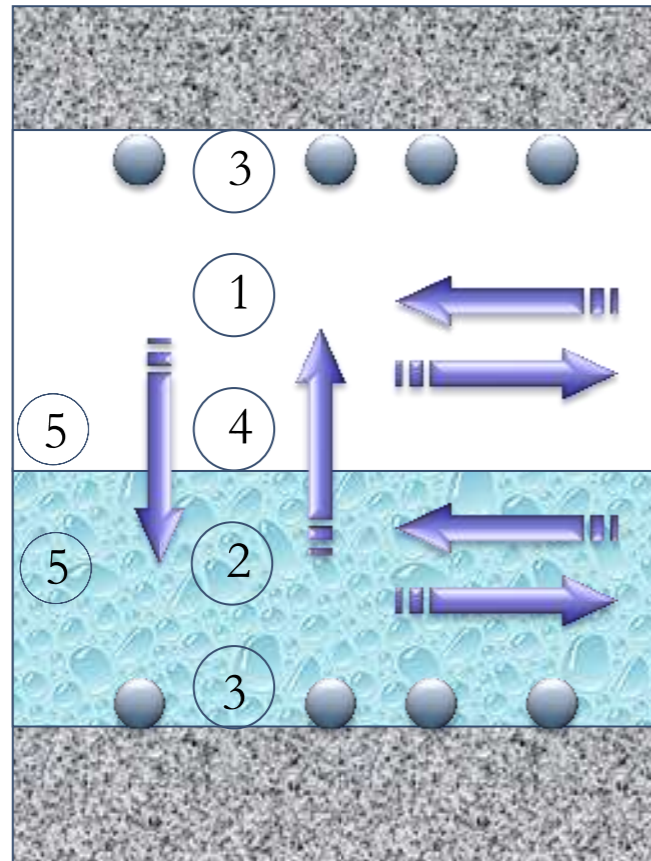
## Classification

MBV <sub>practical class</sub>	Minimum MBV level	Maximum MBV level
	[g/(m <sup>2</sup> % RH) @ 8/16h]	
Negligible	0	0.2
Limited	0.2	0.5
Moderate	0.5	1.0
Good	1.0	2.0
Excellent	2.0	...



La valeur tampon hydrique mesurée sur l'IBS, montre que ce matériau est un excellent régulateur hydrique

# Rappel



Solid

Gas mixture:  
Air + water vapor

Liquid water

Solid

1. Water vapor diffusion
2. Liquid water motion
3. Sorption / desorption
4. Evaporation / Condensation
5. Infiltration



Le transfert d'humidité dans les matériaux biosourcés est **multi-phase**

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

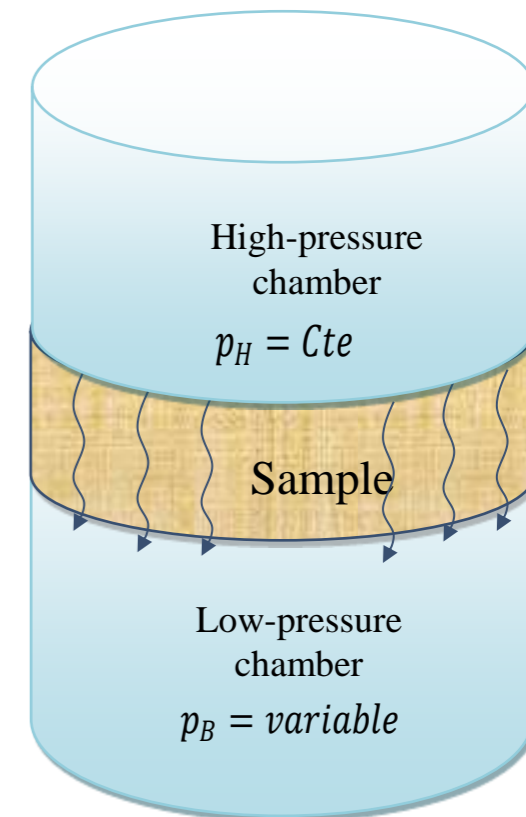
## ↳ Perméabilité au gaz

- La perméabilité à l'air de l'enveloppe est un critère de plus en plus pris en compte pour caractériser sa **performance énergétique**
- Loi de Darcy pour un fluide incompressible newtonien :

$$V = \frac{K}{\mu} \text{grad}P$$

- Cas d'un fluide compressible (gaz) :

$$K_A = \frac{2QP_B L \mu}{S (P_H^2 - P_B^2)}$$



$$p_H \gg p_B$$

Échantillon de section 'S' et d'épaisseur 'L'

# Perméabilité au gaz

La perméabilité intrinsèque est définie selon la loi de Darcy

$$V = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta p_a}{L}$$

Gaz utilisé obéit à la loi des gaz parfaits

=> débit massique traversant l'échantillon :

$$Q_m = -\frac{K}{\mu} \frac{M}{RT} p_A \frac{\partial p}{\partial x} S$$

Le bilan massique dans la chambre basse :  $V_B = \frac{dp_B}{dt} = \frac{RT}{M} Q_m$

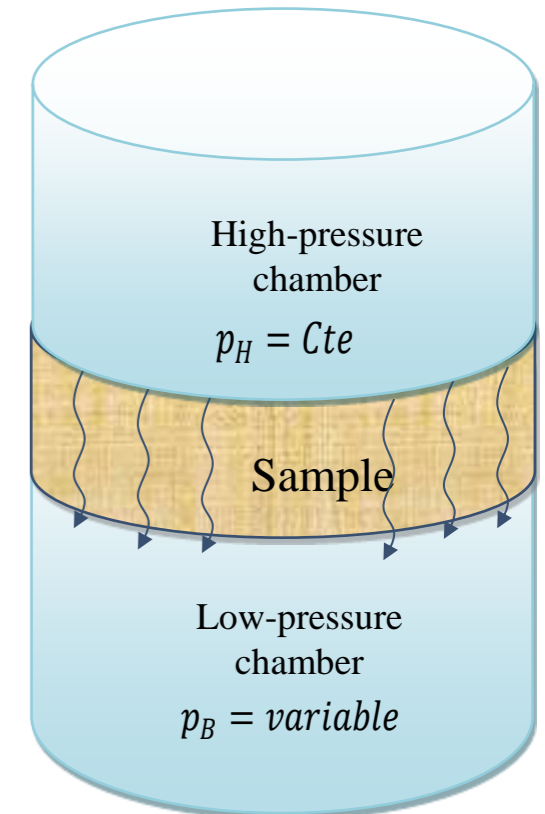
=> la chambre basse évolue linéairement en fonction du temps, ce qui signifie que le débit massique est constant pendant cette phase

$$p_H^2 - p_B^2 = \frac{2\mu RT Q_m L}{MK_A S}$$

combinaison des deux dernières équations

=> perméabilité apparente

$$K = \frac{2\mu L}{p_H^2 - p_B^2} V_B \frac{dp_B}{dt}$$



$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

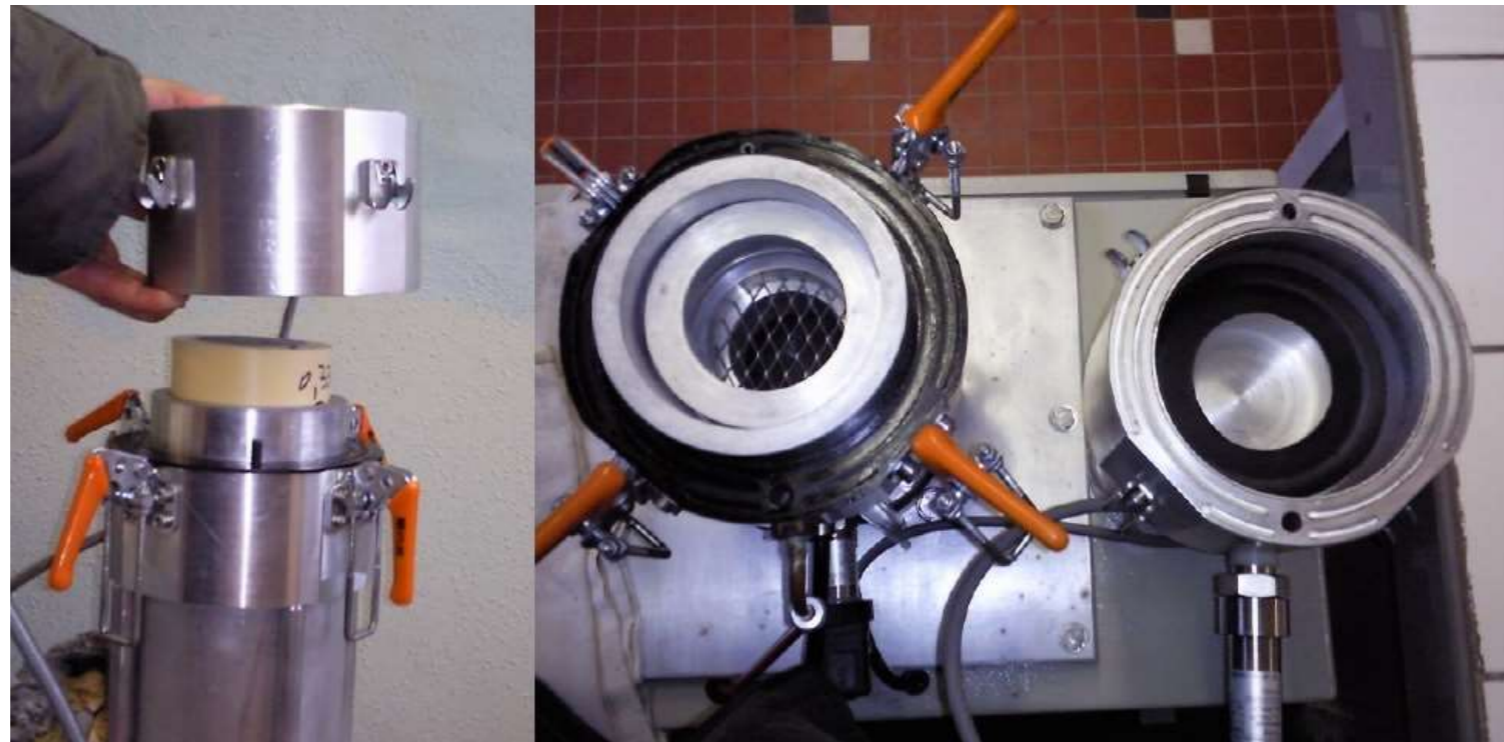
$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

## ↳ Perméabilité au gaz

- Appareil : Perméamètre Thermicar

=> Méthode instationnaire



**Principe** : Imposer une pression haute constante à l'amont d'un échantillon cylindrique (chambre haute) et à mesurer l'évolution de la pression à l'aval (chambre basse, dans laquelle un vide primaire a été créé au préalable)

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

## Perméabilité au gaz

### Principe de mesure de la perméabilité (régime transitoire)

Phase de **stabilisation** des pressions :

$$P_H = \{150, 400\} \text{ kPa}$$

$$P_b = 8,5 \text{ kPa (« vide »)}$$

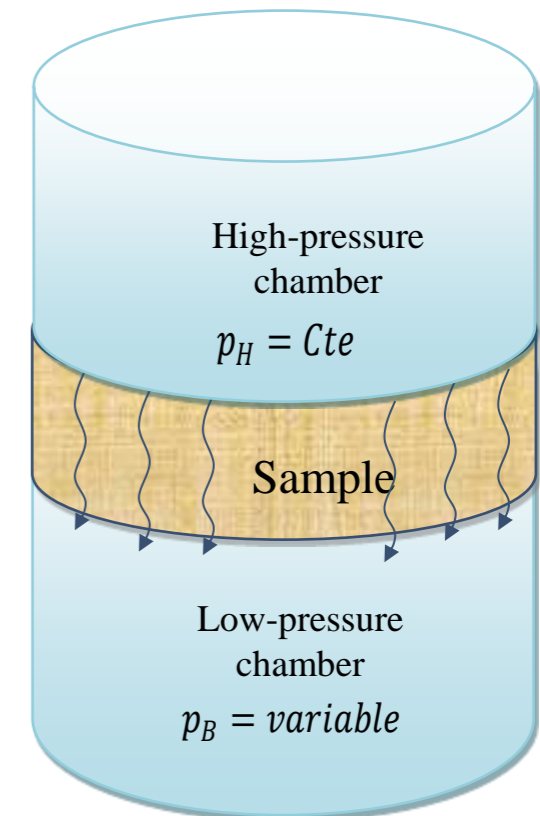
Phase de mesure :

$P_H$  est maintenue constante

Mesure de l'évolution de la pression basse  $P_b$  en fonction du temps



la différence de pression entre l'amont et l'aval reste suffisamment grande pour que la variation de pression basse soit constante dans le temps (régime quasi permanent)



65mm de diamètre et de 50mm de hauteur

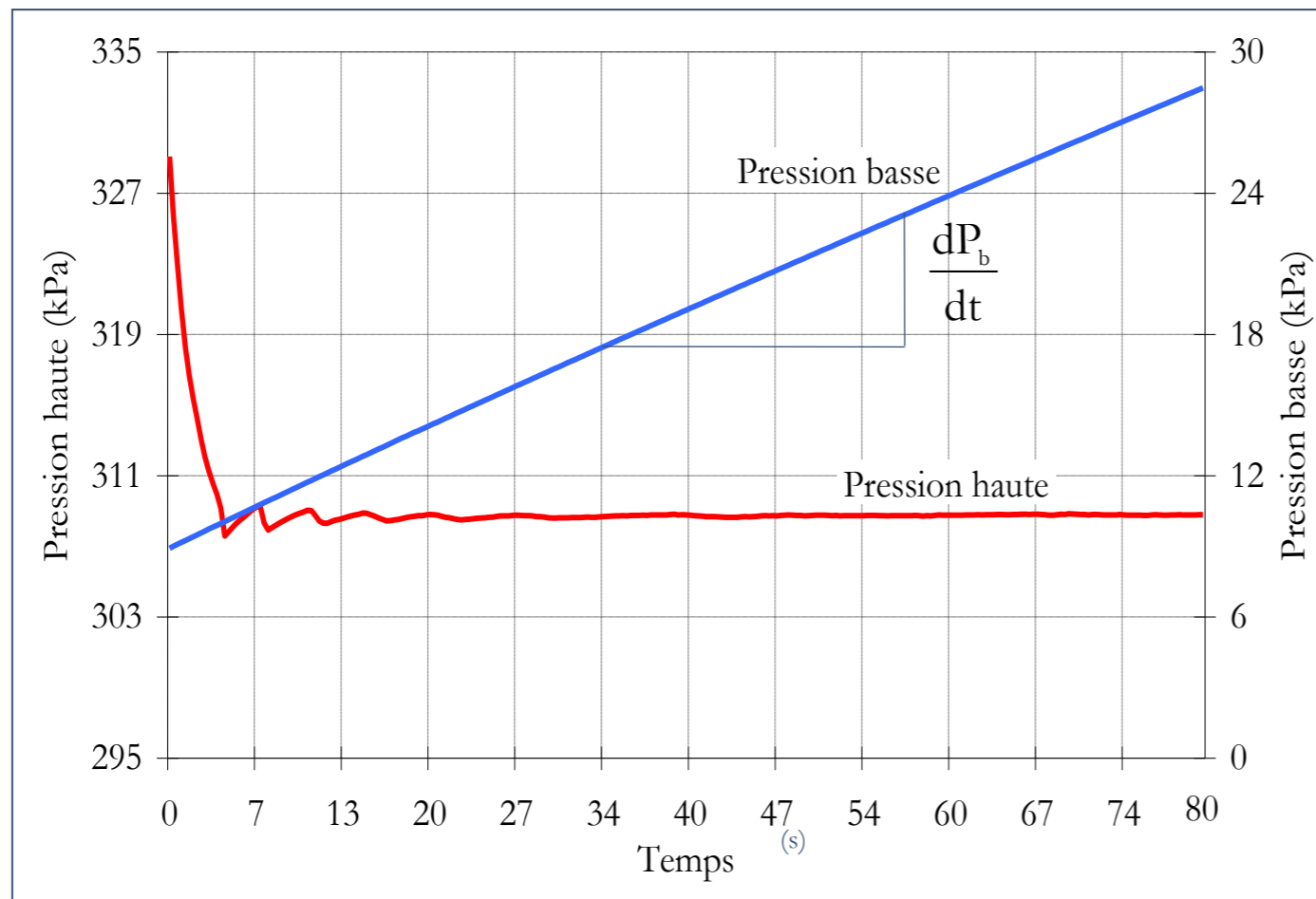


$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

## ↳ Perméabilité au gaz



$$K = \frac{2 \mu L}{[P_H^2 - P_b^2]} S V_b \frac{dP_b}{dt}$$

$V_b$  : volume chambre basse

$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

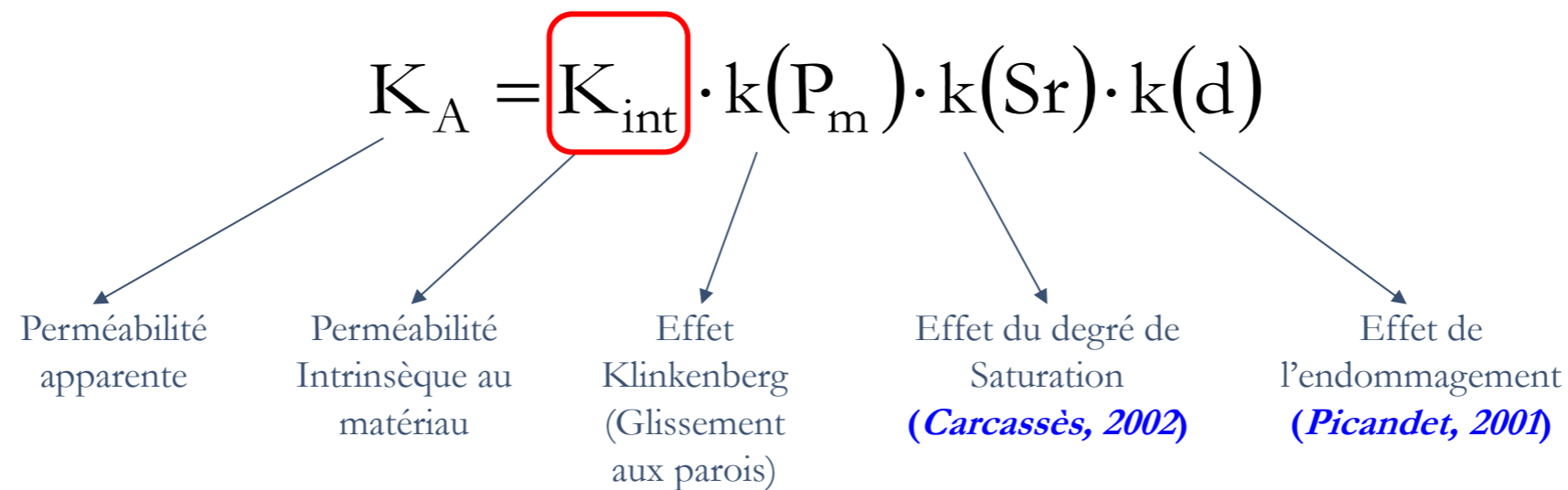
$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

## Perméabilité au gaz

- une définition générale de la perméabilité apparente

- Dans la littérature :



$K_{\text{int}}$  comme indicateur de durabilité

## Perméabilité au gaz

- Approche de Klinkenberg (régime laminaire) (**LGPM**)

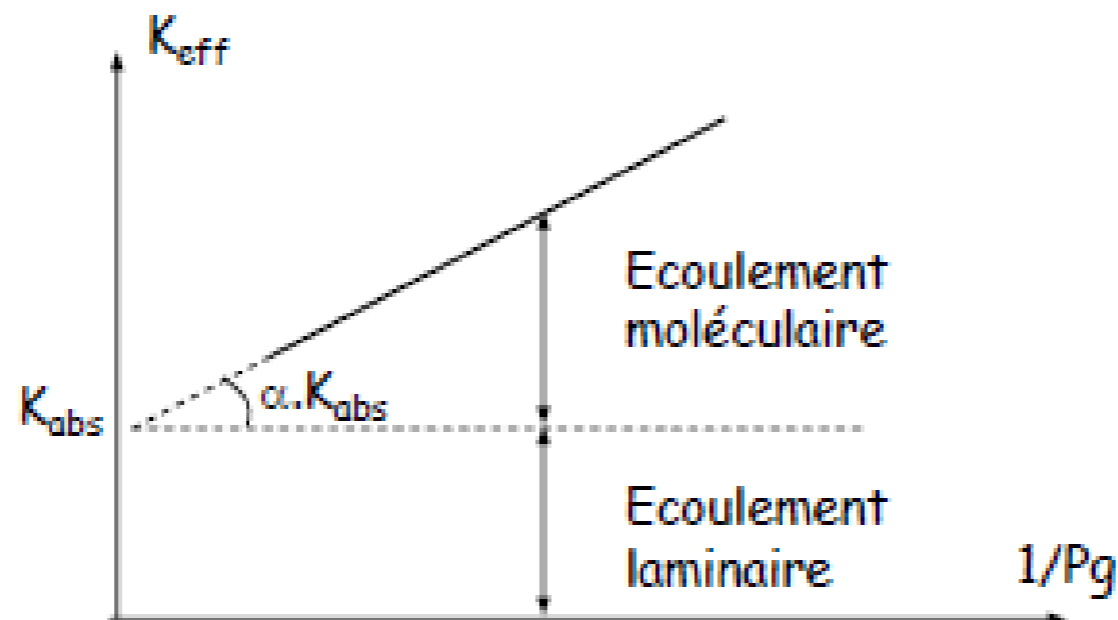
$K_{eff}$  est dépend de la pression appliquée car celle-ci agit sur le libre parcours moyen et donc sur les interactions entre les particules et les parois.

Pour prendre en compte cet effet de pression, Klinkenberg a introduit le facteur  $\beta$  dit facteur de Klinkenberg, tel que

$$K_{eff} = K_{abs} \cdot K_{rel} \cdot \beta(P_g S_r)$$

=> cette dépendance à la pression étant en général linéaire

$$\beta = \left( 1 + \frac{\alpha}{P_g} \right)$$



Détermination de la perméabilité absolue

# Perméabilité au gaz



## Analyse critique de l'essai

### • Avantages :

- Mesure rapide (quelques minutes) ;
- Répétabilité des mesures (même échantillon), erreur  $< 1\%$  ;
- Reproductibilité (échantillons de même composition) : écart type  $< 20\%$

### • Inconvénients :

- Gaz = Air comprimé (nécessite un traitement préalable) ;
- $P_b = ?$  Peu d'influence (l'erreur sur  $K_A$  due à  $P_b < 1\%$ )
- Pour des pressions hautes très élevées ( $> 350$  kPa), l'approche de Klinkenberg n'est plus applicable

## Perméabilité au gaz

- Saturation en eau sous vide pendant 72h
  - Etanchement du pourtour du corps d'épreuve afin d'assurer un écoulement unidirectionnel du gaz pendant l'essai
    - Séchage en étuve ventilée à  $T = 80 \pm 5^\circ$
  - Séchage en étuve ventilée à  $T = 105 \pm 5^\circ$  C jusqu'à stabilisation de la masse
  - Placer le corps d'épreuve dans la cellule et gonfler la chambre à air à une pression mini de 8 bars
    - Etablir la pression de gaz à 1 bar
- => Choisir le débitmètre compatible avec le mode opératoire et mesurer le temps de passage de la bulle de savon

La perméabilité ( $K_{gaz}$ ) est alors exprimée en fonction du taux de saturation moyen de l'éprouvette correspondant à chaque étape du pré-conditionnement



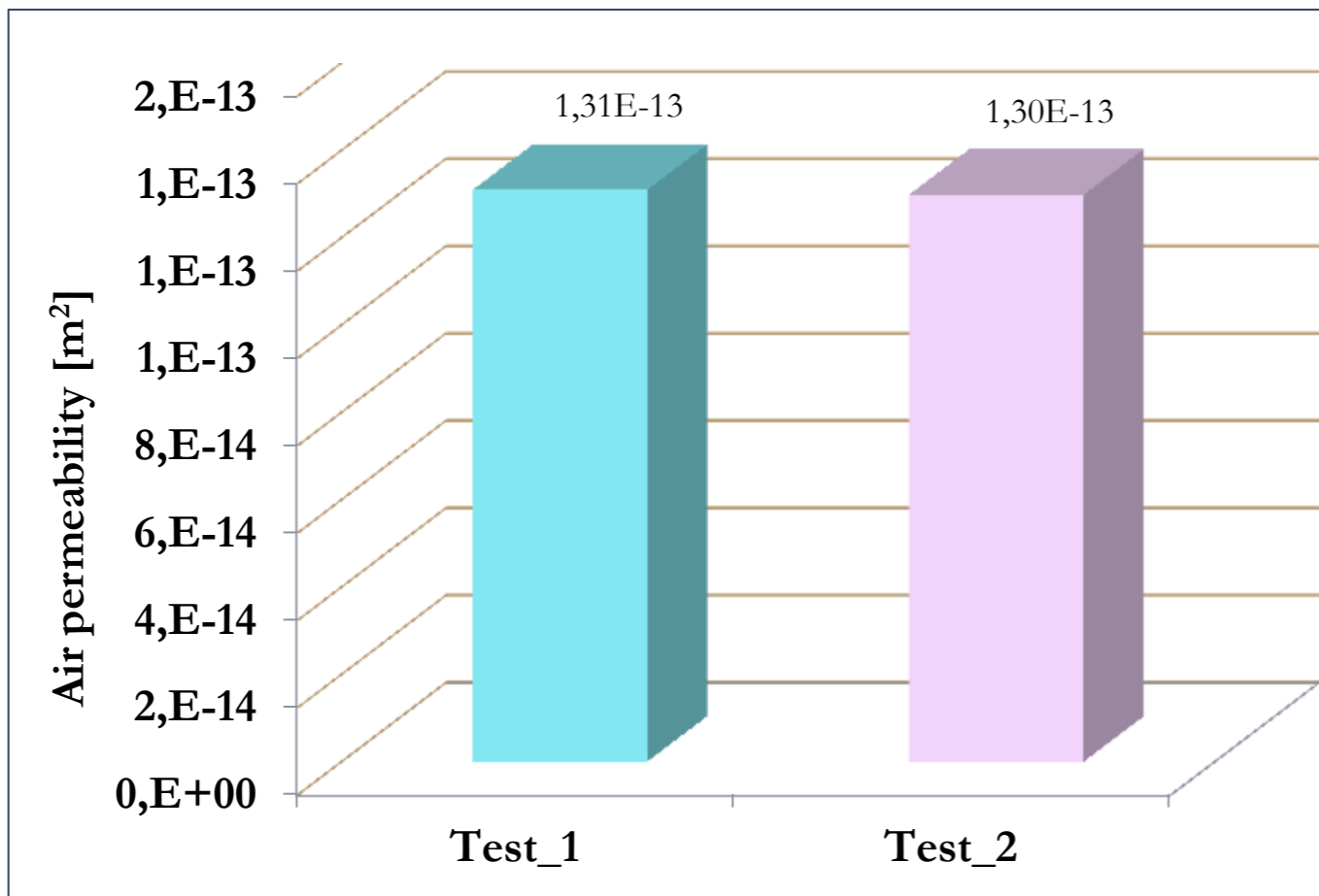
$$c_m \frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[d_m (\nabla \omega + \varepsilon \nabla T + K \nabla P)]$$

$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

## ↳ Perméabilité au gaz

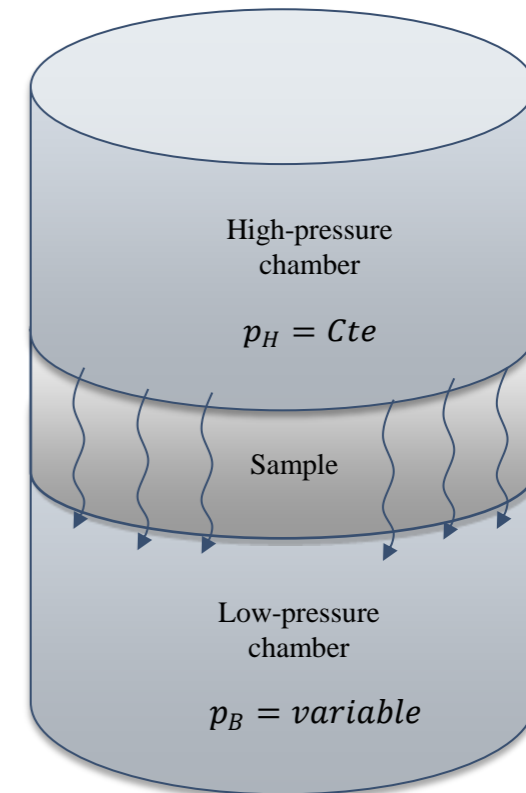
$$K_A = \frac{2 \mu L}{p_H^2 - p_B^2} V_B \frac{dp_B}{dt}$$



Perméabilité du béton cellulaire (matériau hygroscopique)



## Non-stationary method



$$p_H \gg p_B$$

## Perméabilité au gaz

Méthode LCPC n° 58, Projet de norme nationale en cours de finalisation

### Principe:

Soumettre le corps d'épreuve à un gradient de pression de gaz constant avec l'appareil **CEMBUREAU**

La perméabilité est alors déterminée à partir de la mesure du flux de gaz le traversant

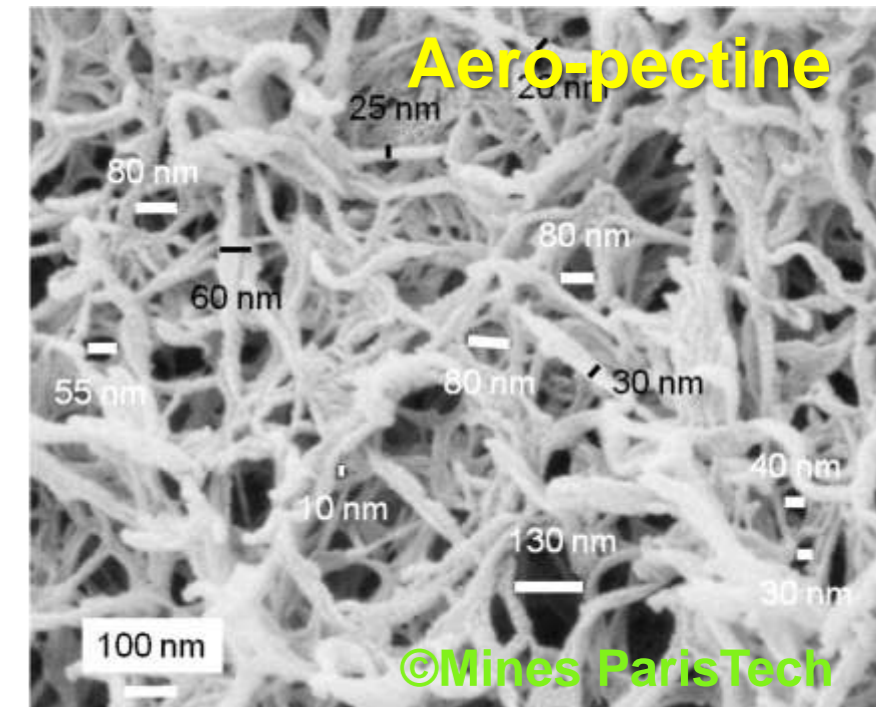
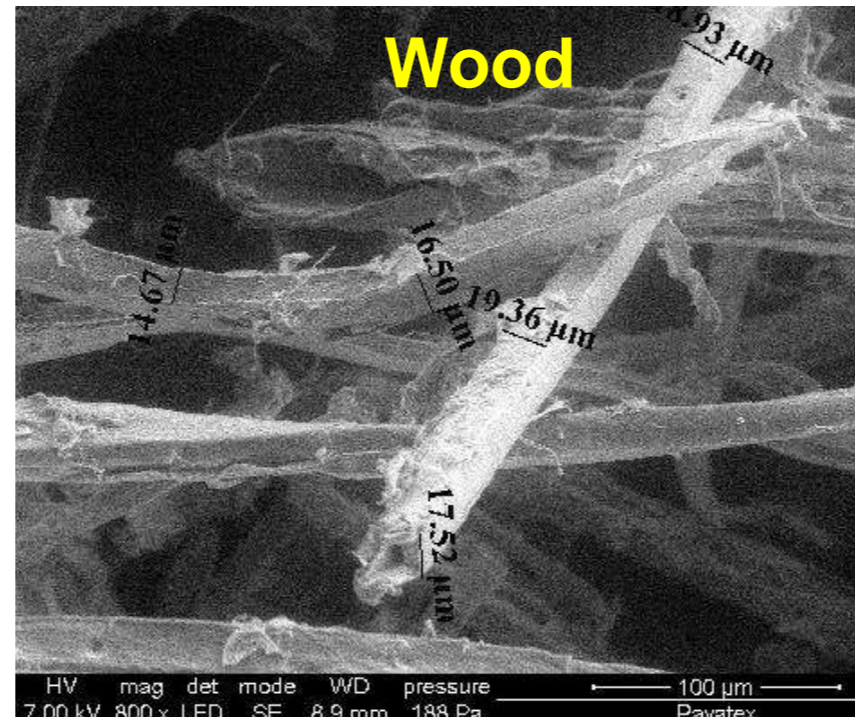
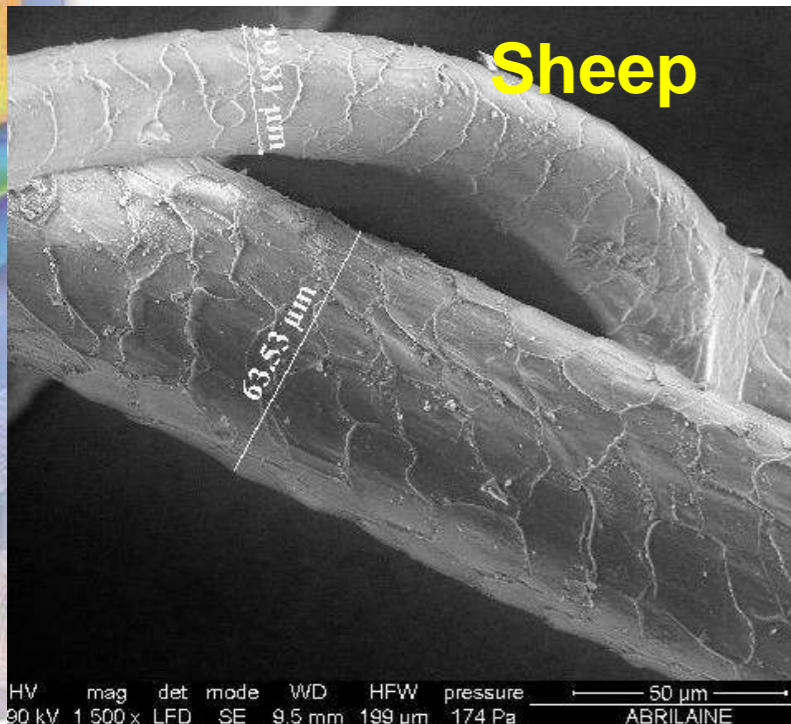
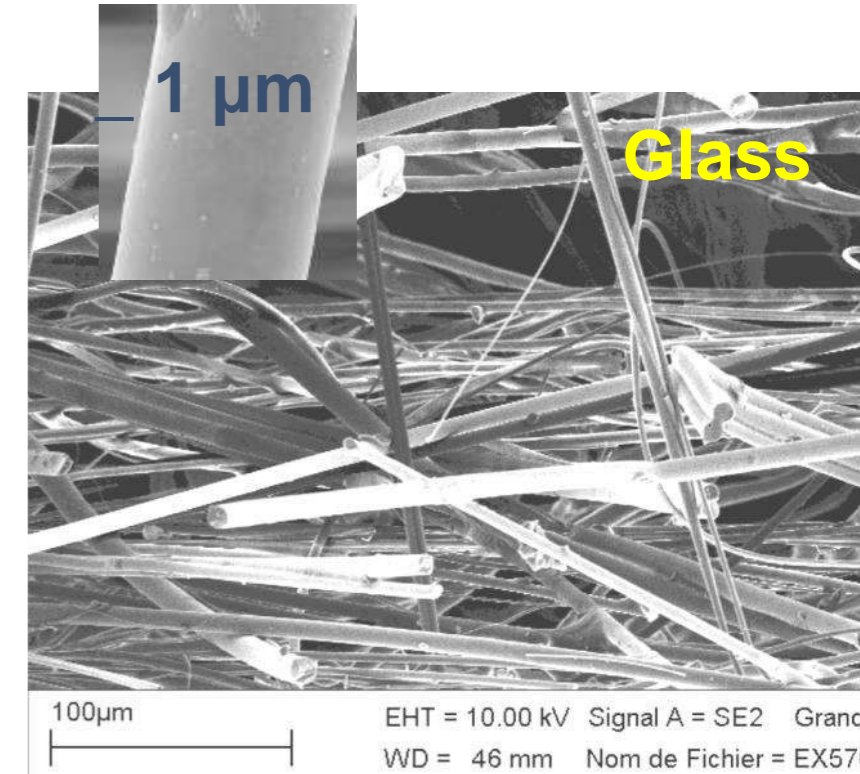
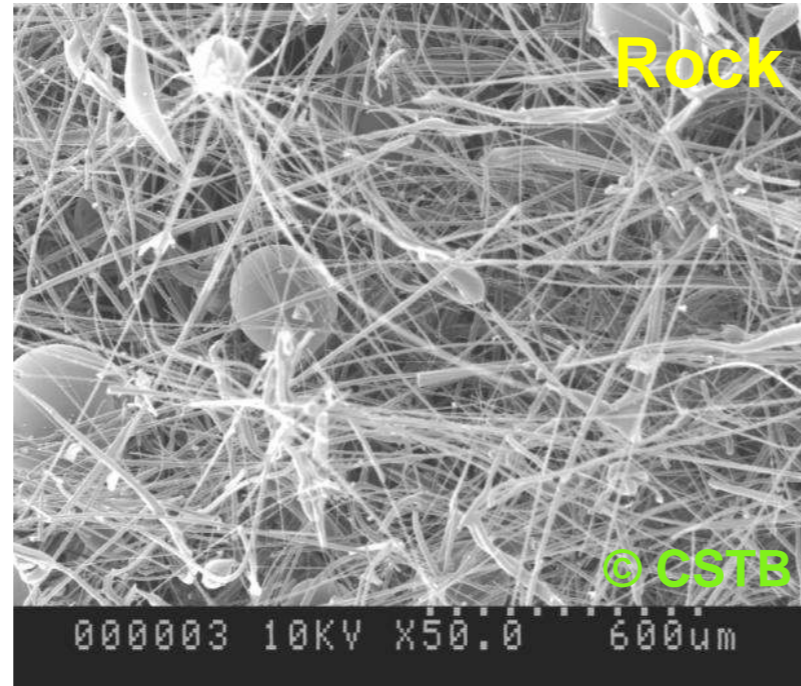


# Conductivité thermique



## Morphologie très poreuse & fibreuse

- Réseau continu
- Réseau discontinu

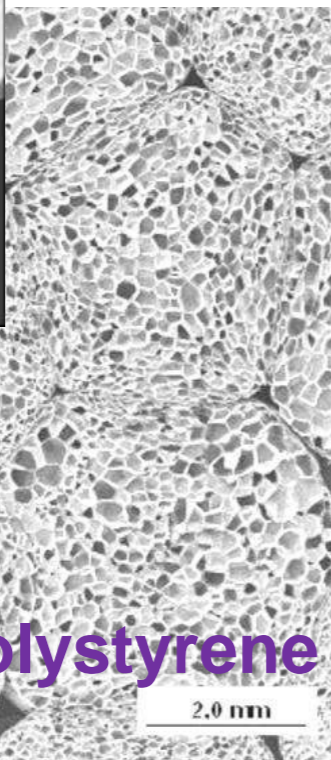
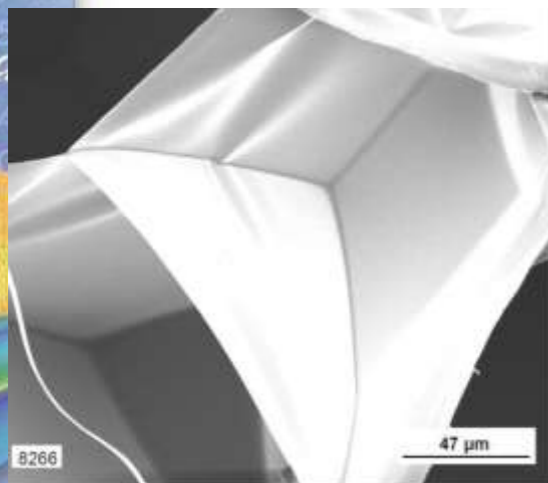
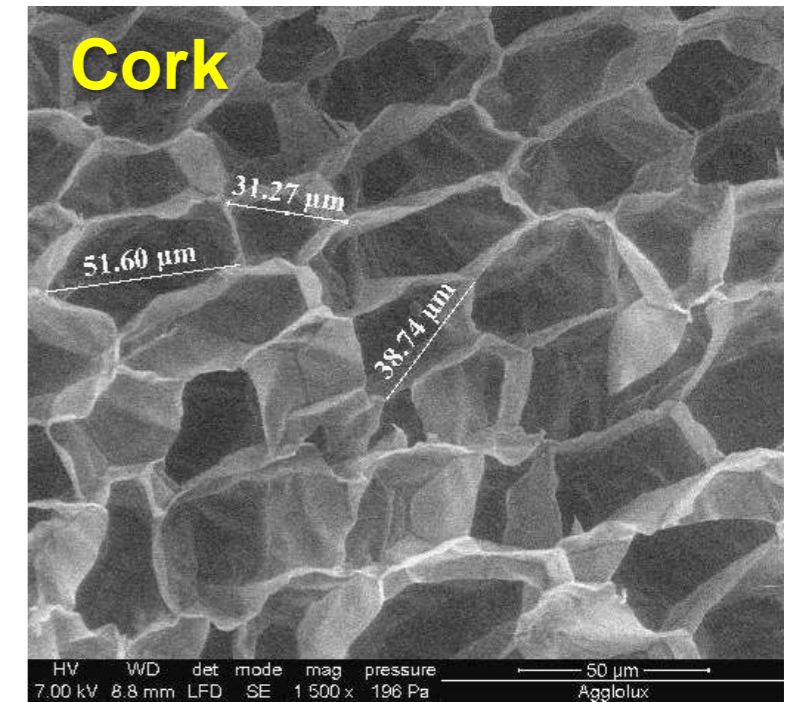




# Conductivité thermique

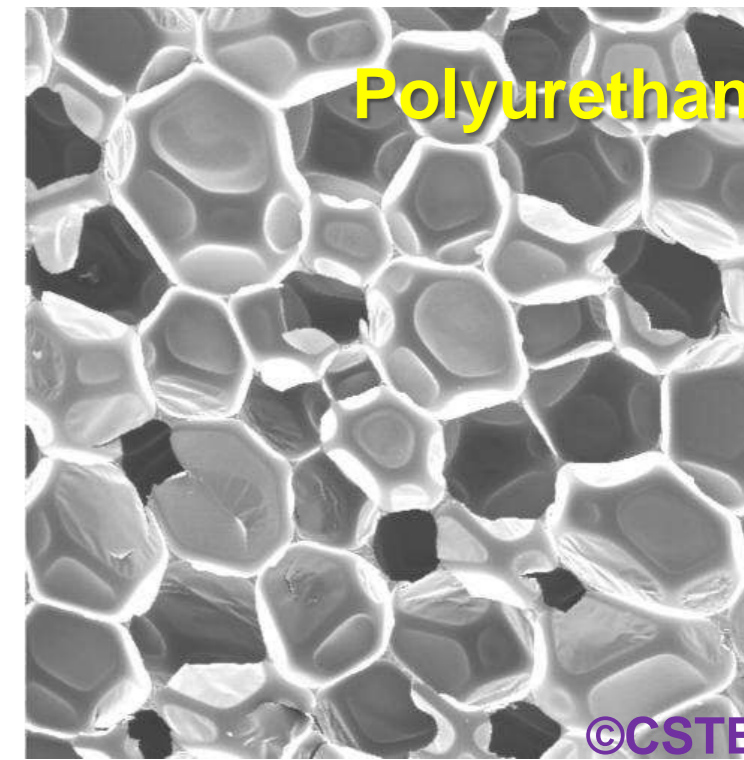


Morphologie très  
poreuse & cellulaire  
fermée



**Expanded Polystyrene**

[Bernard YRIEIX]



# Conductivité thermique

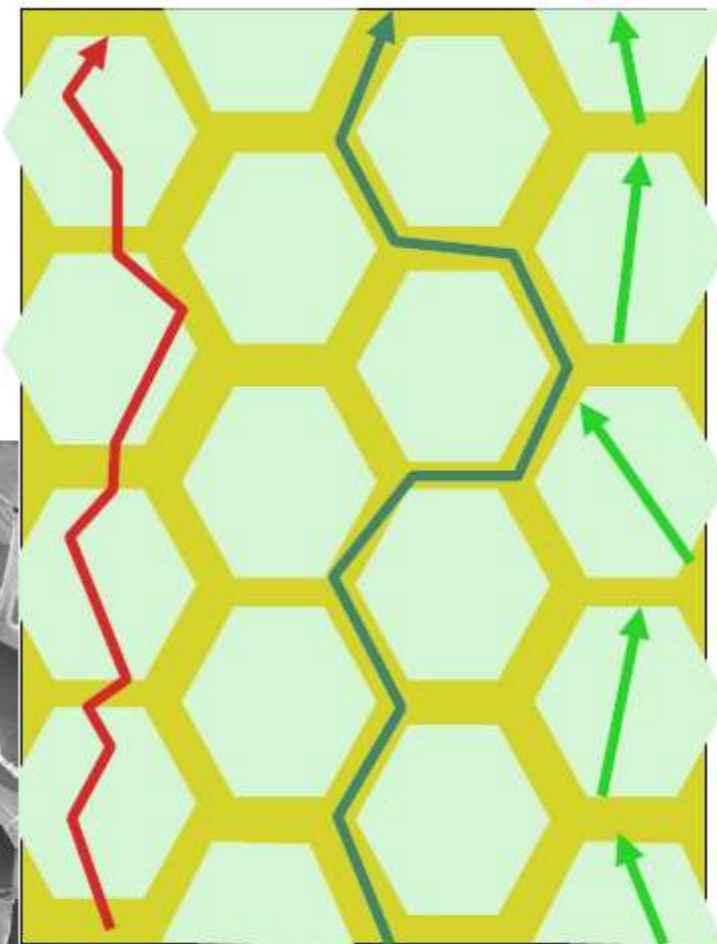
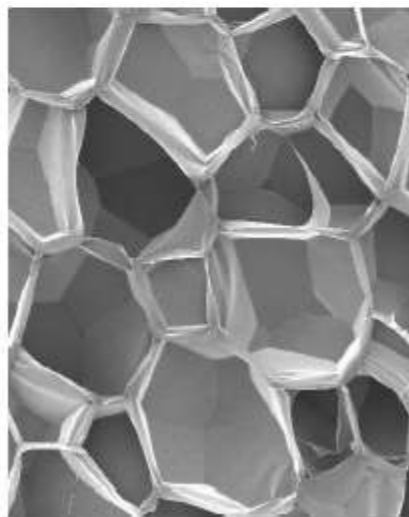
## Modèle flux parallèle

Equivalent conductivity = Inside radiation + Conduction

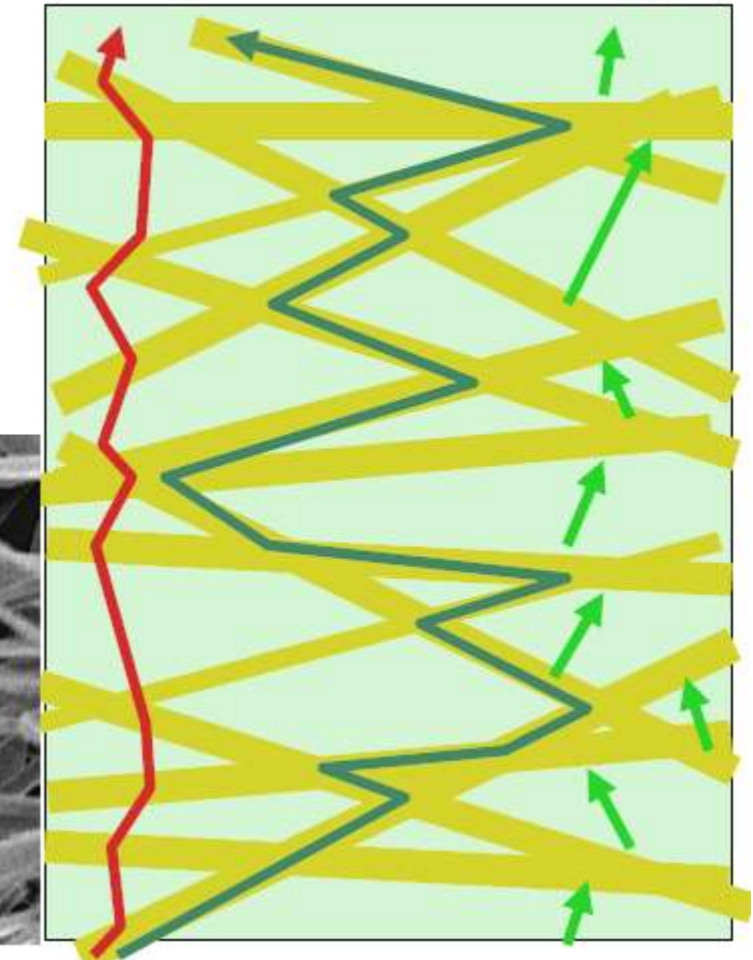
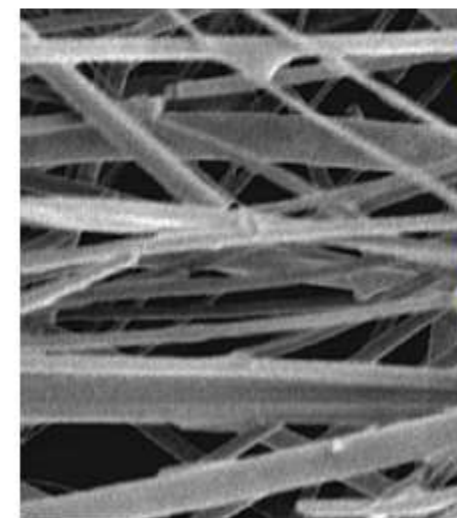
$$\lambda_{equ} = \lambda_r + \lambda_c^* = \lambda_r + \lambda_{cs}^* + \lambda_{cg}^*$$

$\lambda_r^*$        $\lambda_{cs}^*$     $\lambda_{cg}^*$                        $\lambda_r^*$        $\lambda_{cs}^*$     $\lambda_{cg}^*$

Cellular material



Fibrous material

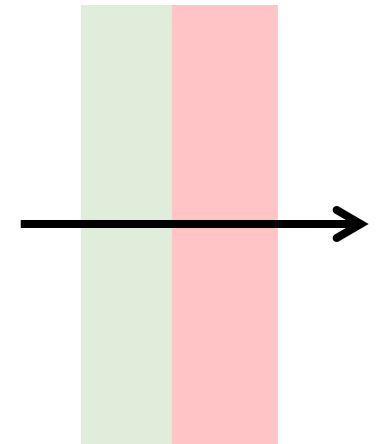


# Conductivité thermique

## Equivalent conductivity $\lambda_{equ}$

=> Lower limit; Series model

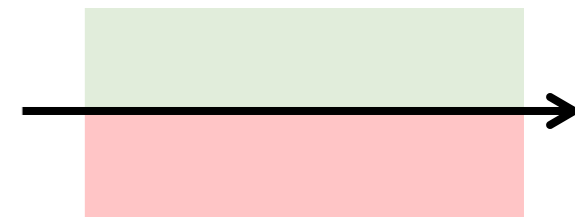
$$\lambda_{serie} = \frac{1}{\frac{p_1}{\lambda_1} + \frac{p_2}{\lambda_2}}$$



=> Upper limit; Parallel model

Layers

$$\lambda_{Parallel} = p_1 \cdot \lambda_1 + p_2 \cdot \lambda_2$$



Heterogeneity and tortuosity (Z)

$$\lambda_{equ} = \lambda_2 + (\lambda_1 - \lambda_2) \frac{p_1}{Z}$$



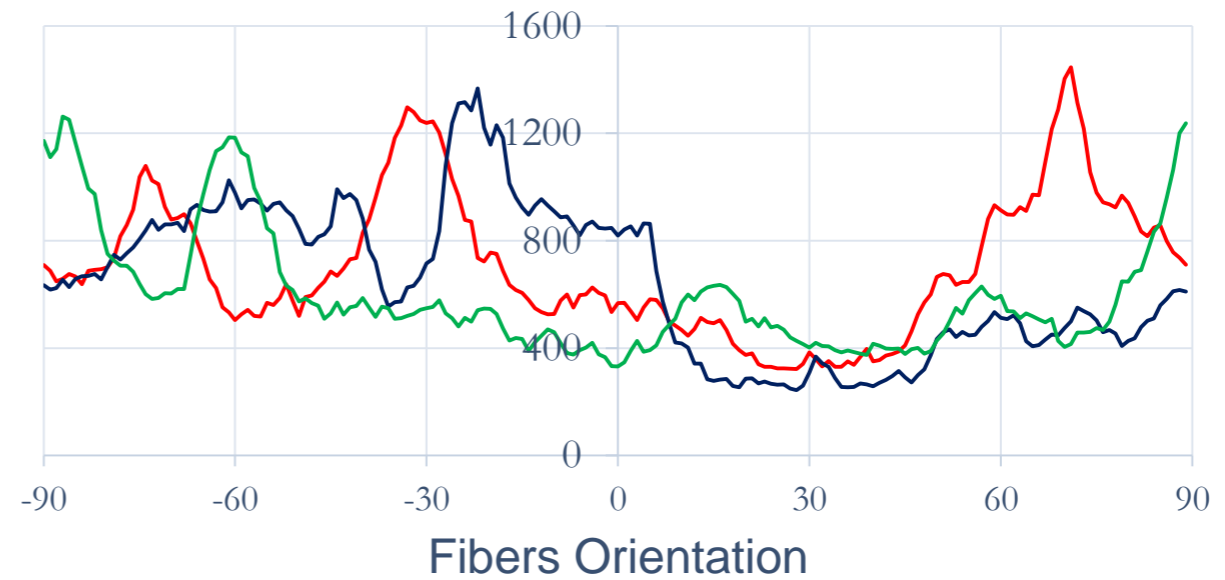
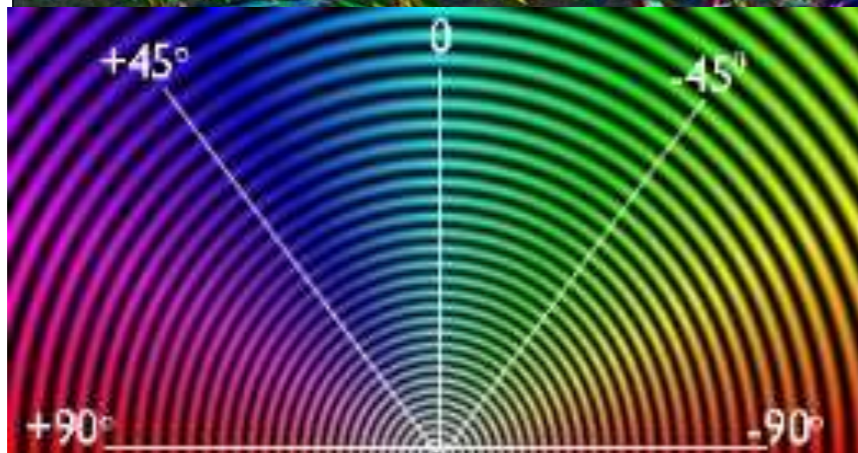
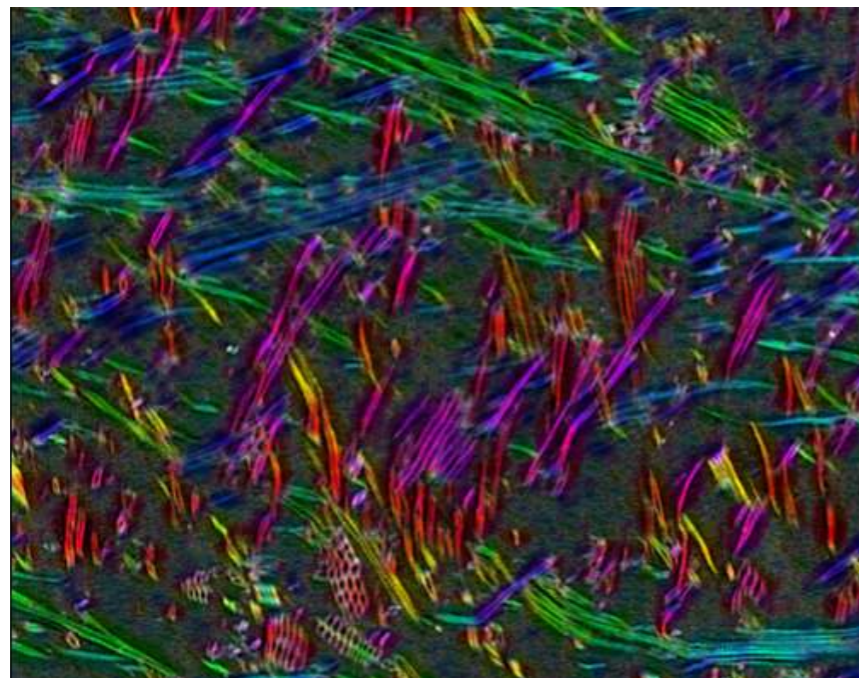
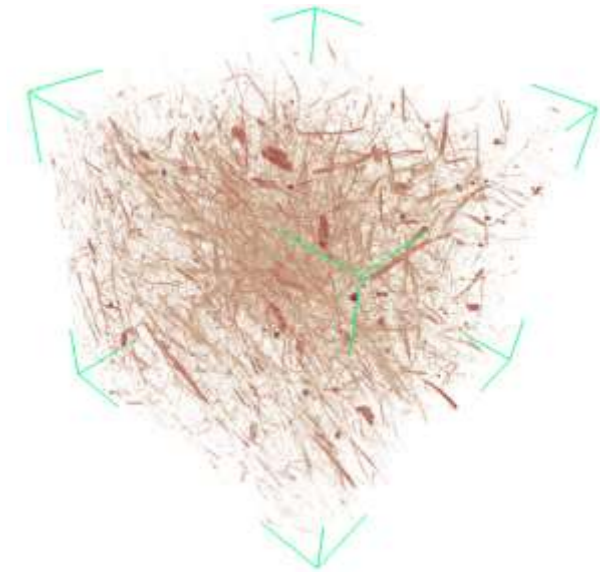
=> D'autres modèles d'homogénéisation

Hashin Shtrickman, De Vries model ....

# Conductivité thermique

Il y a également d'autres modèles spécifiques pour les milieux fibreux

Ne pas oublié la vraie vie est beaucoup plus compliqué !!



# Conductivité thermique

## Définition normalisée de l'isolant thermique

**C'est l'air (le gaz) qui isole !**

**L'épaisseur est essentielle !**

- La matière solide (PSE, verre, fibres, ...) sert à :
  - => empêcher la convection
  - => limiter le rayonnement



- Sans remplacer l'air, on ne peut que s'approcher de sa conductivité
- Les isolants à base d'air sont équivalents à 20 %



Attention aux arnaques !!!

(« produits minces réfléchissants » du bâtiment, vêtements techniques, ...)



Attention à l'humidité et la gestion de la vapeur !!!

(Pare vapeur, ventilation, étanchéité, association de matériaux)

# Conductivité thermique

=> mesure toujours indirecte

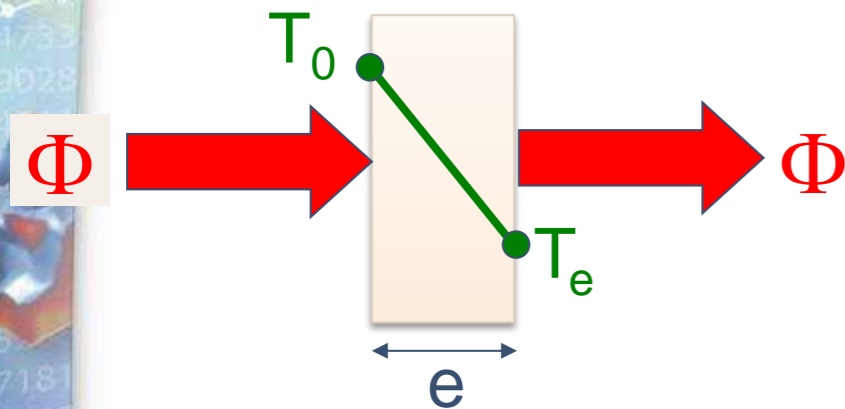
## Méthode 'générique'

## Paramètre majeur identifié

## Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$

I - Stationnaire, milieu d'épaisseur finie

## Résistance thermique (K/W)



$$R_{th} = \frac{e}{k} = \frac{T_0 - T_e}{\Phi}$$

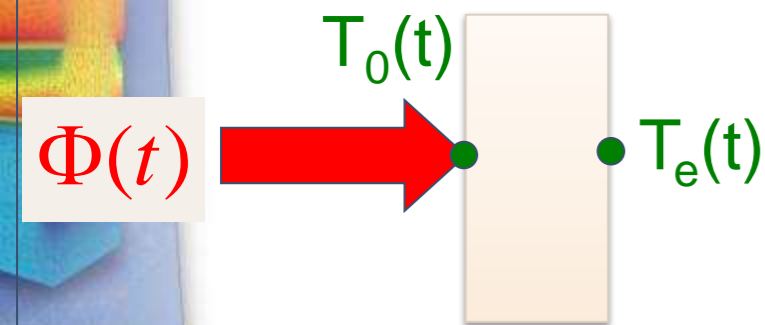
$k$  = conductivité thermique en  $Wm^{-1}K^{-1}$

- Épaisseur  $e$

$$k = \frac{e}{R_{th}}$$

II - Instationnaire, milieu d'épaisseur finie

## Temps diffusif (s)



$$t_{diff} = \frac{e^2}{a}$$

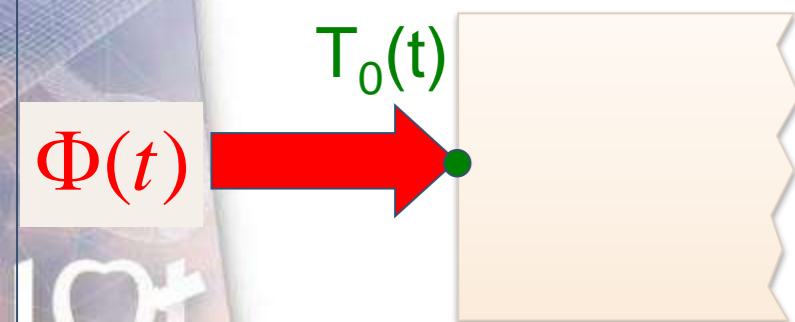
$$\text{avec } a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \left( \frac{k}{b} \right)^2$$

$a$  = diffusivité thermique en  $m^2/s$

- Épaisseur  $e$   
- Capacité calorifique volumique  $\rho \cdot C_p$  ou effusivité thermique  $b$

$$k = \frac{\rho \cdot C_p}{t_{diff}} e^2 \quad \text{ou} \quad k = \sqrt{\frac{b}{t_{diff}}} e$$

III - Instationnaire, milieu semi-infini



$$\beta = \frac{\Phi}{b} \quad (m^2 K s^{-1/2})$$

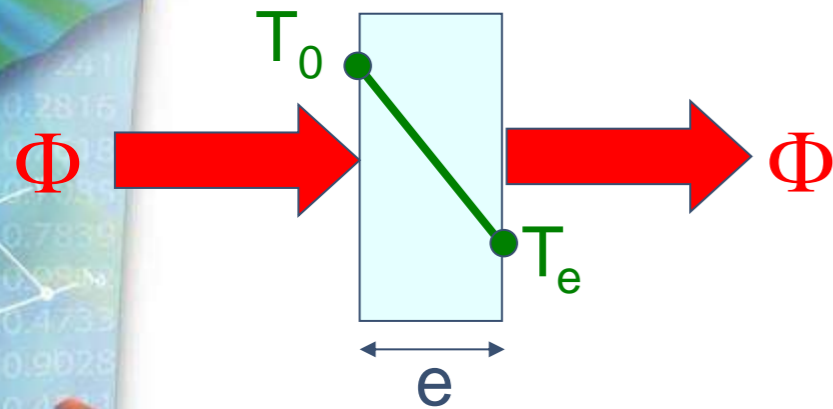
$$\text{avec } b = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{k}{\sqrt{a}}$$

$b$  = effusivité thermique en  $Wm^{-2}K^{-1}s^{1/2}$

$\rho \cdot C_p$  - Capacité calorifique  
- Flux  $\Phi(t)$

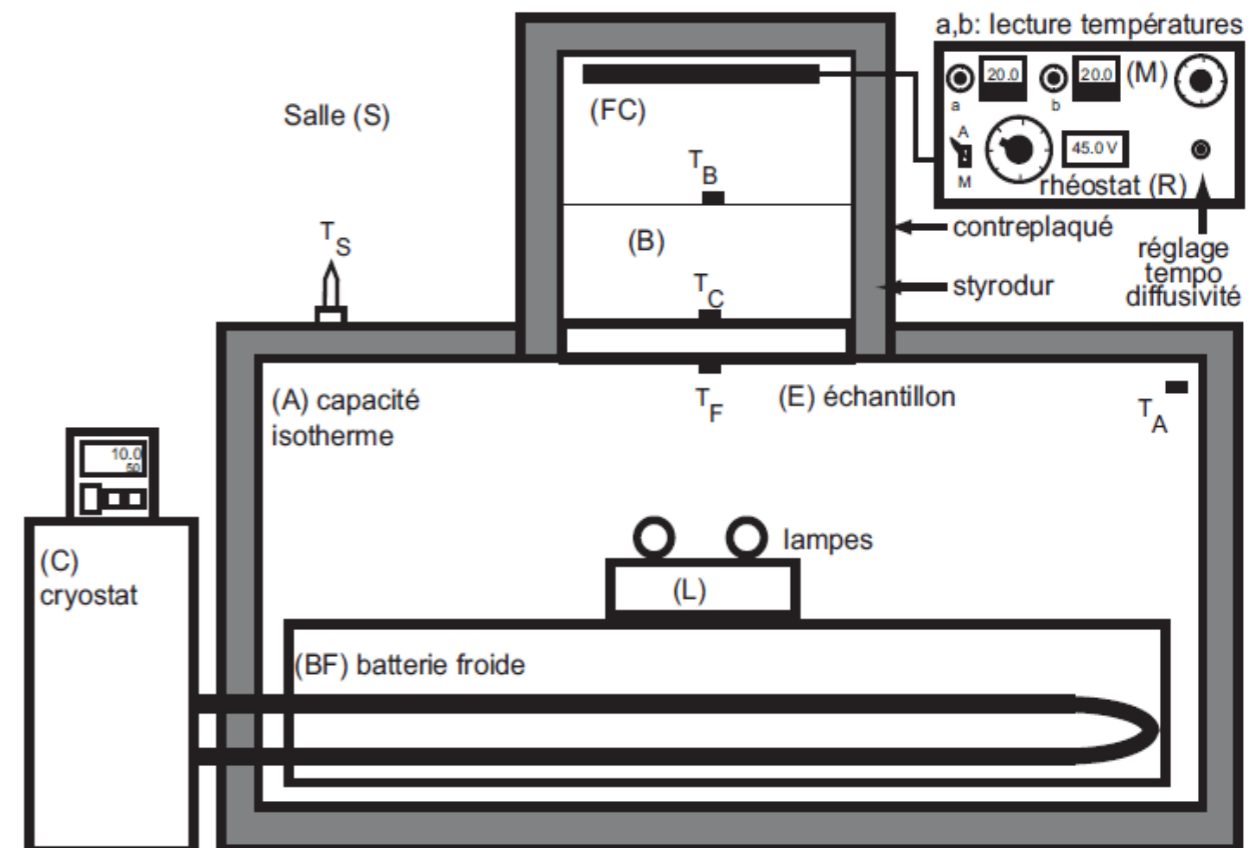
$$k = \left( \frac{\Phi}{\beta} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot C_p}} \quad \text{ou} \quad k = \frac{\Phi}{\beta} \sqrt{a}$$

# Méthode stationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Conductivimétrie'

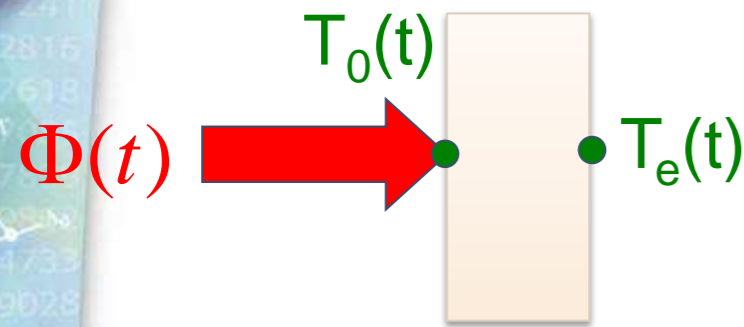


Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
<p><b>Résistance thermique (K/W)</b></p> $R_{th} = \frac{e}{k} = \frac{T_0 - T_e}{\Phi}$ <p><math>k</math> = conductivité thermique en <math>Wm^{-1}K^{-1}</math></p>	<p>- Épaisseur <math>e</math></p> $k = \frac{e}{R_{th}}$

- **Classe de méthode** : 'PLAQUE CHAUDE'
  - **Modèle simple** : loi de Fourier
- **Identification** de la conductivité **simple** : directe par la loi de Fourier
  - **Expérience difficile** :
    - garantir un transfert 1D : plaque chaude gardée (isolation latérale)
    - atteindre l'état stationnaire
- mesurer précisément 3 grandeurs :  $T_0$ ,  $T_e$  et  $\Phi$  (le plus difficile)



# Méthode instationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Diffusivimétrie'

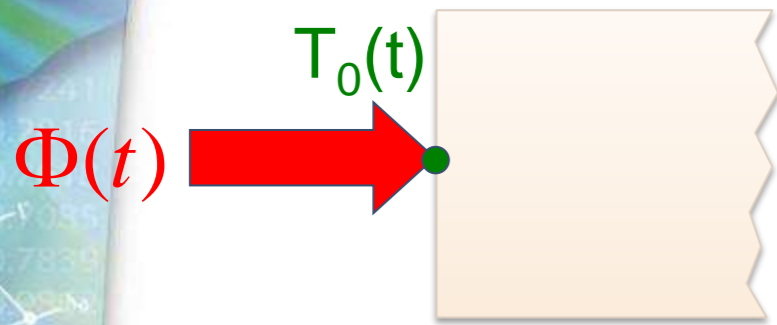


Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
<p><b>Temps diffusif (s)</b> <math>t_{diff} = \frac{e^2}{a}</math></p> <p>avec <math>a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \left(\frac{k}{b}\right)^2</math></p> <p><math>a</math> = diffusivité thermique en <math>m^2/s</math></p>	<p>- Épaisseur <math>e</math></p> <p>- Capacité calorifique <math>\rho \cdot C_p</math> volumique ou effusivité <math>b</math></p> <p><math>k = \frac{\rho \cdot C_p}{t_{diff}} e^2</math> ou <math>k = \sqrt{\frac{b}{t_{diff}}} e</math></p>

- **Modèle moins simple** : équation de la chaleur instationnaire 1D
- **Identification** de la conductivité **moins simple** : problème d'estimation non-linéaire de plusieurs paramètres (minimisation moindre carrés mesures-modèle). Identification **préliminaire de la diffusivité**
  - **Expérience moins difficile** :
    - garantir un transfert 1D : excitation uniforme et pas de pertes latérales
    - mesure seulement d'un thermogramme ( $T(t)$  en face arrière ou avant)
    - la mesure du flux absorbé est inutile, il fait partie des paramètres estimés



# Méthode instationnaire, milieu semi-infini : 'Effusivimétrie'



Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
$\beta = \frac{\Phi}{b} \quad (m^2 K s^{-1/2})$ <p>avec <math>b = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{k}{\sqrt{a}}</math></p> <p><math>b =</math> effusivité thermique en <math>W m^{-2} K^{-1} s^{1/2}</math></p>	<p>- Capacité calorifique volumique <math>\rho \cdot C_p</math> ou diffusivité thermique <math>a</math></p> <p>- Flux</p> $k = \left( \frac{\Phi}{\beta} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot C_p}} \quad \text{ou} \quad k = \frac{\Phi}{\beta} \sqrt{a}$

- **Classe de méthode** : 'Sondes planes' de type 'Plan chaud'
- **Modèle simple** : équation de la chaleur instationnaire 1D

-  $T(t) = \frac{Q}{b} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi t}}$  si flux = Dirac d'énergie  $Q$  et  $T(t) = \frac{2\Phi}{b} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}}$  si  $\Phi =$  constante

- **Identification** de la conductivité **simple**, identification **préliminaire de l'effusivité**

- **Expérience moins difficile** :

- garantir un transfert 1D : excitation uniforme et pas de pertes latérales, montage symétrique

- mesure seulement d'un thermogramme (sur la surface chauffée)

- si l'expérience se complique (effets 2D notamment, prise en compte de l'inertie de la sonde), le modèle peut évoluer et l'identification pourra porter également sur ces paramètres supplémentaires

- **Il faut connaître le flux entrant dans le matériau pour identifier l'effusivité (souvent effet Joule)**

# Mesure de la conductivité thermique : résumé et quelques remarques

## Résumé :

- Mesure de conductivité **toujours indirecte** :
- en conductivimétrie : mesure de deux températures et d'un FLUX stationnaires + épaisseur
- en diffusivimétrie : mesure d'un thermogramme + épaisseur + capacité ou effusivité
- en effusivimétrie : mesure d'un thermogramme + FLUX + capacité ou diffusivité

➔ **Seule la diffusivimétrie ne nécessite pas de connaître le flux entrant dans le matériau**

## - Remarques

- Estimation simultanée : en expérience instationnaire (diffusivimétrie ou effusivimétrie), il est possible **d'estimer simultanément la diffusivité et l'effusivité** d'un échantillon inconnu
  - en contact avec un échantillon connu
- en provoquant des volontairement des transferts 2D (sonde plane plus petite que l'échantillon en effusivimétrie, de type 'ruban chaud' ou 'disque chaud')
- Pour des matériaux hétérogènes : la question de l'**homogénéisation** se pose pour les méthodes instationnaires (par exemple en diffusivimétrie) :

Pour un échantillon hétérogène, on mesure indépendamment :


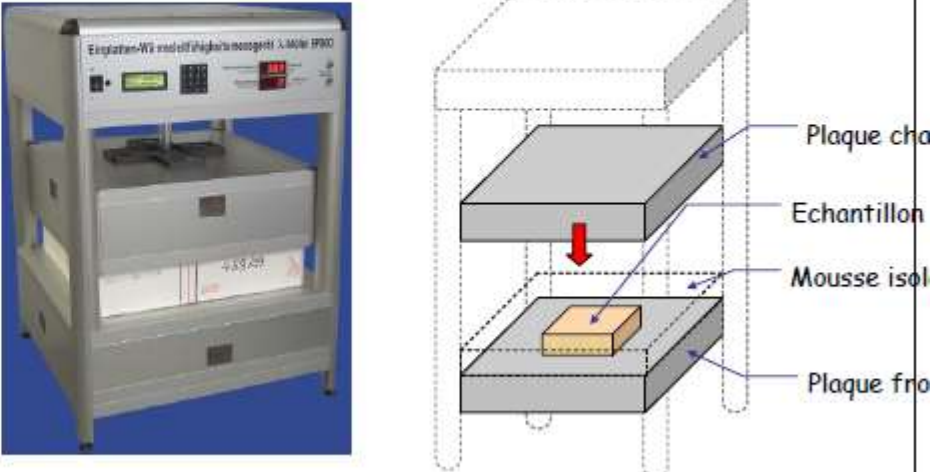
- Conductivité  $k$  (plaque chaude)
- Diffusivité  $a$  (flash)
- Capacité Volumique  $\rho C_p$  (calorimétrie)

Si on vérifie que 
$$a = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

On pourra dire que l'on a un matériau **homogène équivalent** avec ces propriétés

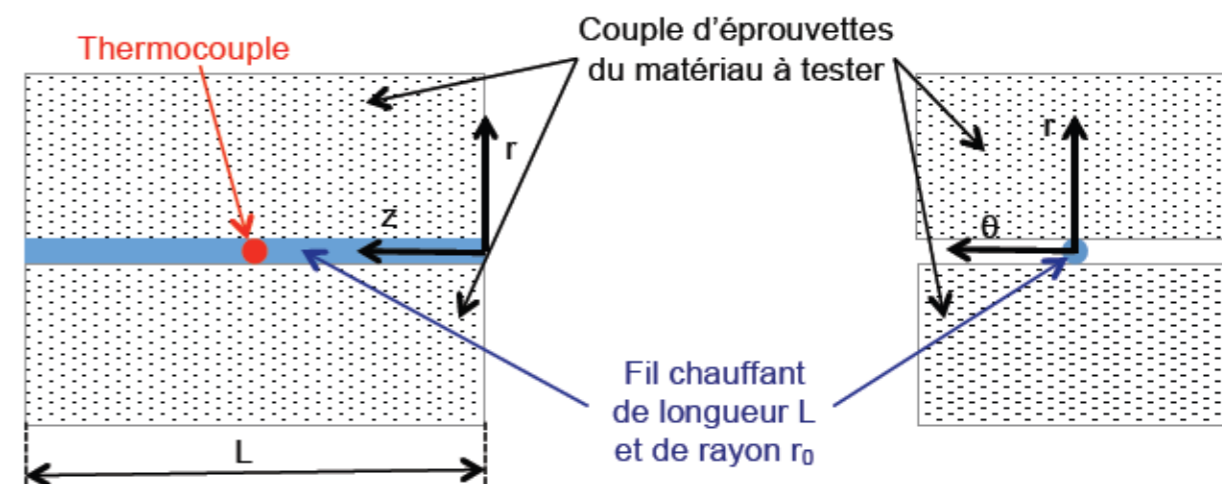
Sinon, n'y a-t-il pas une limite à l'utilisation de la diffusivité mesurée pour en déduire une conductivité?...

# Méthode instationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Diffusivimétrie'

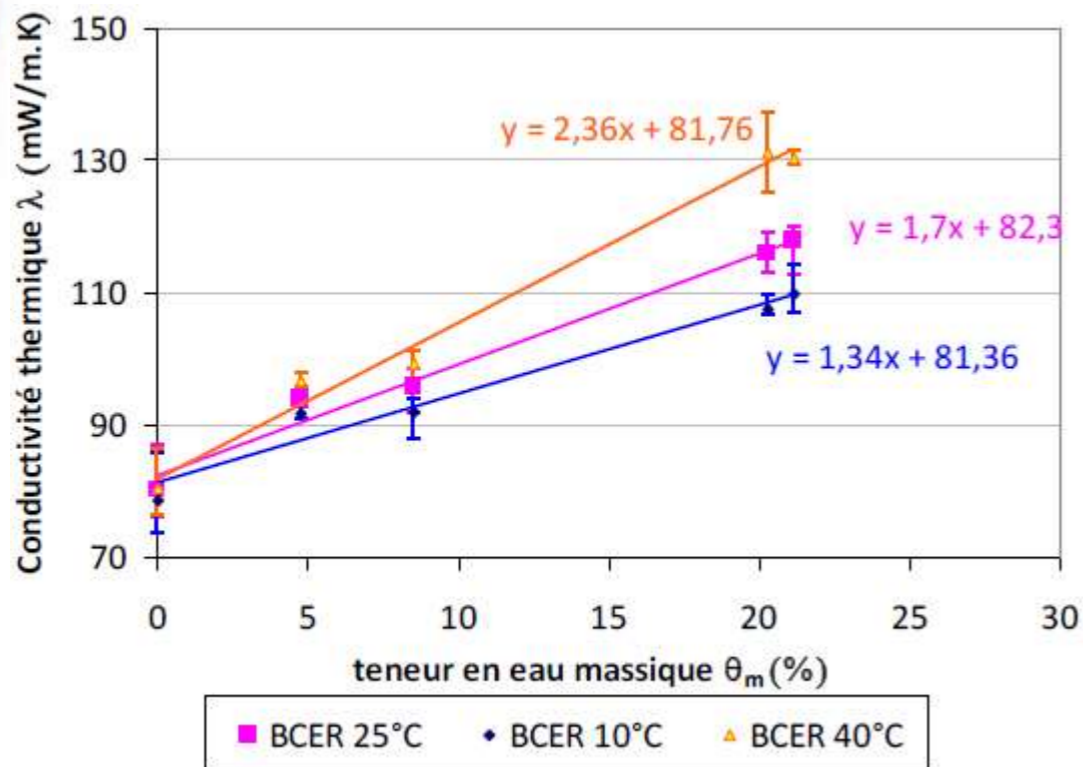
LaSIE	LMDC
Méthode en régime transitoire	En régime stationnaire par la méthode de la plaque chaude gardée (NF EN 12664)
<p data-bbox="425 337 686 367">TCi – C-THERM</p> 	<p data-bbox="1262 439 1522 470"><math>\lambda</math>-Meter EP 500</p> 

L'éprouvette est placée entre une plaque froide et une plaque chaude et est soumise à un gradient de température. Le principe de la mesure de la conductivité thermique repose sur le rapport entre le flux de chaleur qui traverse le matériau et le gradient de température qu'il génère.

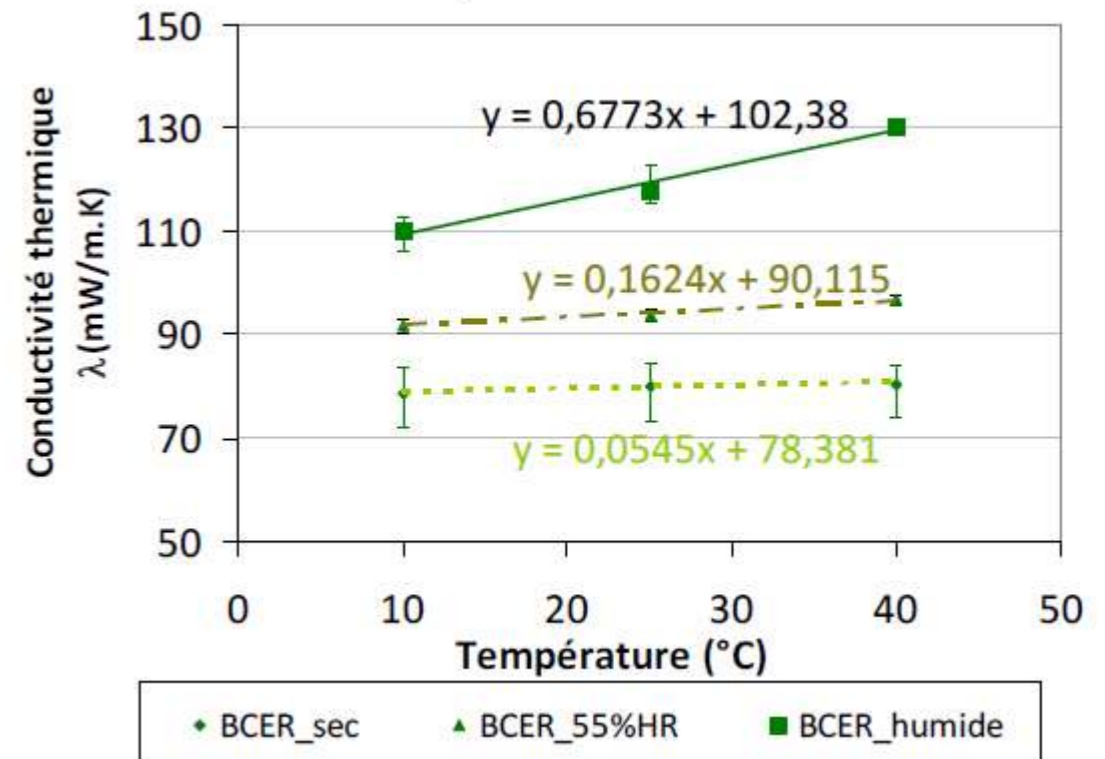
L'appareil est constitué d'un capteur (sonde) réflecteur thermique unilatéral et inter facial qui émet une source de chaleur constante et passagère sur l'échantillon. Un courant est émis vers l'élément chauffant du capteur => augmentation de T à l'interface entre le capteur et l'échantillon (généralement moins de 2° C)  
 => une chute de tension dans le capteur.  
 => l'étude du taux de variation de la tension dans le capteur



# Conductivité thermique



Bois à cernes étroites



Bois à cernes étroites

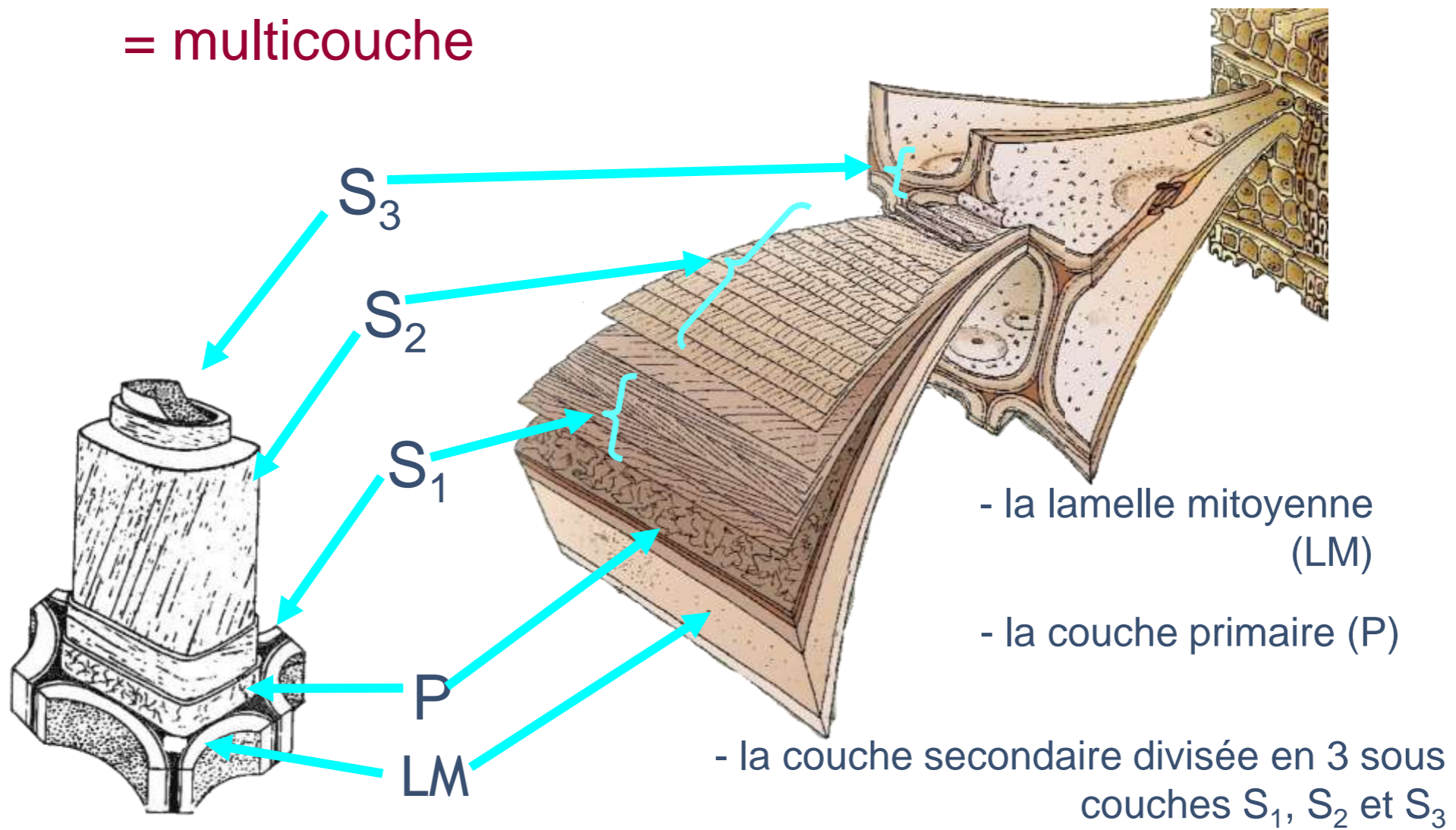
<b>Bois à cernes étroites</b>	$\lambda = (0,034 t + 0,95) \theta_m + 82$	t comprise entre 20 et 40°C ; $\theta_m$ comprise entre 0 et 20%
<b>Isolant de fibre</b>	$\lambda = 0,28 \theta_m + (0,108 t + 38)$	t comprise entre 20 et 40°C ; $\theta_m$ comprise entre 0 et 25%
<b>OSB</b>	$\lambda = 0,15 t + 93$ $\lambda = 1,96 \theta_m + 91$	t comprise entre 10 et 40°C $\theta_m$ comprise entre 0 et 50% et t=20°C

t : température (°C) ;  $\theta_m$  : teneur en eau massique (%)

# De l'arbre au bois

## Echelle de la paroi cellulaire

= multicouche



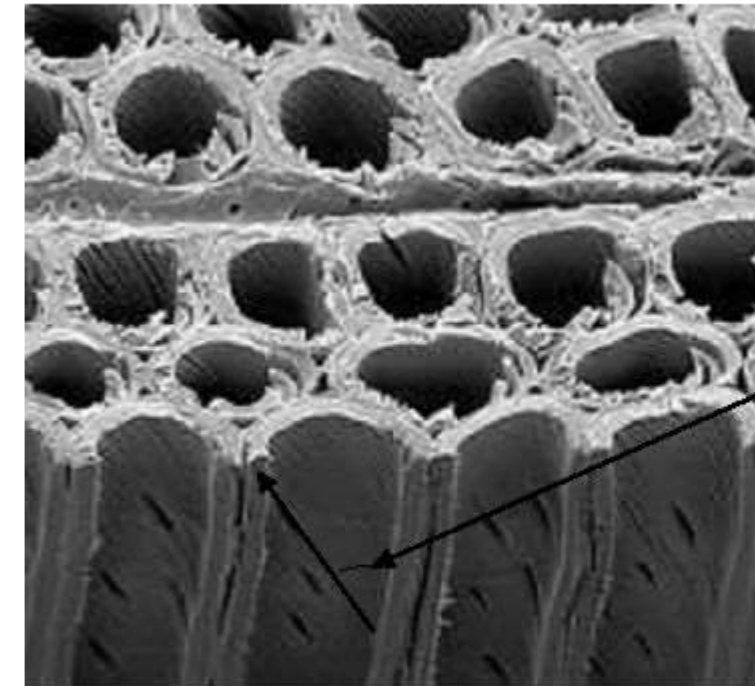
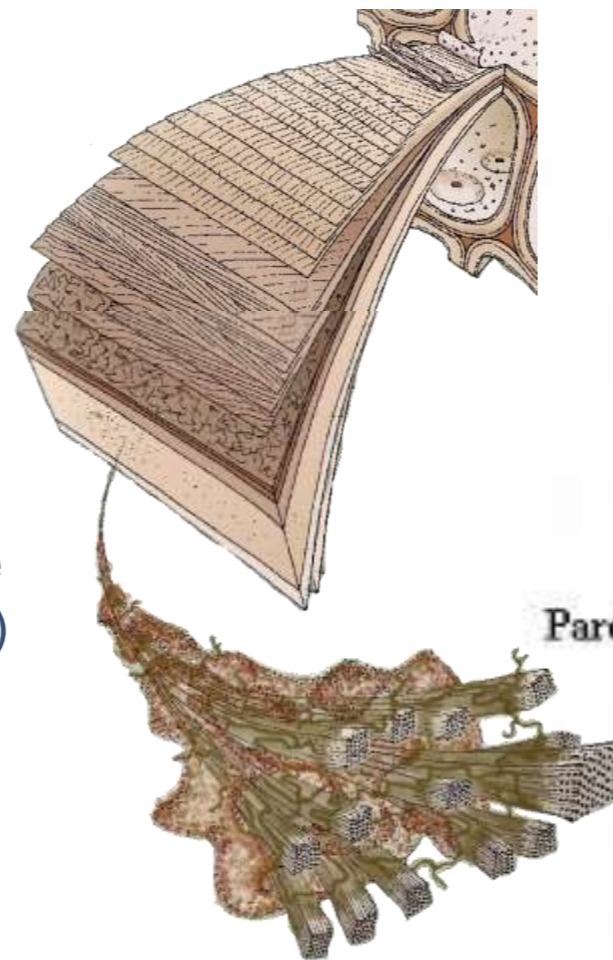
# De l'arbre au bois

## Structure de la paroi secondaire

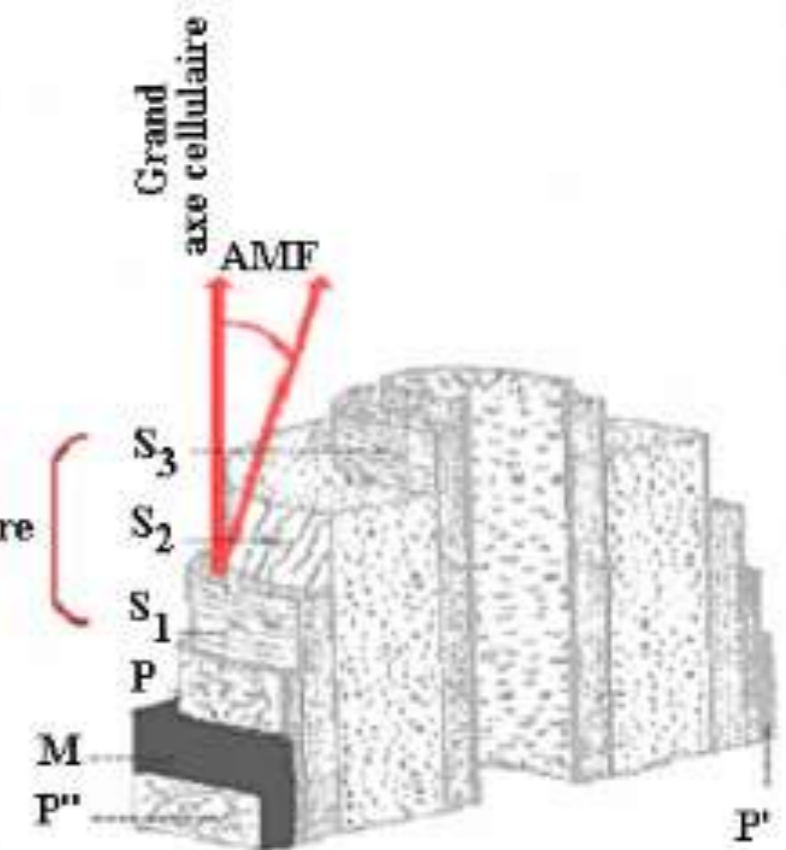
composite à fibres orientées

La couche S2 est composée de parties très rigides : les "microfibrilles" de cellulose

... enrobées dans une matière plus molle (mélange de lignine et d'hémicellulose)

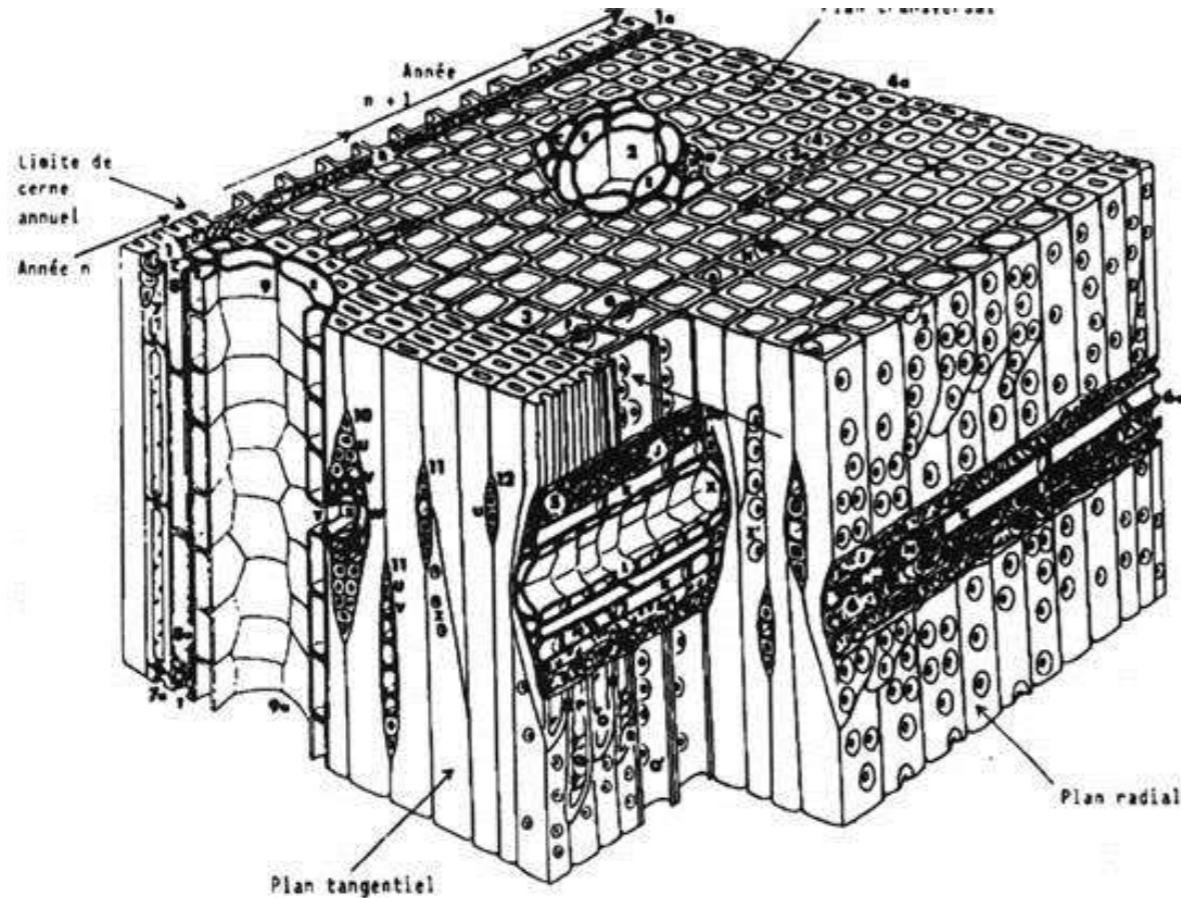


AMF



# De l'arbre au bois

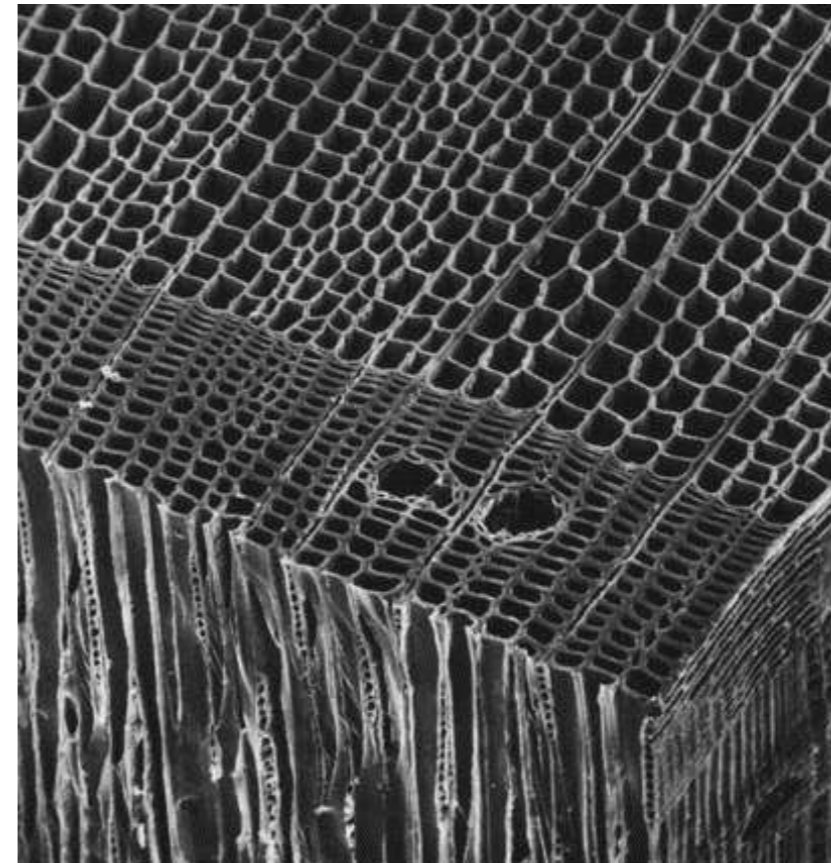
## Structure interne d'un résineux



résineux  
= conifère  
= gymnosperme  
= *softwood*

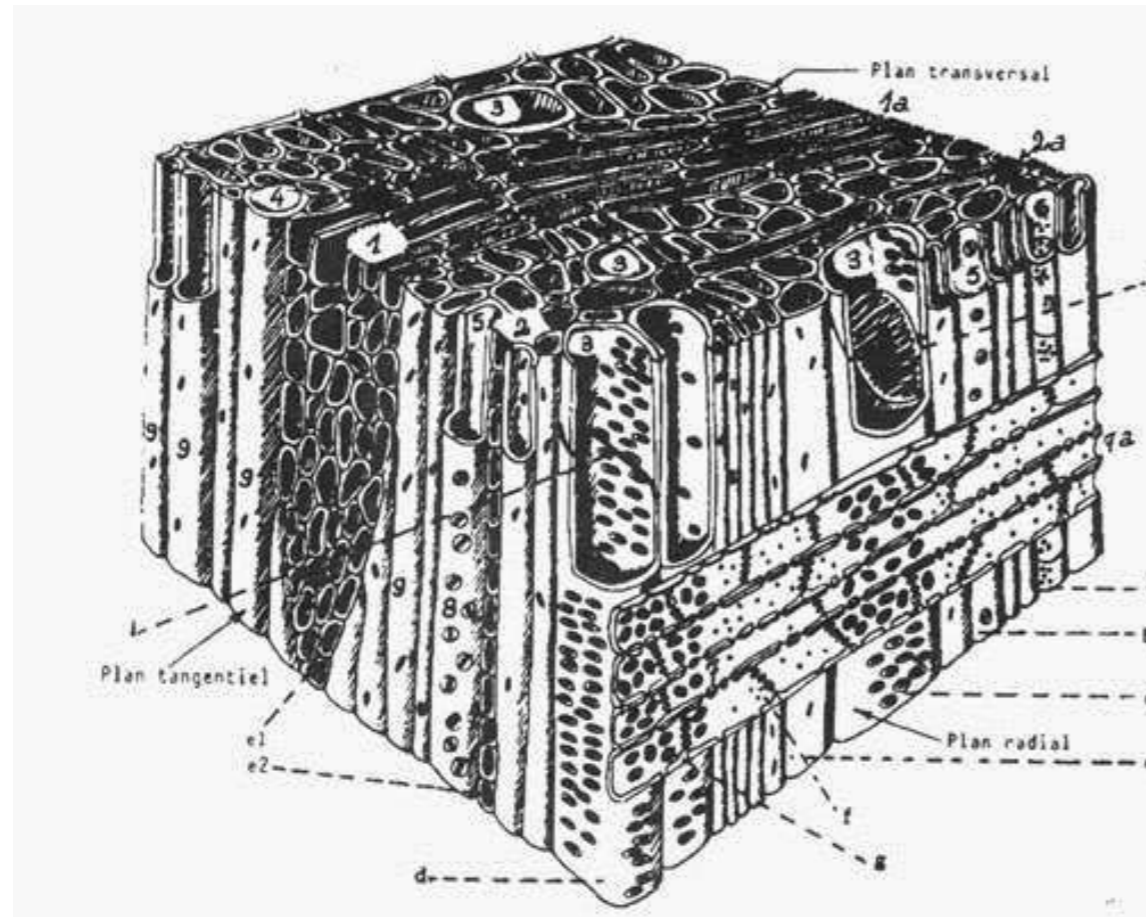
### Une structure "archaïque":

- Trachéides majoritaires, soutien+conduction
- *stockage*: faible proportion de parenchyme radial (rayons ligneux)
- parfois canaux résinifères



# De l'arbre au bois

## Structure d'un feuillu

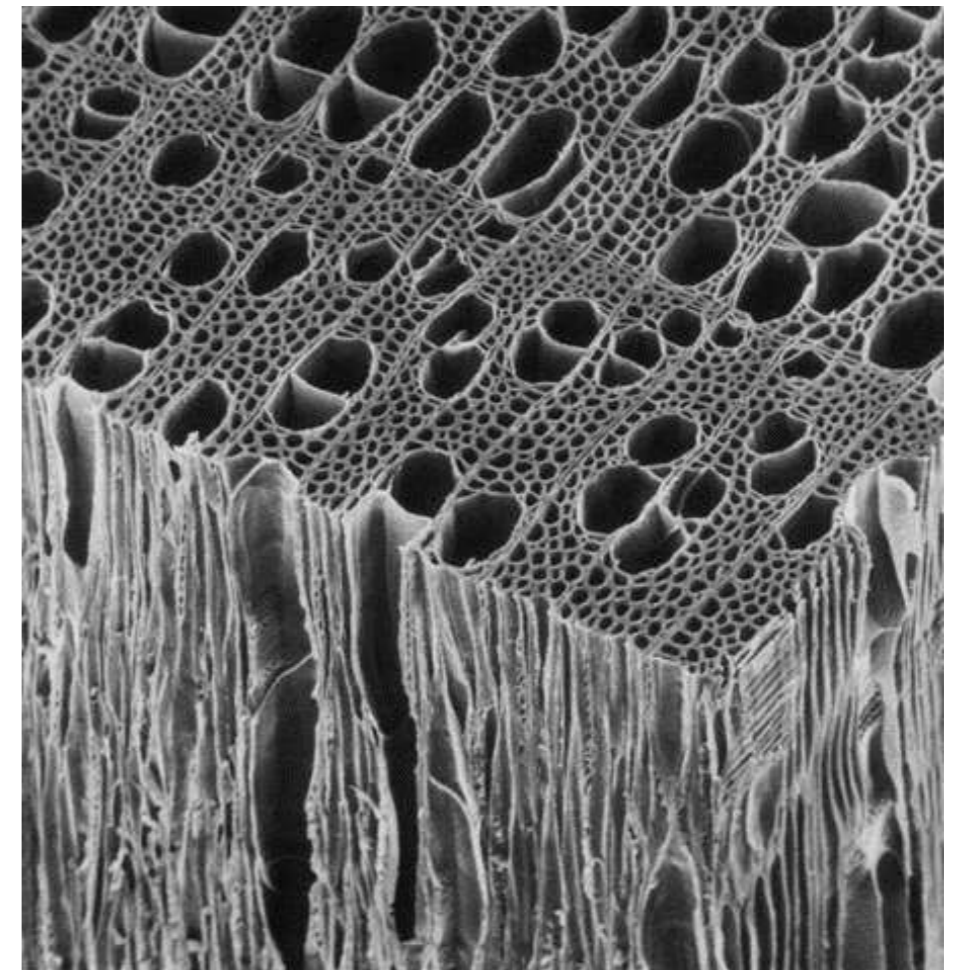


feuillus  
= angiosperme  
= *hardwood*

### Des structures plus "évoluées"

(donc plus de spécialisation et de complexité)

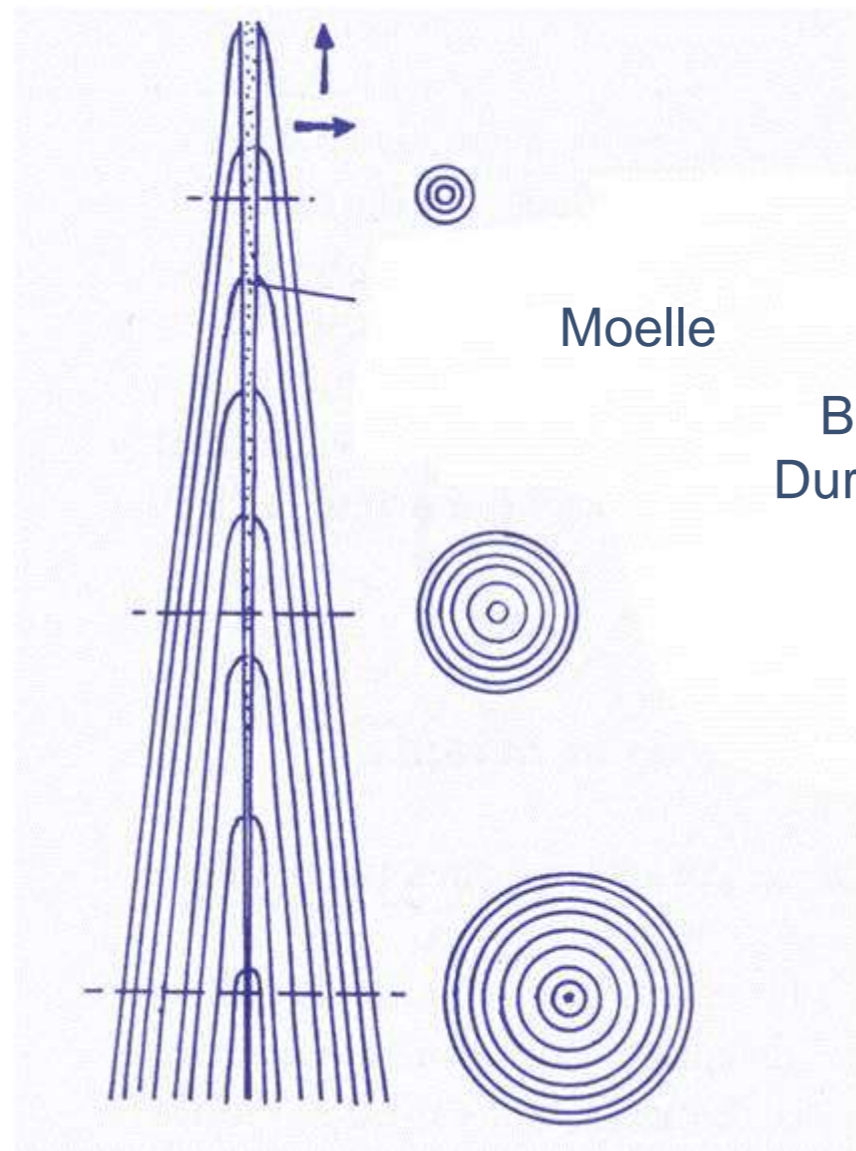
- fibres majoritaires, *soutien* seulement
- *conduction* assurée par les vaisseaux
- *stockage*: souvent beaucoup de parenchyme radial (rayons ligneux) voire axial
- présence possible de toutes sortes d'extractibles (résines, tannins...)





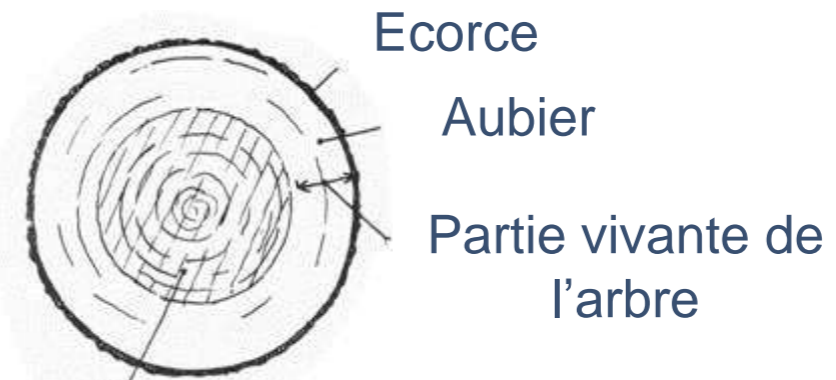
# De l'arbre au bois

## Croissance de l'arbre

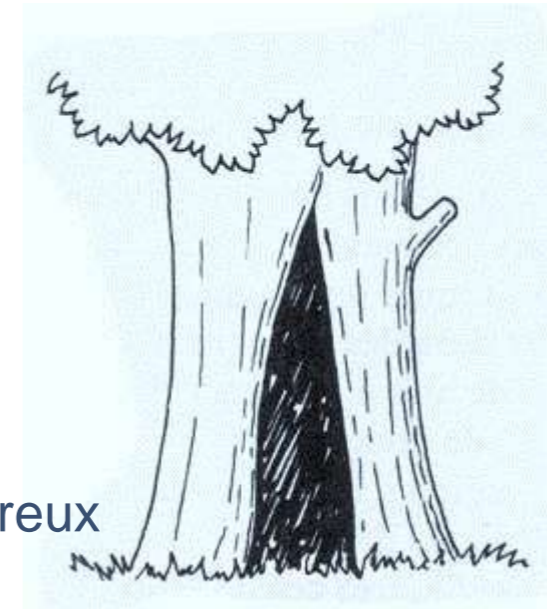


Moelle

Bois de Cœur ou  
Duramen = squelette  
de l'arbre



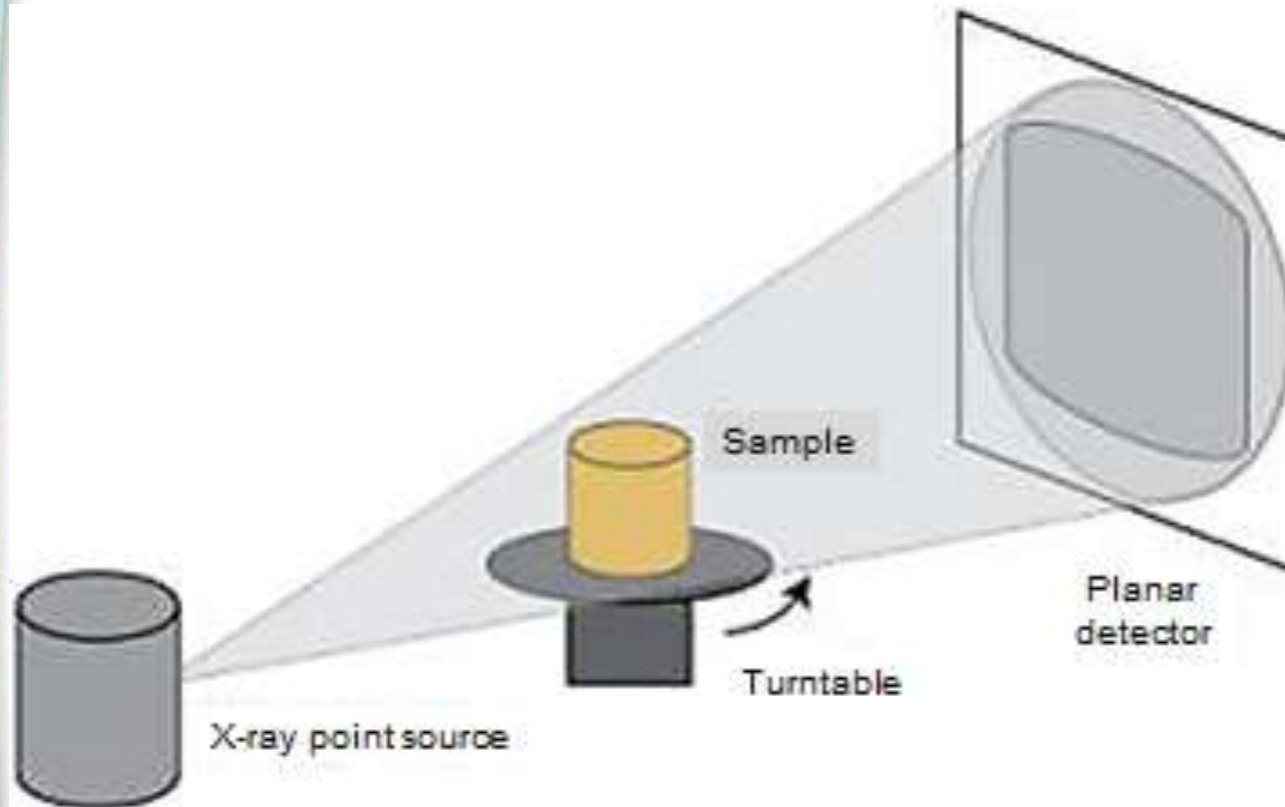
Tronc creux



# Echelle microscopique

Caractérisation microstructurale : approche numérique

## X-ray tomography



$$I_x = I_0 * \exp(-\mu * x)$$

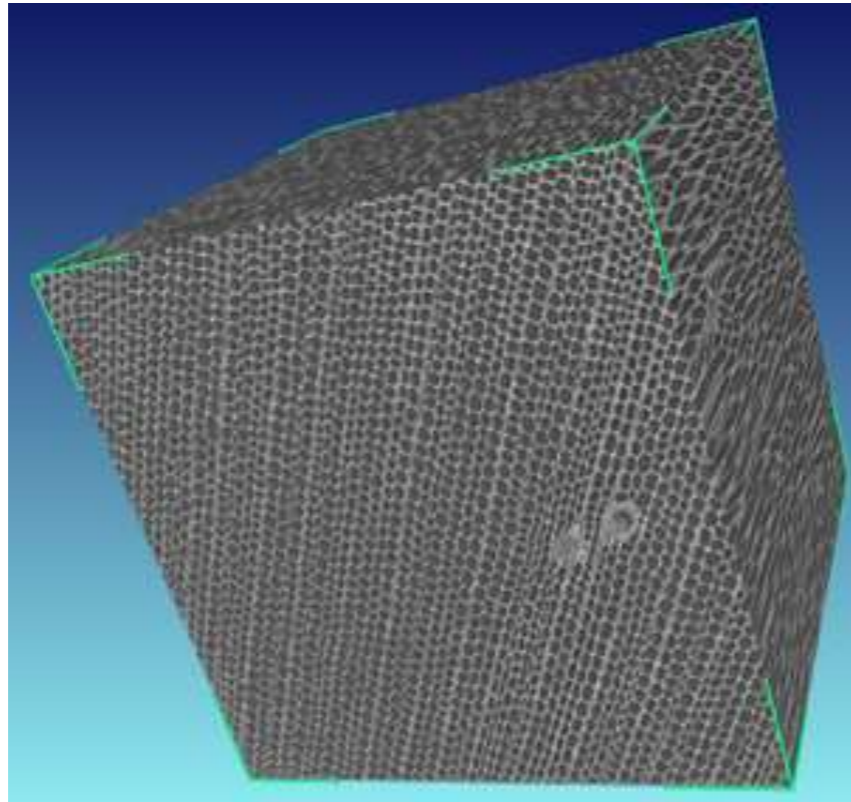


NSI-X50 Tomographe

# Micro-tomographie rayon X

## Reconstruction 3D

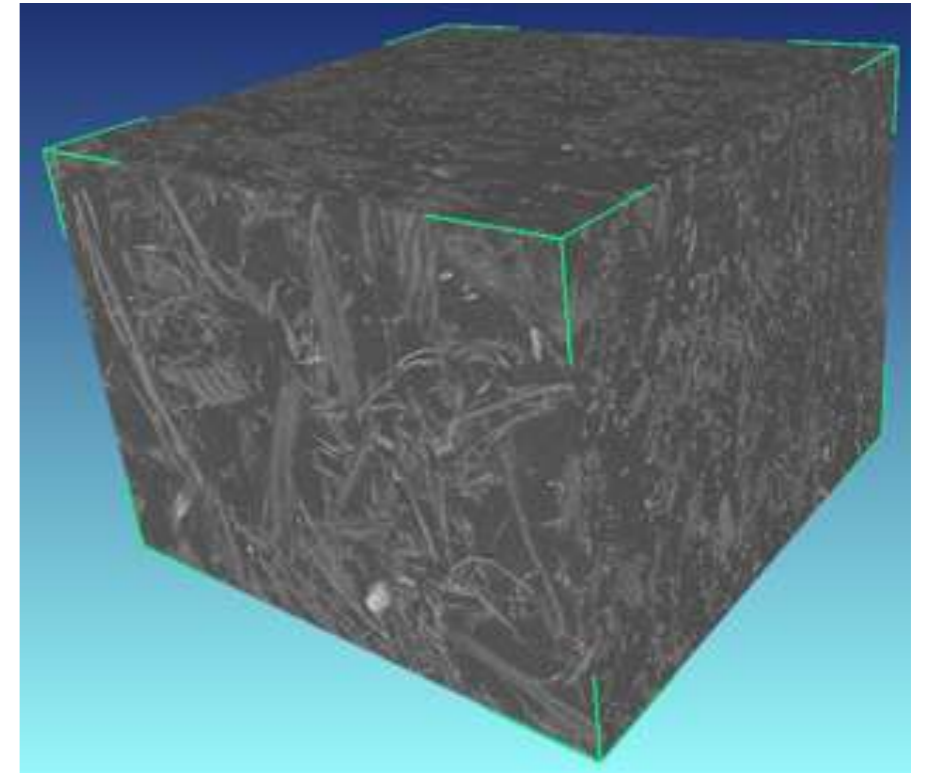
Bois massif



Dimension de  
l'échantillon  
 $3 \times 3 \times 20 \text{ mm}^3$

Résolution  
 $3.3 \text{ } \mu\text{m}/\text{pi}$

Isolant de fibre en bois

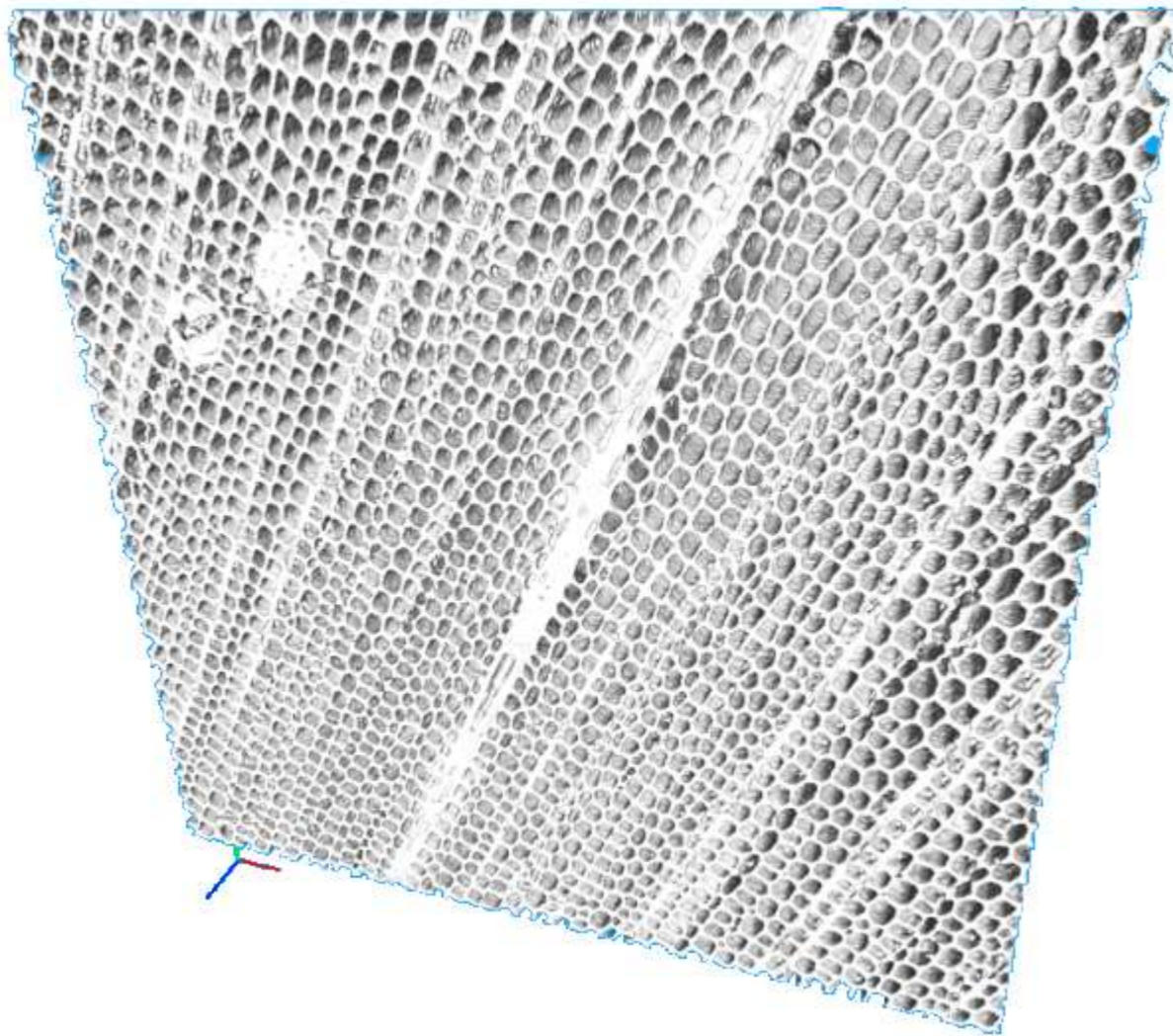


Dimension de  
l'échantillon  
 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$

Résolution  
 $8.8 \text{ } \mu\text{m}/\text{pi}$

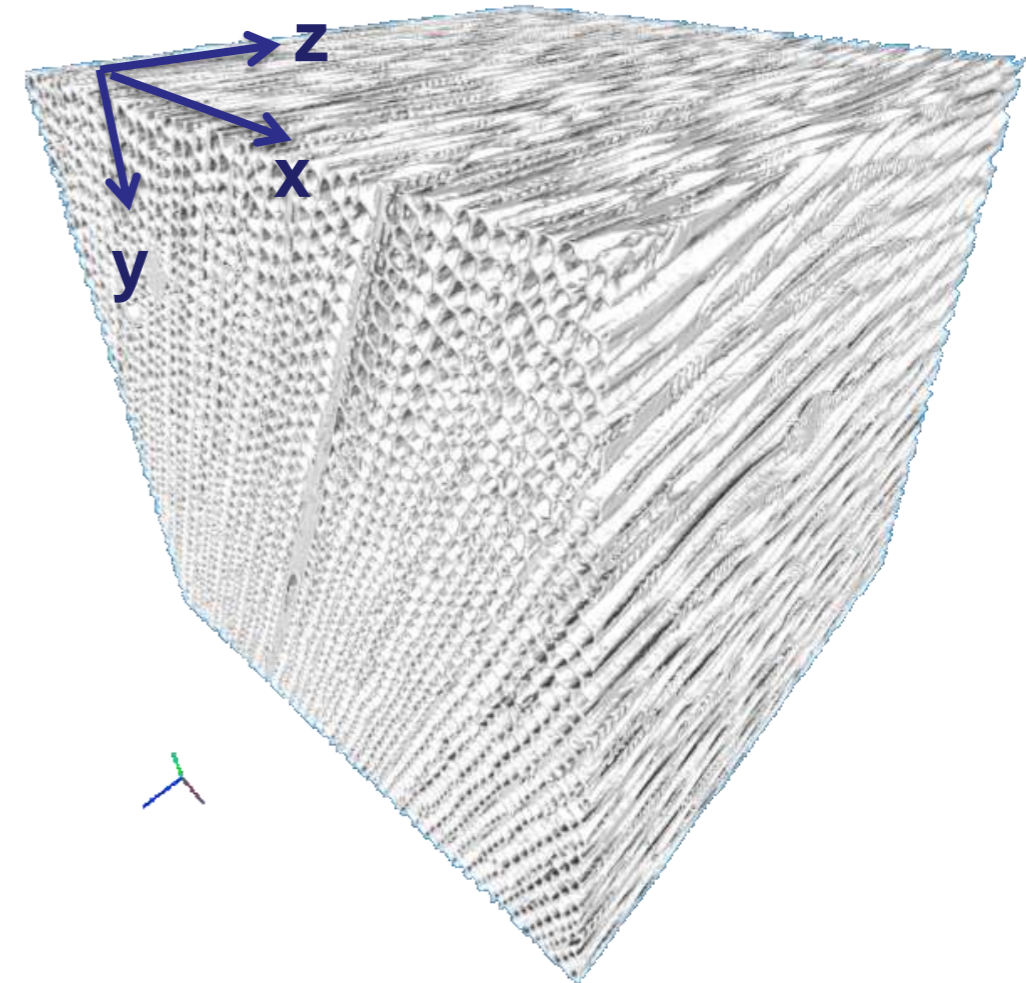
# Caractérisation morphologique

## Early Wood



**Dimension:**  
500x500x500 Voxel  
**Resolution:**  
3.3  $\mu\text{m}$

## 3 D Reconstruction

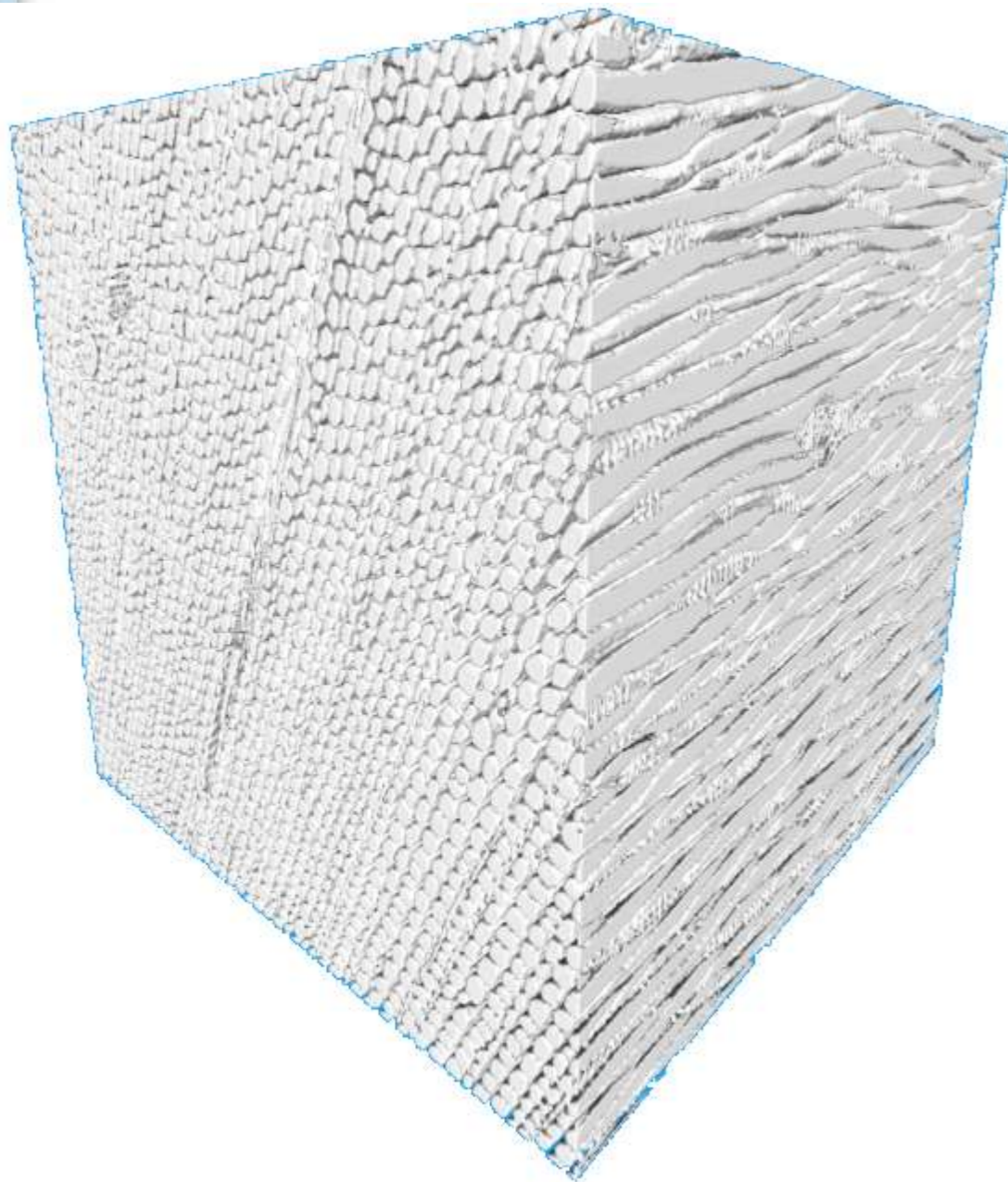


*A 3D view on ImageJ of the ROI of dimensions  
1.6x1.6x1.6 mm<sup>3</sup> of a dried specimen with the  
latewood/early wood transition  
RH= 60%*

# Caractérisation morphologique

## 3 D Reconstruction

### Early Wood

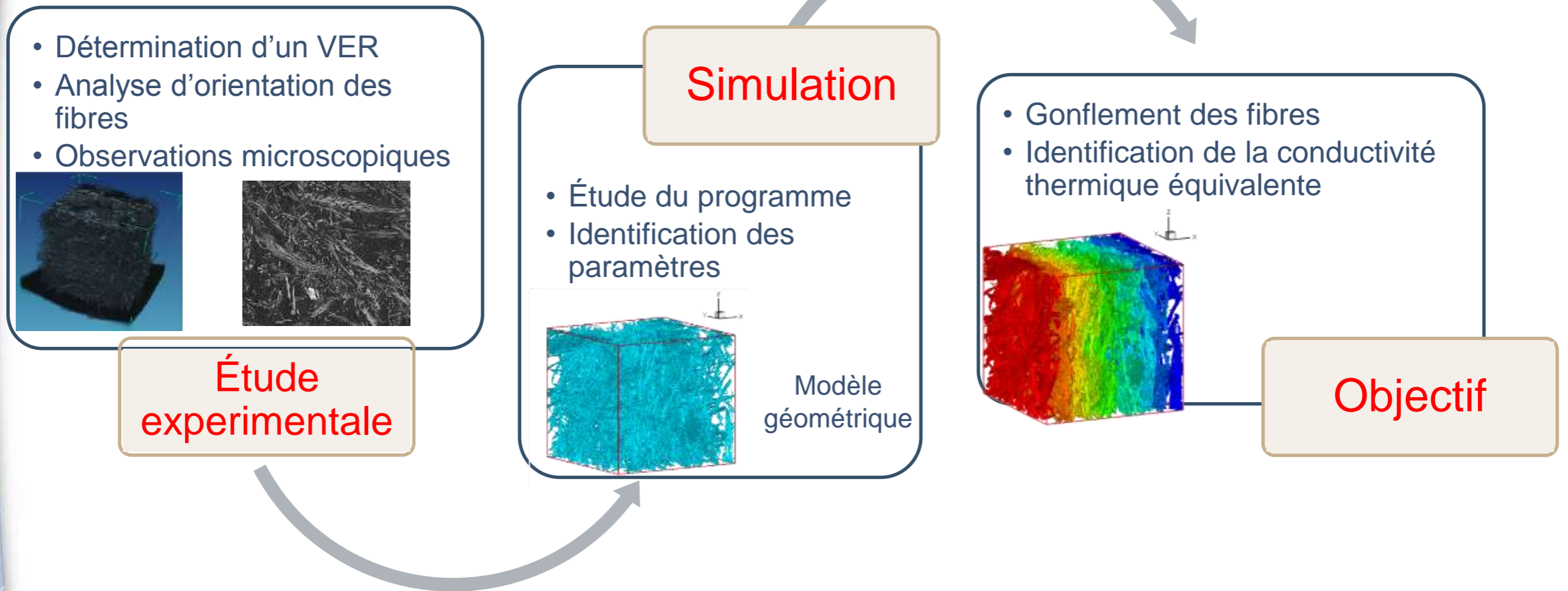


Connection between fibers?

A 3D view on ImageJ of the ROI of dimensions  $1.6 \times 1.6 \times 1.6 \text{ mm}^3$  of a dried specimen with the latewood/early wood transition

RH= 60%

# Démarche Micro



# Démarche Micro

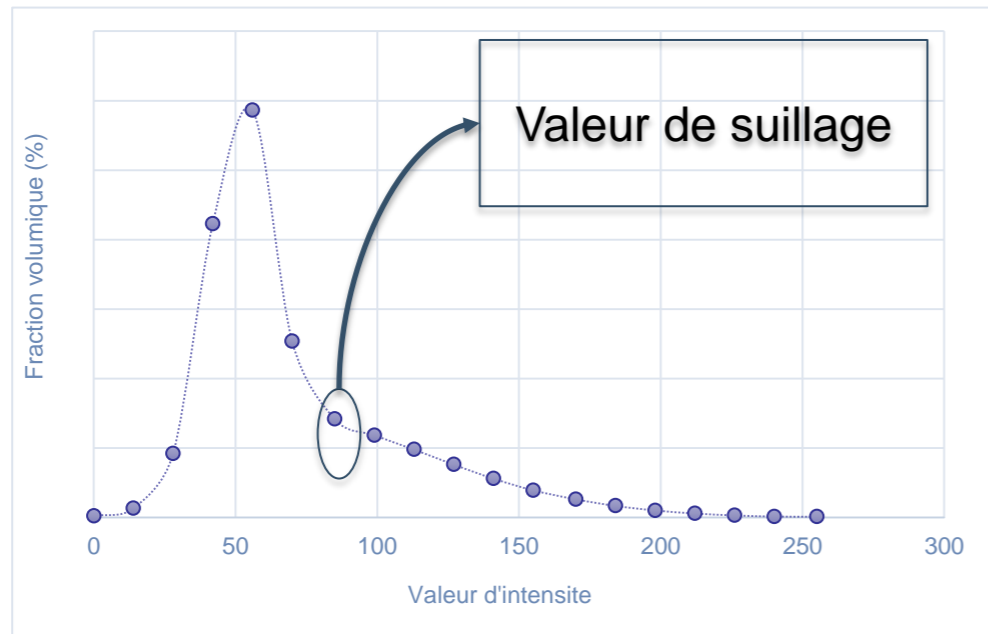
## Analyse de la résolution

Nom de fichier	Résolution d'échantillon			Porosité
	HR	Voxel size( $\mu\text{m}$ )	Resolution (voxel)	
	IFB_cube_10mm	Etat Initial	[5.7 x 5.7 x 5.7]	
IFB_cube_10mm	Etat Initial	[8.8 x 8.8 x 8.8]	[1269x1636x1288]	
IFB_cube_20mm	Etat Initial	[21 x 21 x 21]	[1305x1244x1229]	



# Filtrage et segmentation du réseau fibreux

IFB60HR avec une resolution de  $7.7*7.7*7.7\mu\text{m}$



- Filtrage et segmentation du réseau fibreux



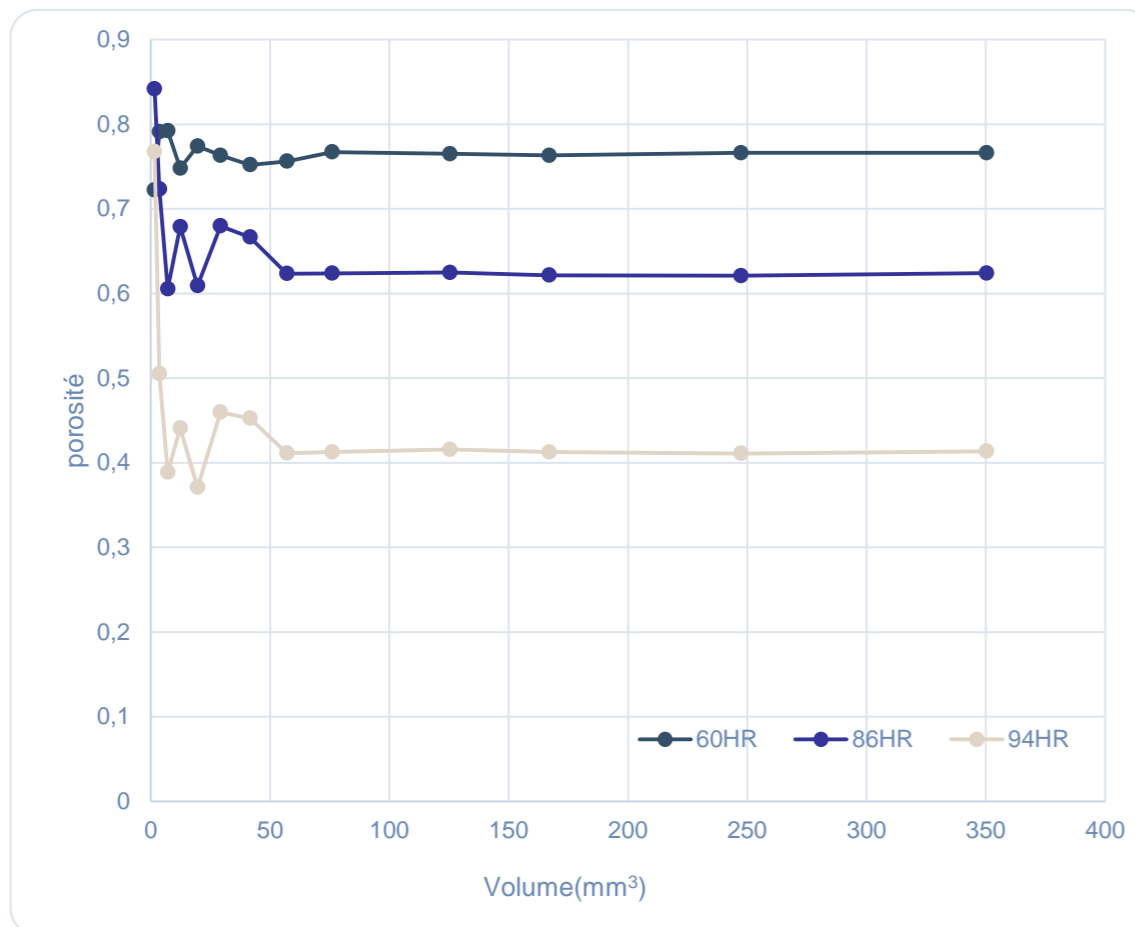
IFB60HR: a) image initial et image segmente avec la valeur de seuillage b)  $s=41$  c)  $s=70$  d)  $s=85$  e)  $s=99$



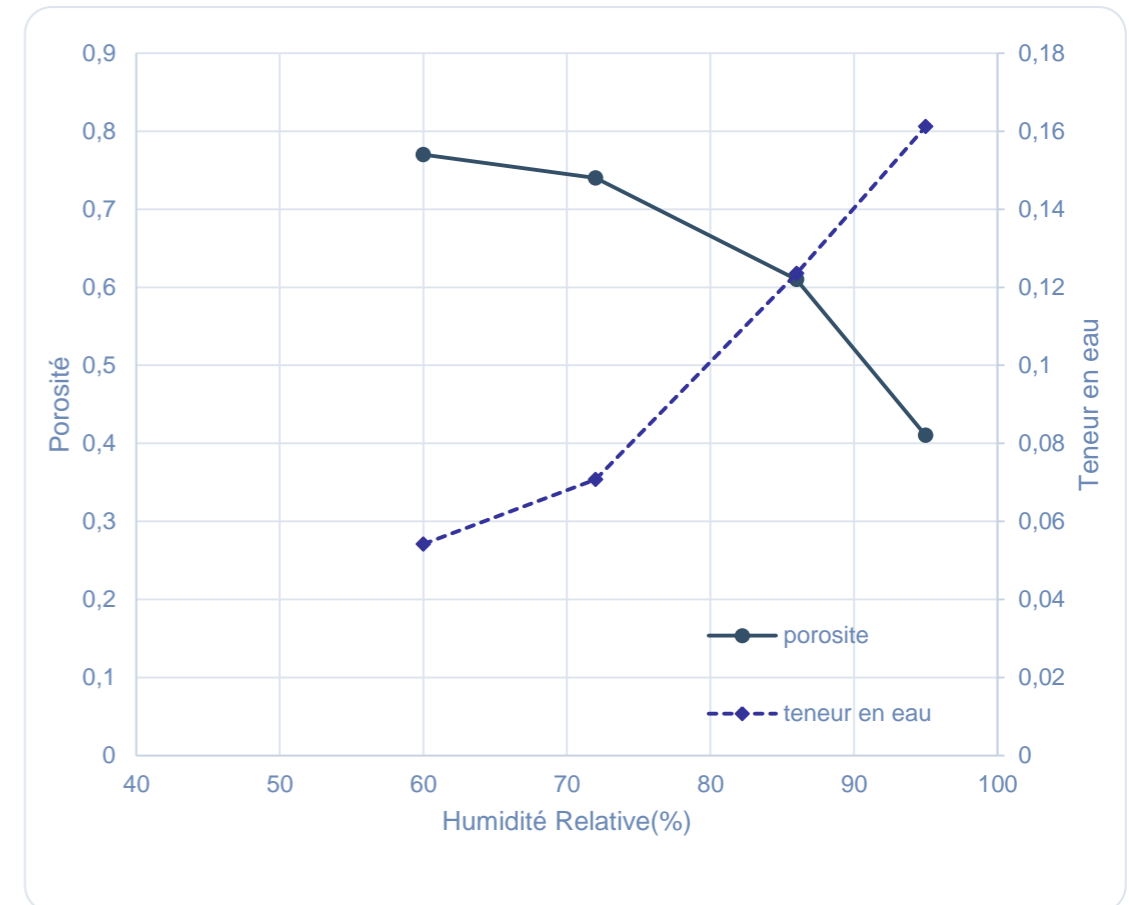
# Filtrage et segmentation du réseau fibreux

Détermination du volume élémentaire représentatif de l'IFB

=> Effet du VER sur la porosité



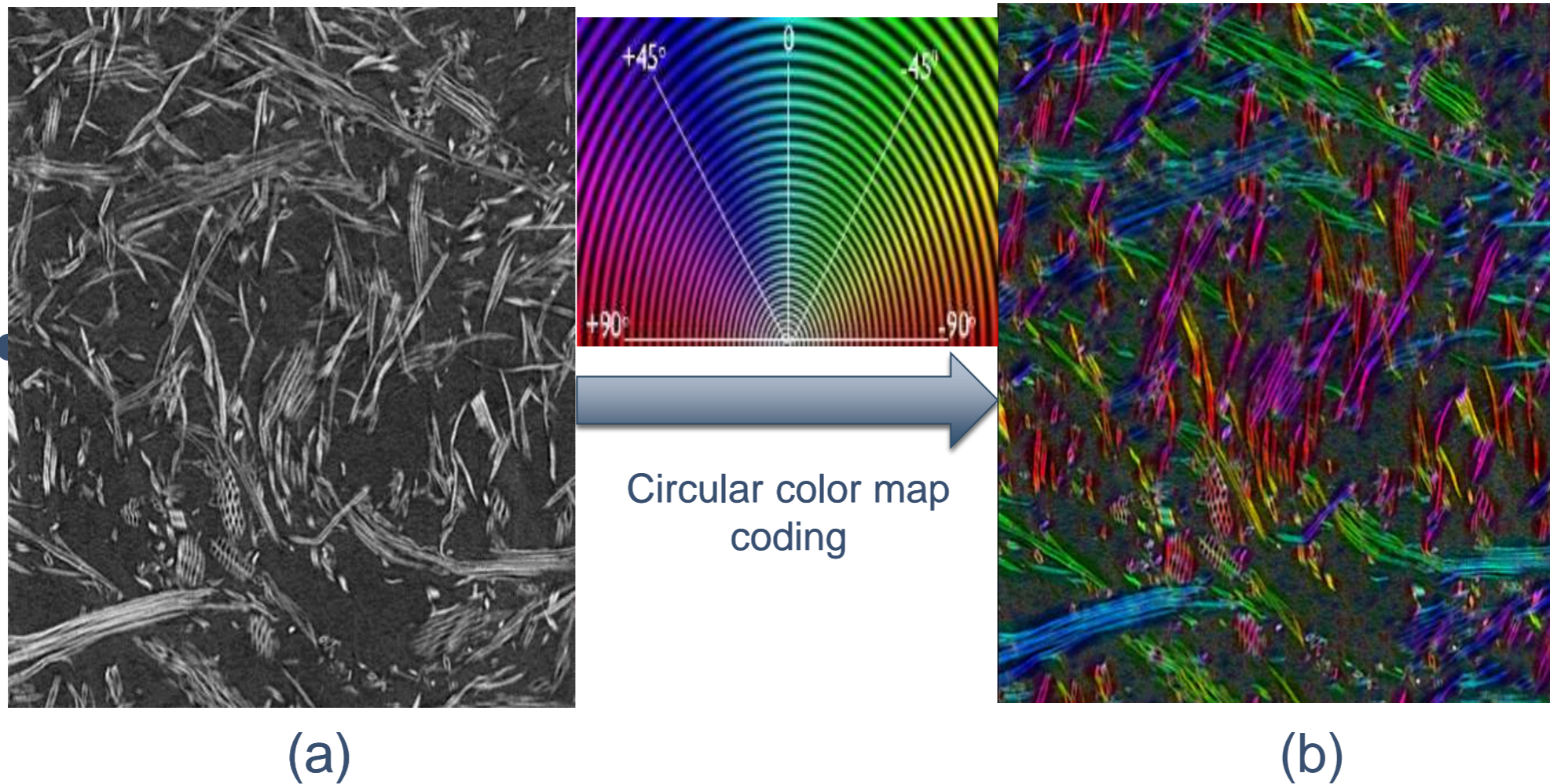
Évolution de la porosité en fonction de la taille du VER



Évolution de la porosité et de la teneur en eau avec HR

# Filtrage et segmentation du réseau fibreux

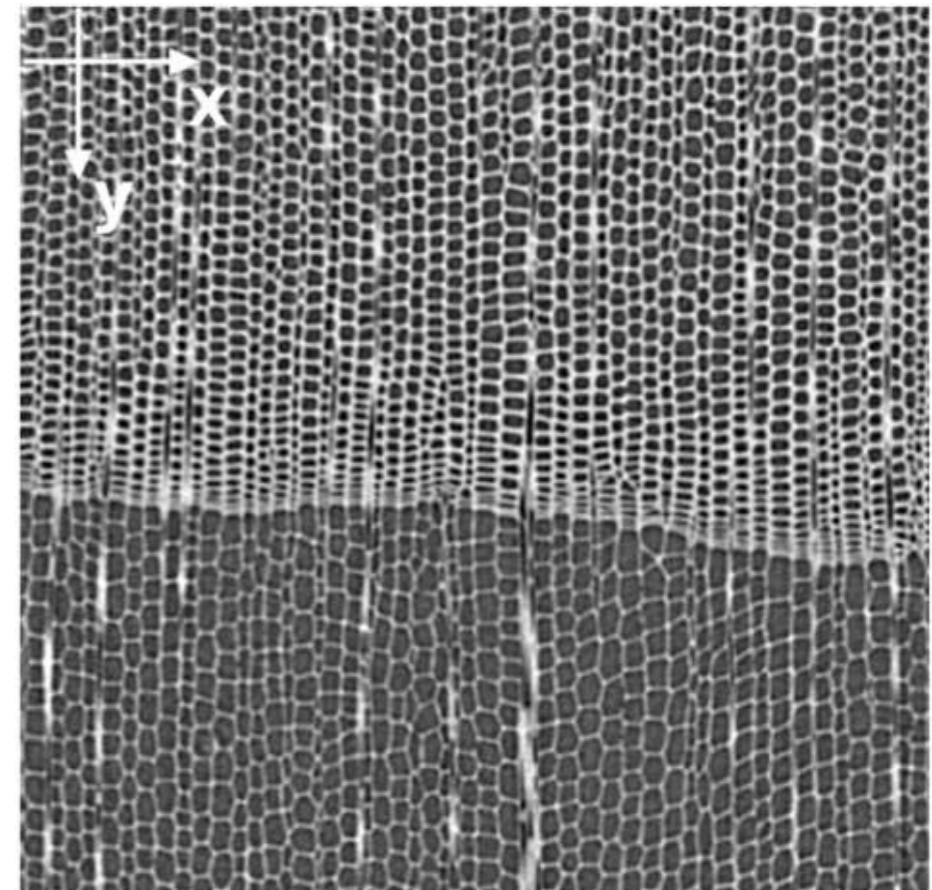
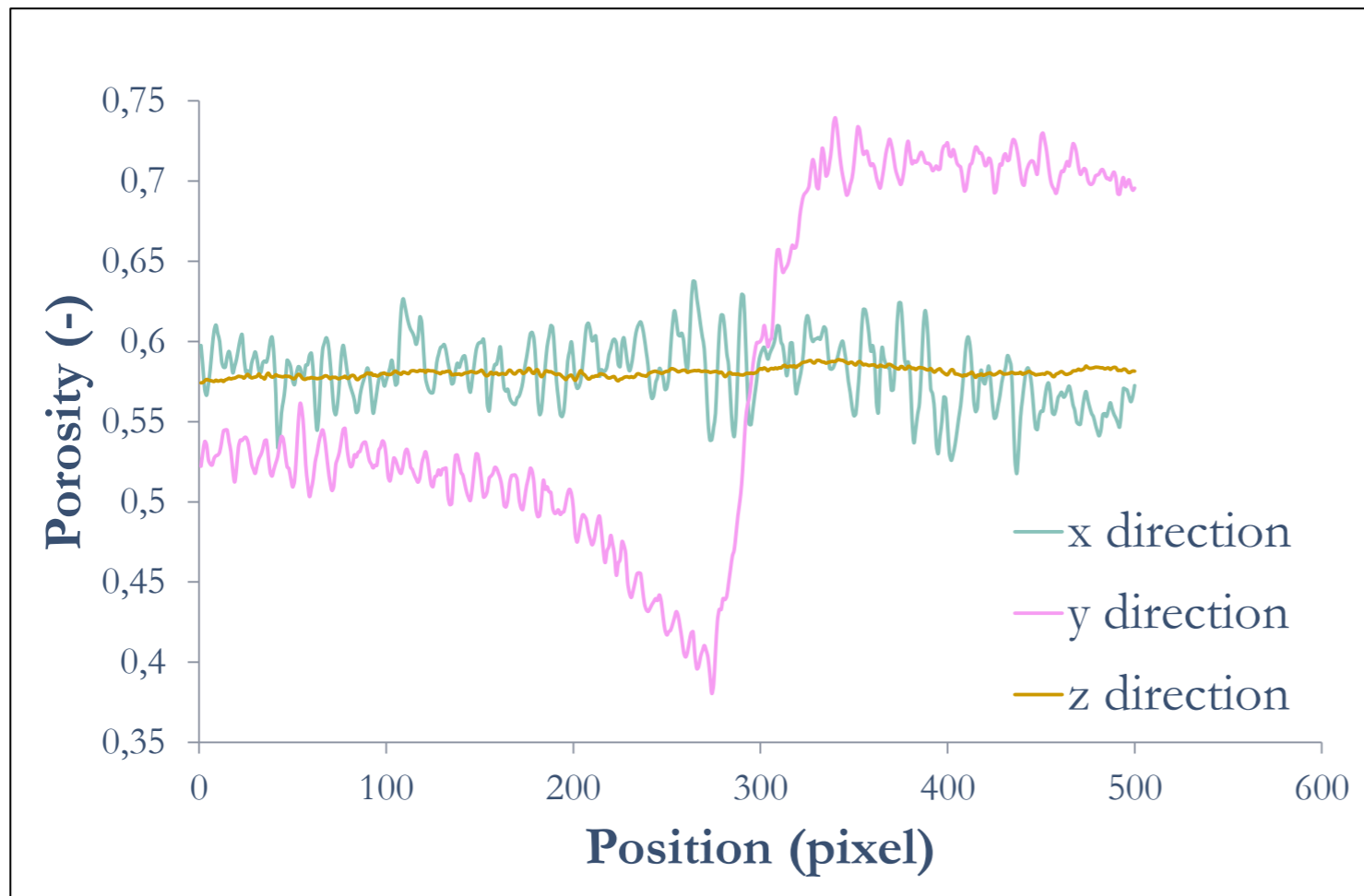
=> Orientation des fibres de l'IFB



Coup d'IFB-60HR dans un plan longitudinal, (a) image d'origine et (b) image colorée

# Porosité BM

=>Effet de la discontinuité de l'interface bois d'été/ bois du printemps

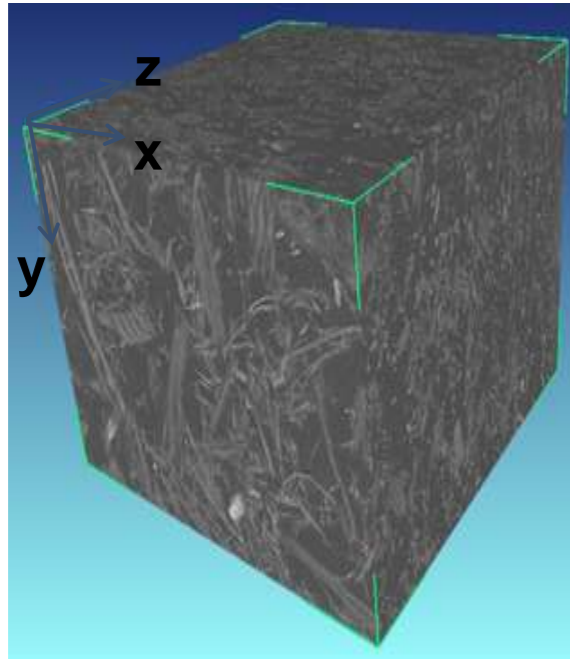


*Evolution of the dried specimen's porosity with the latewood/ early wood discontinuity in x, y and z directions*

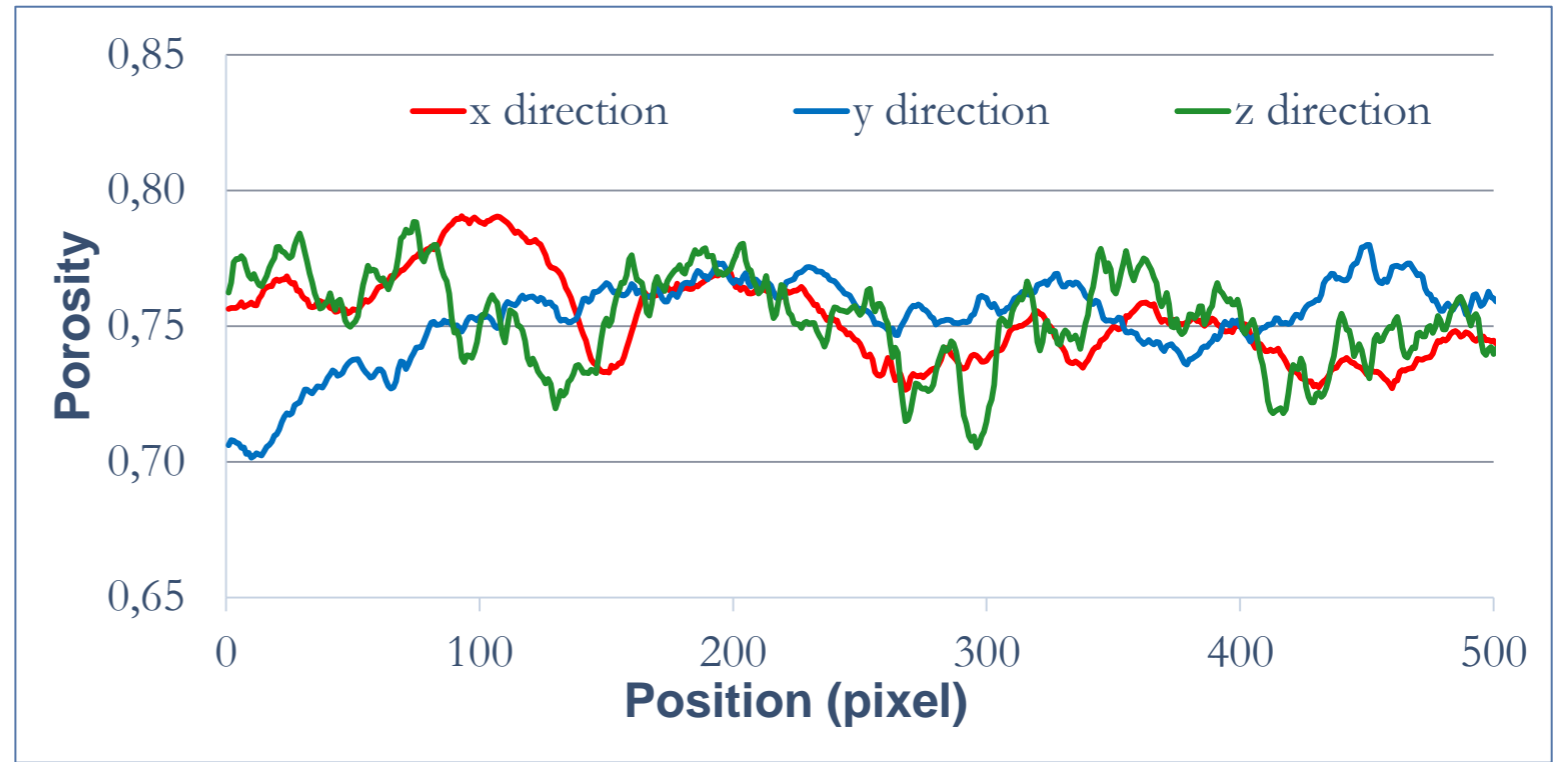
*ROI of a dried specimen with the latewood/ early wood transition in the (x,y) plane*

# Porosité...

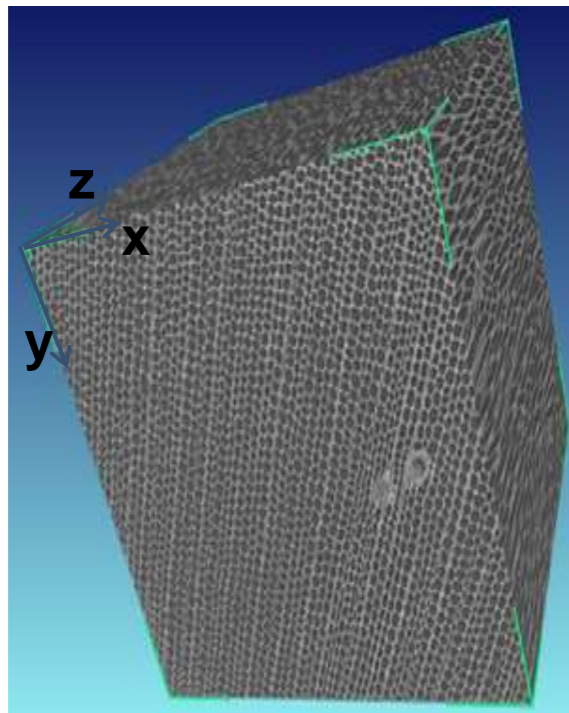
## IFB



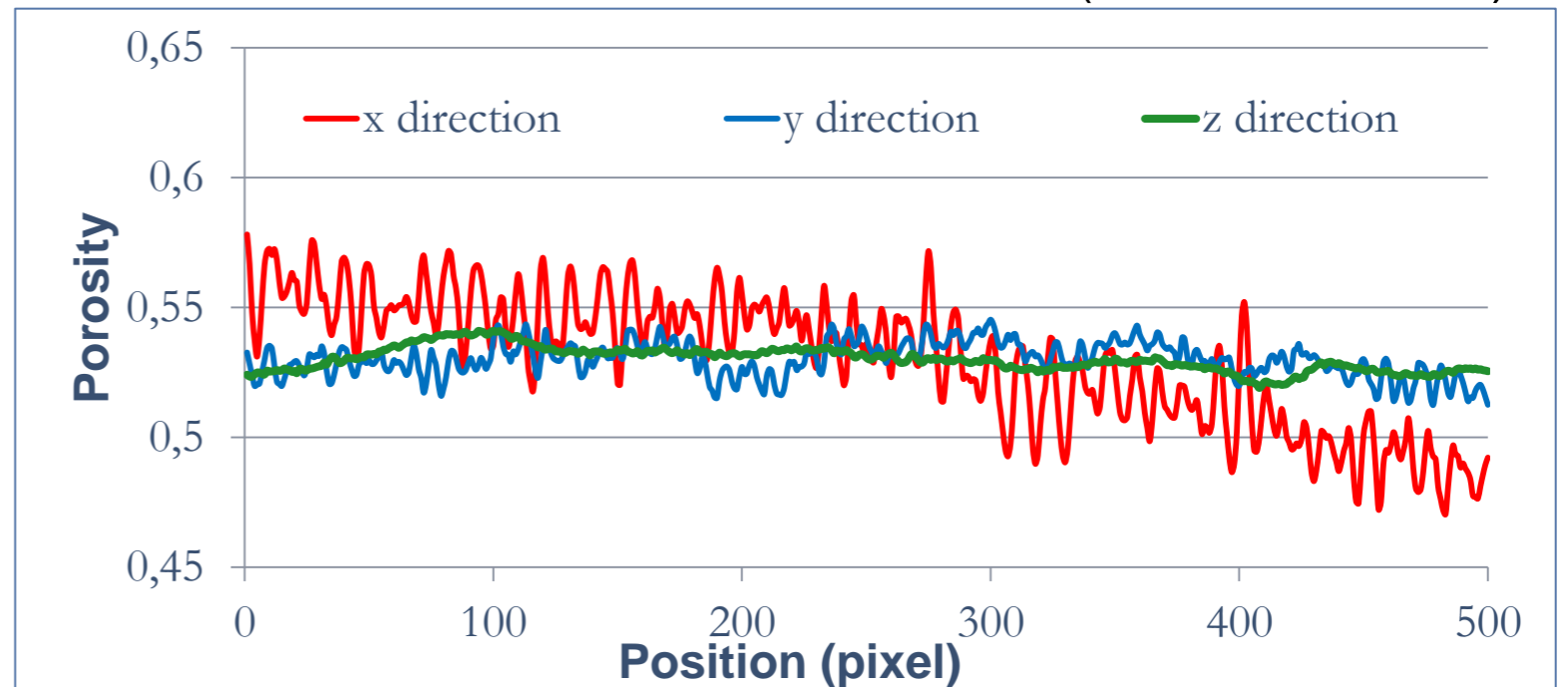
Pas de direction privilégiée concernant la porosité



## BM

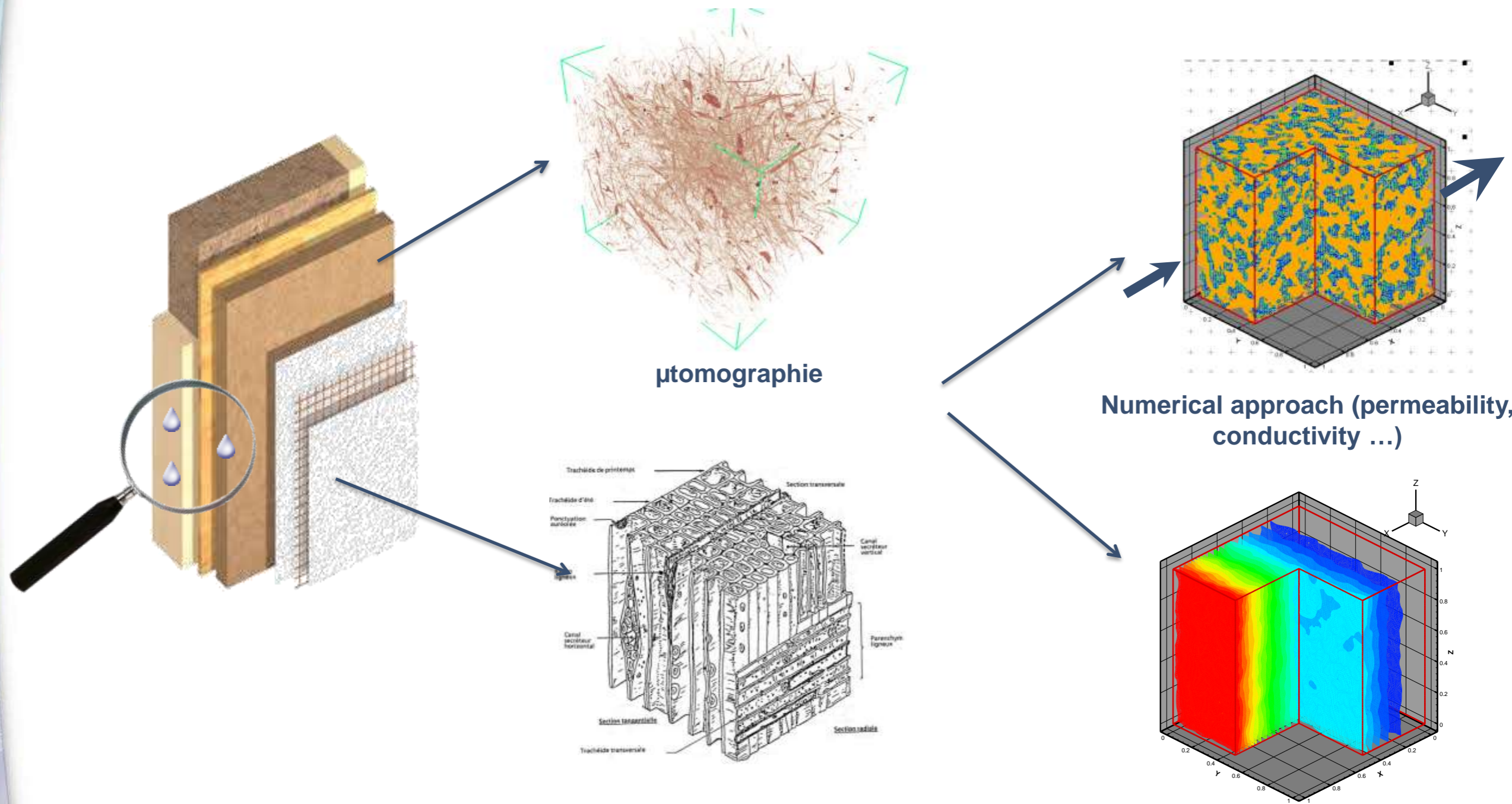


Variation standard suivant la direction z (déviation <math><0.5\%</math>)



# Micro / Macro

## Simulation des propriétés équivalentes



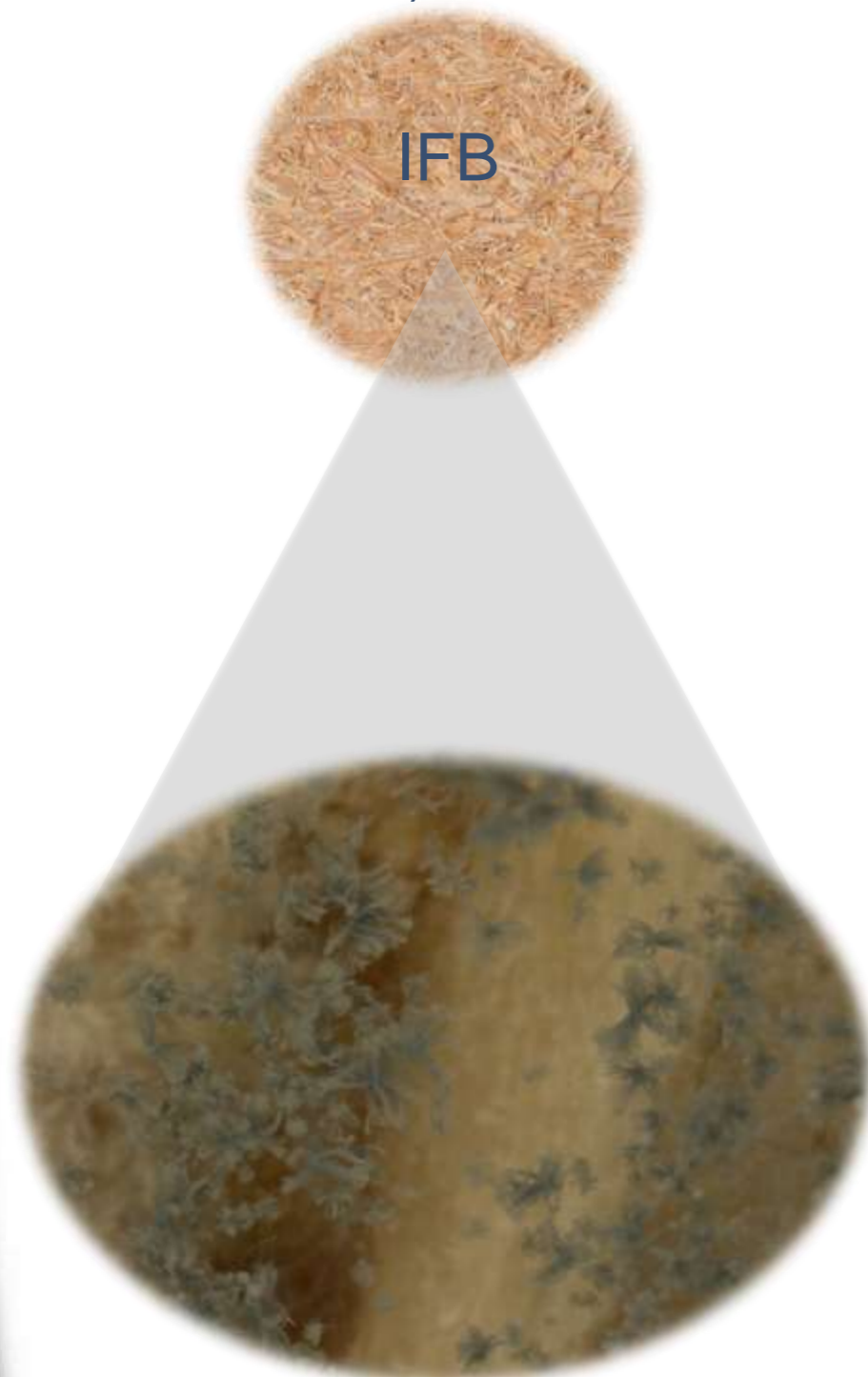
Quel est l'impact des moisissures sur la performance hygrothermique des matériaux ?



# Problématique

## Qualité des ambiances et humidité

- Allergies, maladies respiratoires croissance fongique (Radulescu, 2006; Olaleakan et al., 2006)



21  $\mu\text{m}$

$\approx 1\text{cm}^2$



21  $\mu\text{m}$

# Moisissure & durabilité

## Effets des moisissures sur la santé humaine

- Actuellement il existe plusieurs effets pathologiques nocifs pour la santé suite à l'exposition aux champignons.

Allergie



Asthme





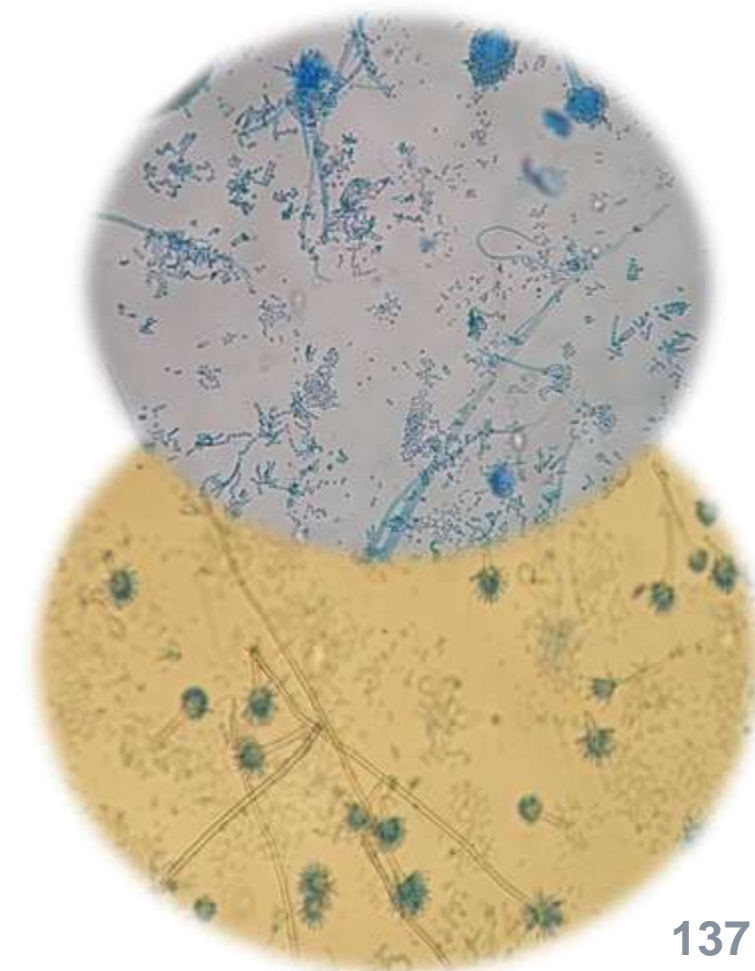
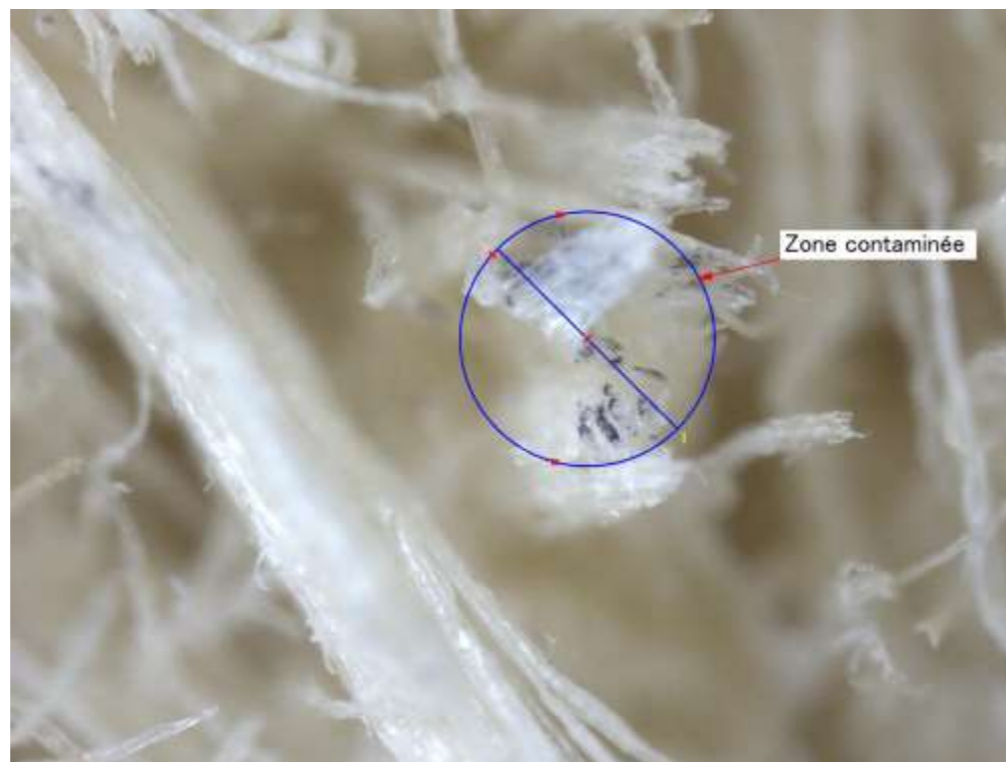
# Moisissure & durabilité

## Moisissures et leurs conditions de développement

- Les moisissures sont des champignons filamenteux, eucaryotes, sporogènes, hétérotrophes, non chlorophylliens...

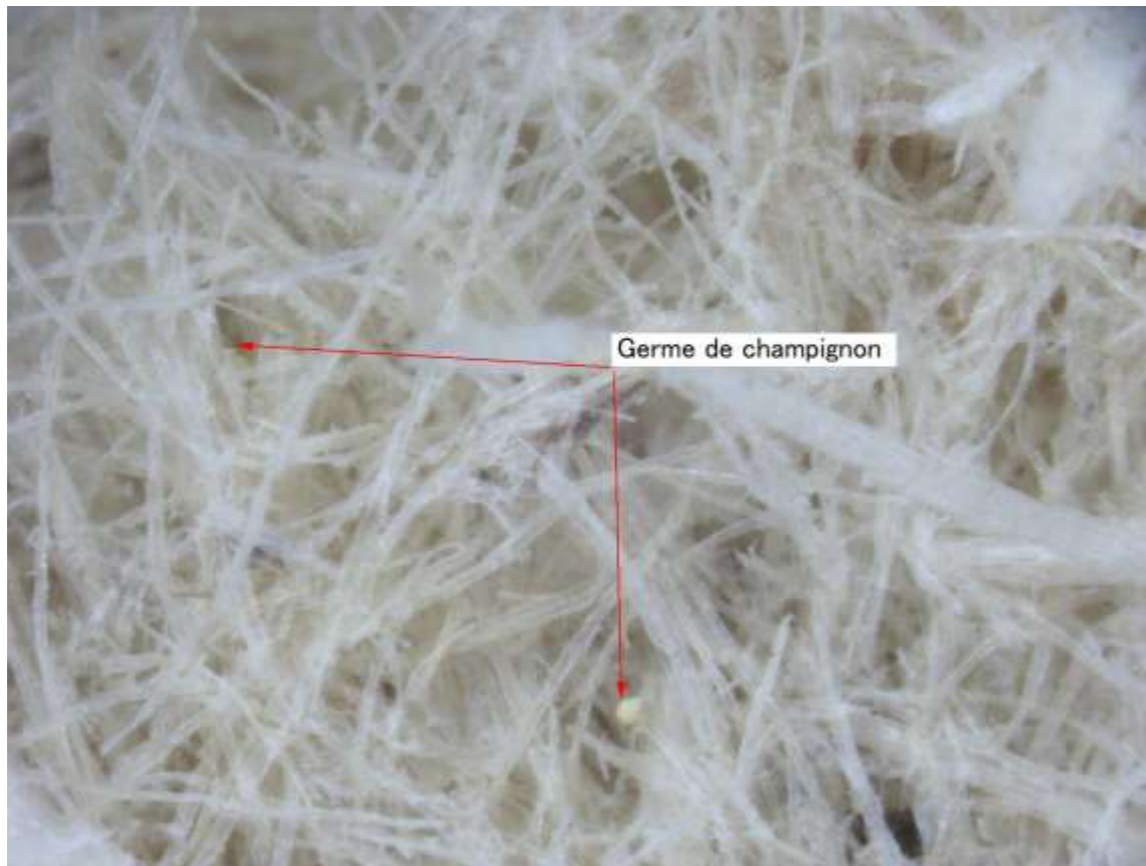
## Principales caractéristiques biologiques des moisissures

- Elles sont incapables de synthétiser leur matière organique à partir du CO<sub>2</sub>
- Elles dégradent la matrice organique complexe de matériaux biosourcés, grâce à l'excrétion d'enzymes et d'acides



# Moisissure & durabilité

## Moisissures et leurs conditions de développement



# Moisissure & durabilité



## Reproduction

- La reproduction des champignons est difficile à comprendre, du fait de l'hétérogénéité de leur mode de vie. Elle peut être sexuée ou asexuée.



## Catégories

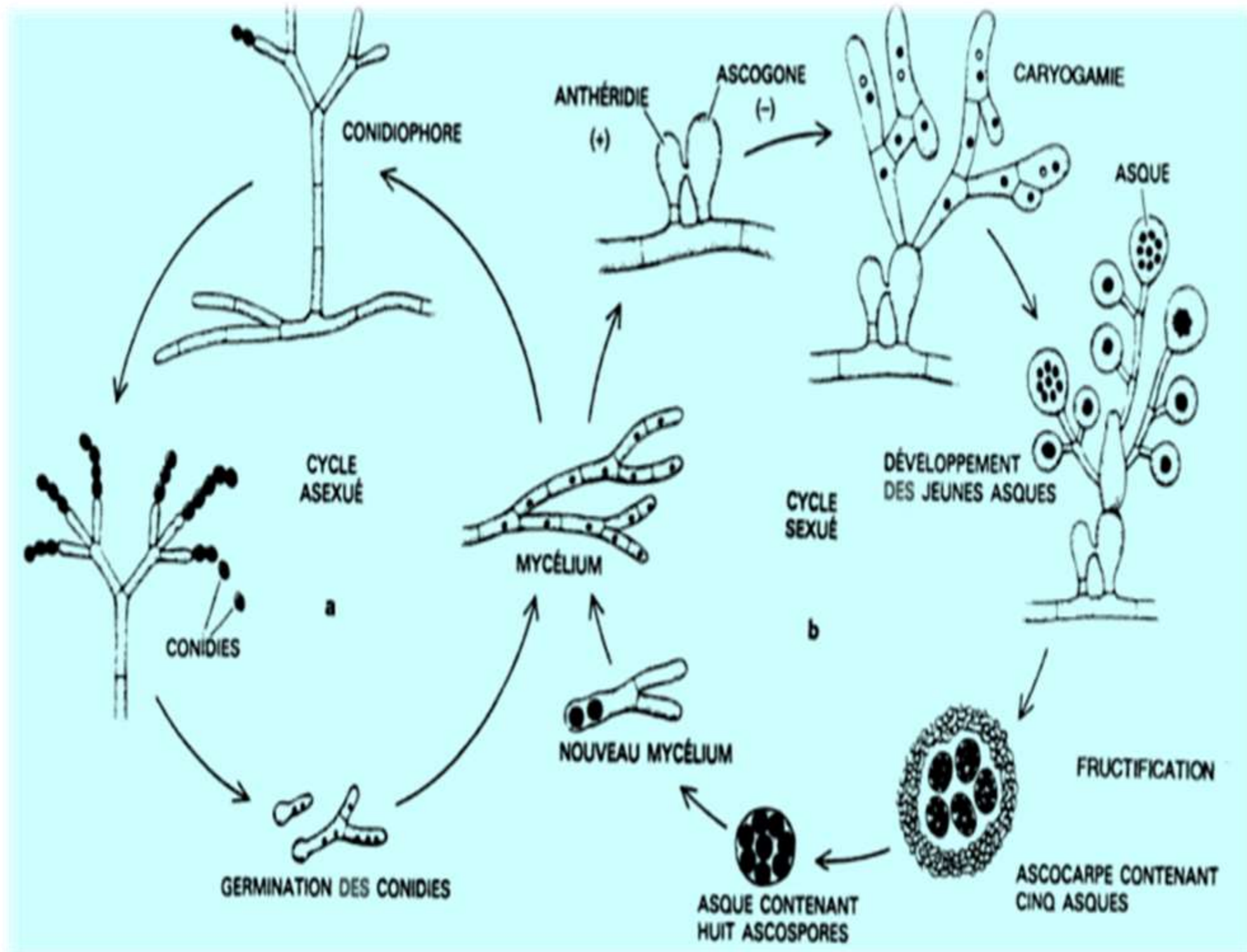
=> Il existe cinq catégories:

- Reproduction sexuée: Chytridiomycètes, Zygomycètes, Basidiomycètes et Ascomycètes.
- Reproduction asexuée: Deutéromycètes

# Moisissure & durabilité



## Reproduction sexuée et asexuée





## Littérature

Travaux des Finlandais (Kimmo Lähdesmäki et al.) et suédois (Pernilla Johansson et al.) s'intéressaient à la croissance des moisissures en fonction de HR et T ...

### => Modèle de Hukka et Vittanen

$$M_{\max} = A + B \frac{HR_{\text{crit}} - HR}{HR_{\text{crit}} - 100} - C \left( \frac{HR_{\text{crit}} - HR}{HR_{\text{crit}} - 100} \right)^2$$

$$HR_{\text{crit}} = -0.00267 T^3 + 0.160 T^2 - 3.13 T + 100.0 \quad \text{si } T < 20^\circ \text{C}$$

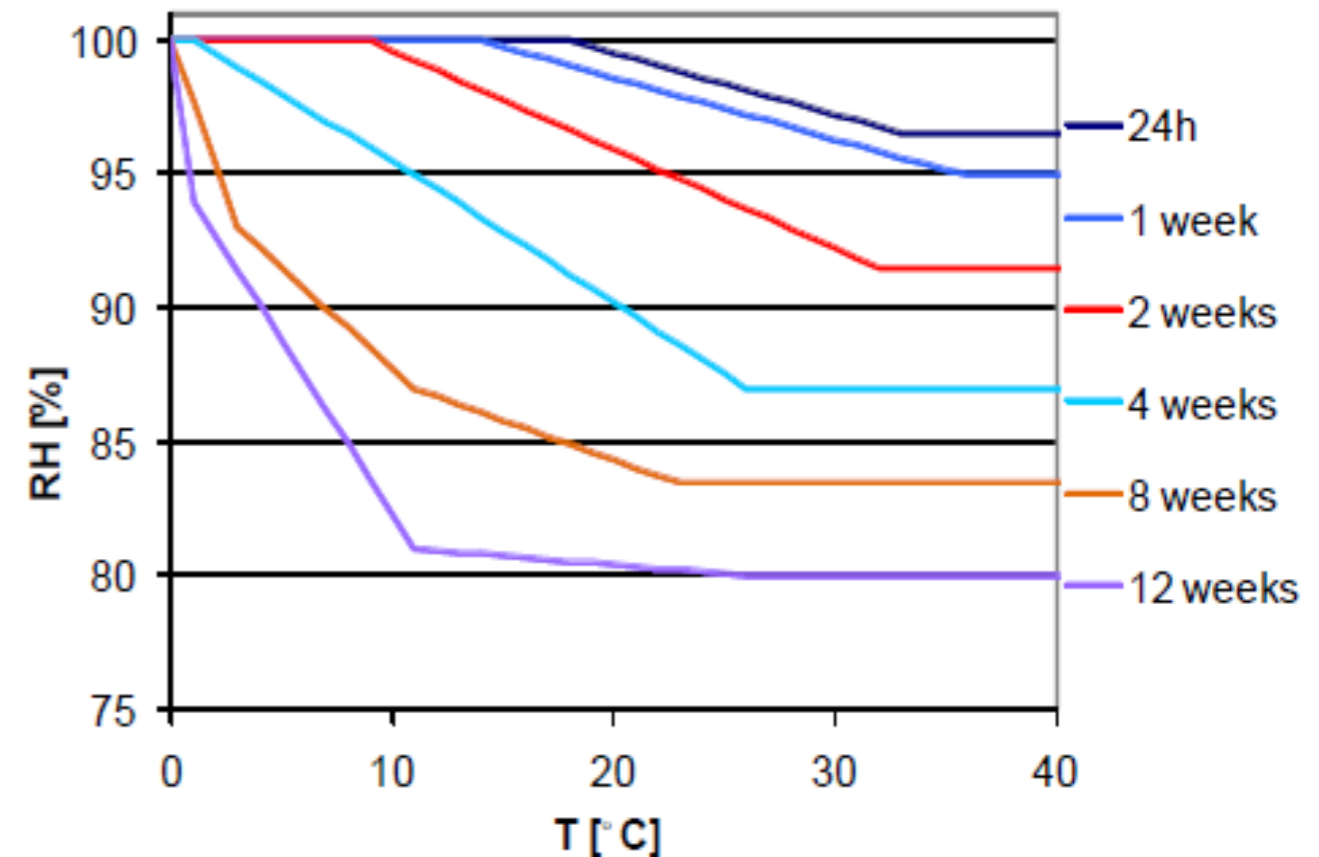
$$HR_{\text{crit}} = 80 \% \quad \text{si } T > 20^\circ \text{C}$$



Prendre en compte le paramètre lumière et se positionner dans des conditions représentatives du bâtiments ...

## Principaux objectifs

- Suivre le développement de moisissures sous influence des différentes conditions ( HR, T, lumière,...)
- Évaluer la surface de contamination via FIJI
- Comparer les résultats obtenus avec la littérature
- Identifier les espèces développées...



# Protocole expérimental

44%

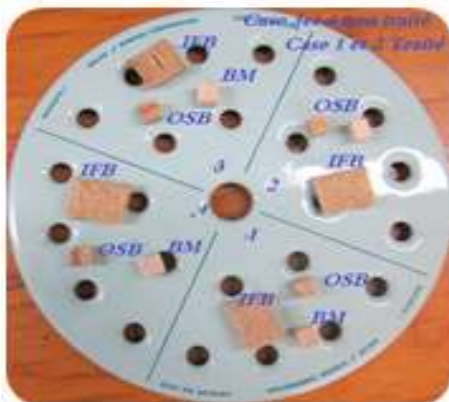
76%

84%

92%

99%

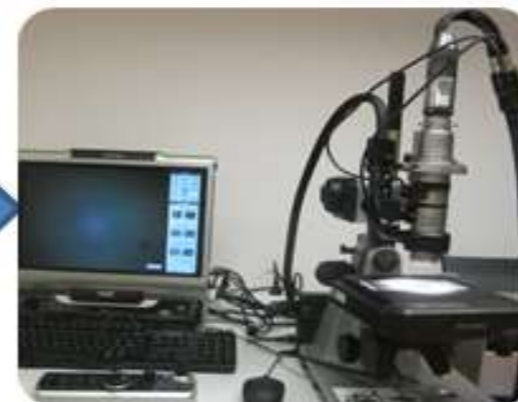
Préparation des échantillons



Sollicitation avec des conditions HR différentes et effet de lumière



Observation de développement de moisissure par le microscope



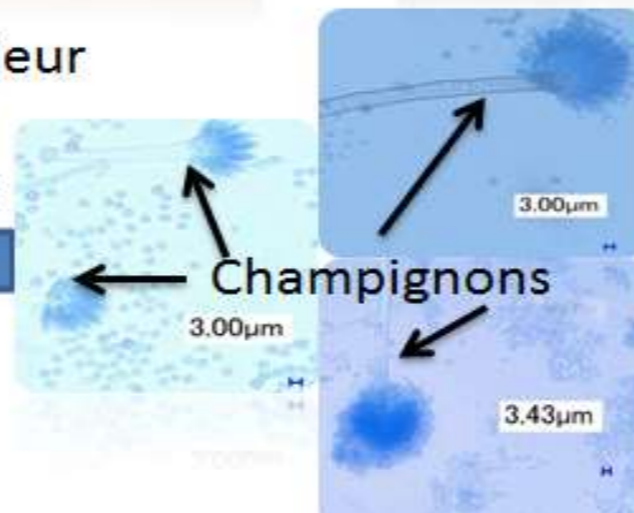
Détermination de l'indice (M) à l'aide de Fiji. \*\*



Culture



Déduction de leur impact sur la structure



Identification des espèces

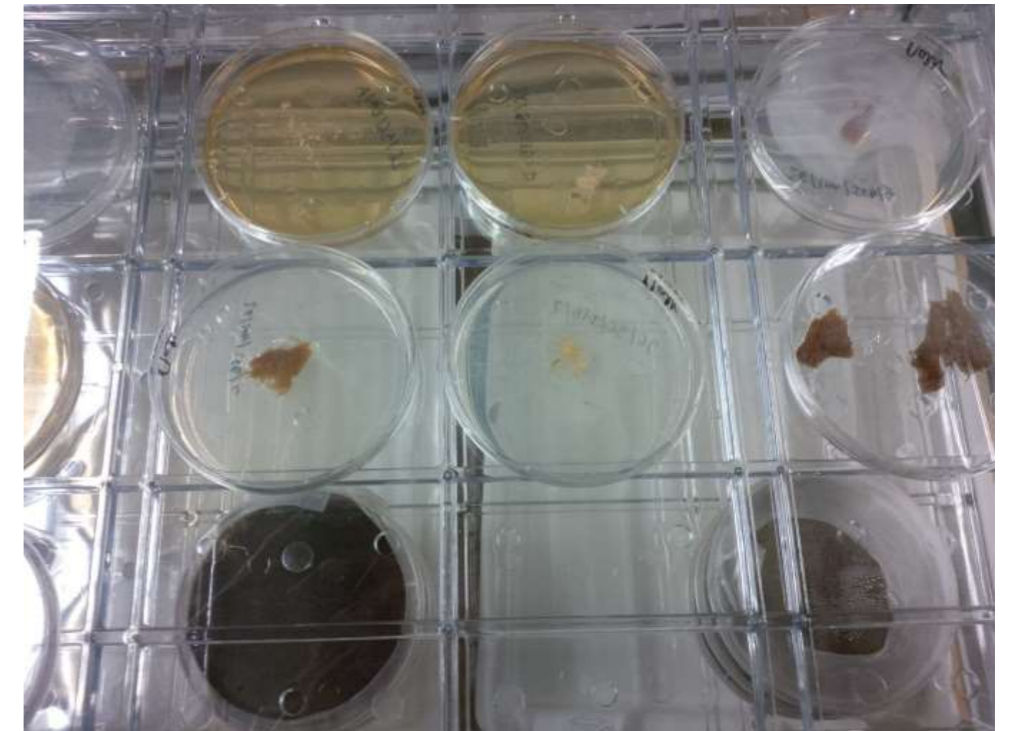
# Moisissure & durabilité

## Démarche expérimentale

Autoclave => traitement du bois



Culture des champignons dans un milieu savoraux



Conditionnement à température constante



Champignon + bleu de coton pour observation microscopique



Croissance des champignons



# Moisissure & durabilité



## Démarche expérimentale

Autoclave => traitement du bois



# Moissure & durabilité

- Evaluation des risques de moisissure par :
  - Approches déterministe sous conditions hydriques variables
  - Mesure d'indice de moisissure (M)
  - Estimation du temps de germination



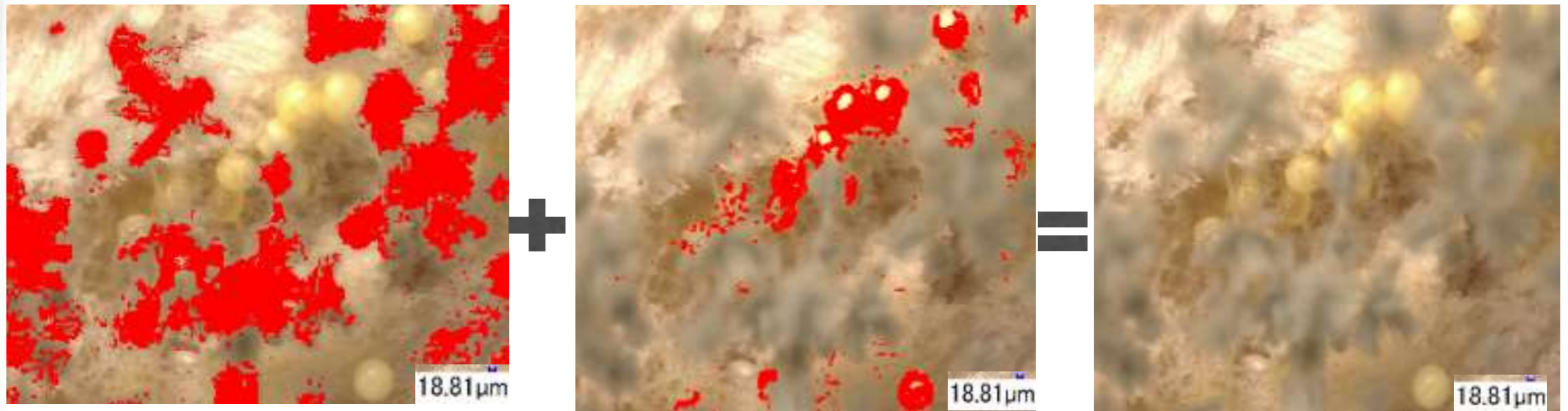
Analyse microscopique

M > 1 possibilité de développement de moisissures dans le matériau



# Moisissure & durabilité

Quantification microscopique de la croissance des moisissure dans l'IFB



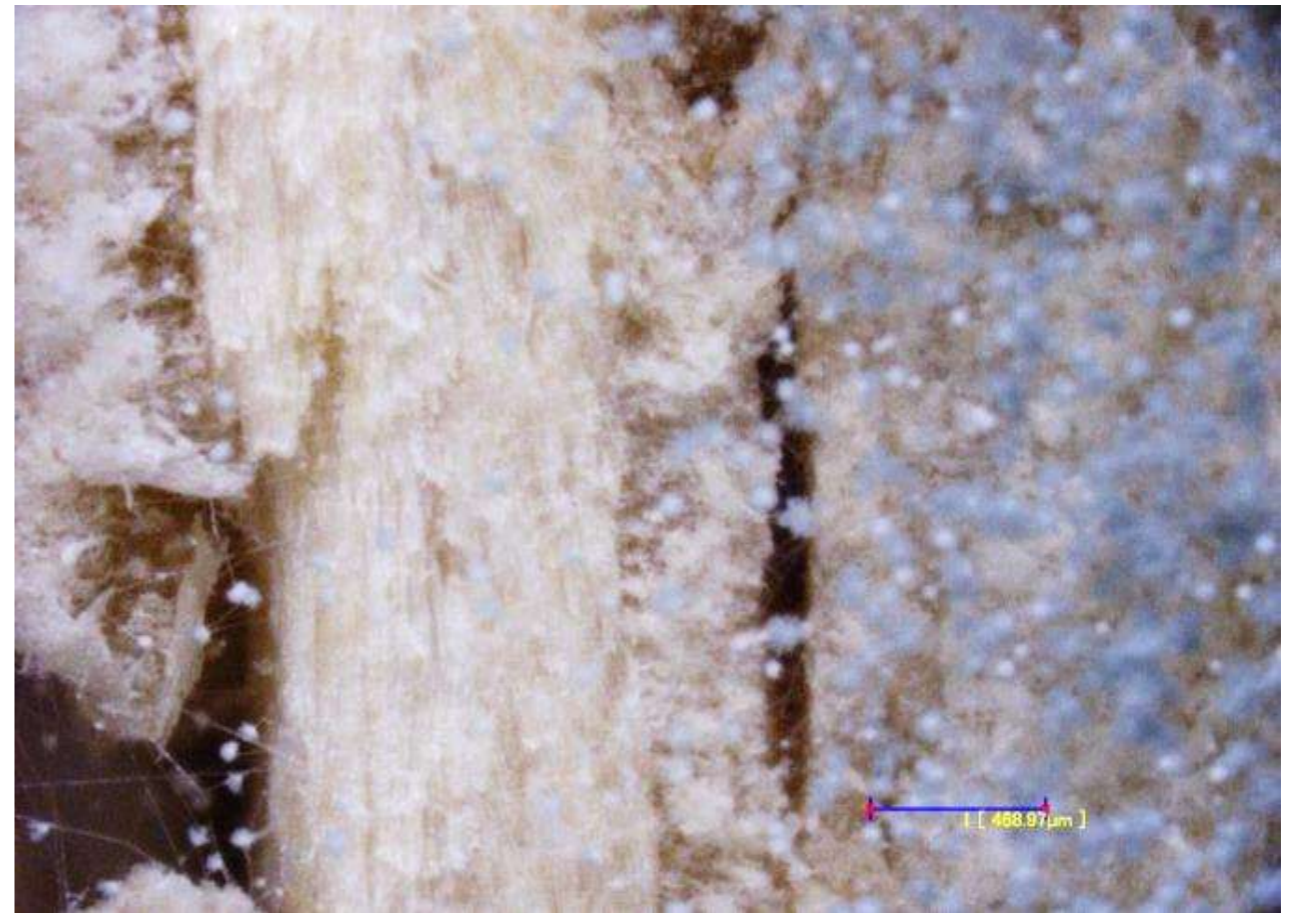
=> Détermination de l'indice M de développement du moisissure

# Moisissure & durabilité

Quantification microscopique de la croissance des moisissure dans l'IFB, BM, OSB



BM



Observation OSB après 2 semaine d'exposition à 98% HR

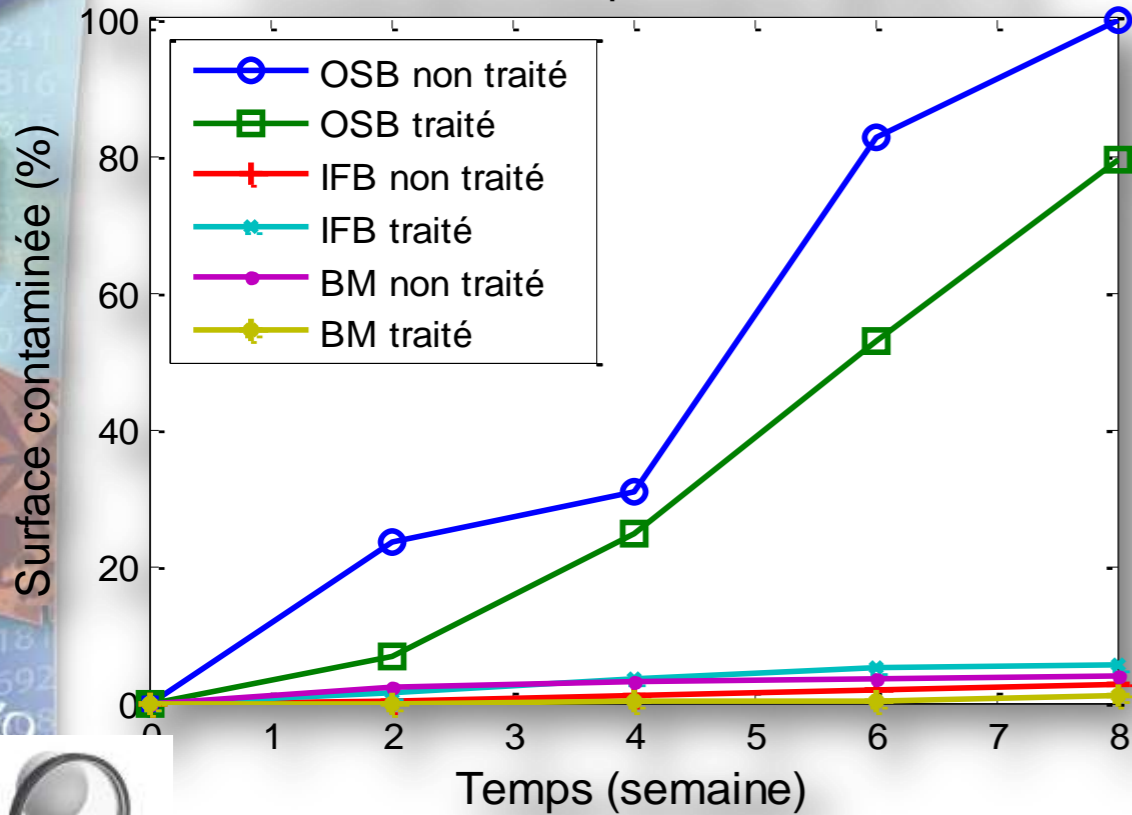


IFB

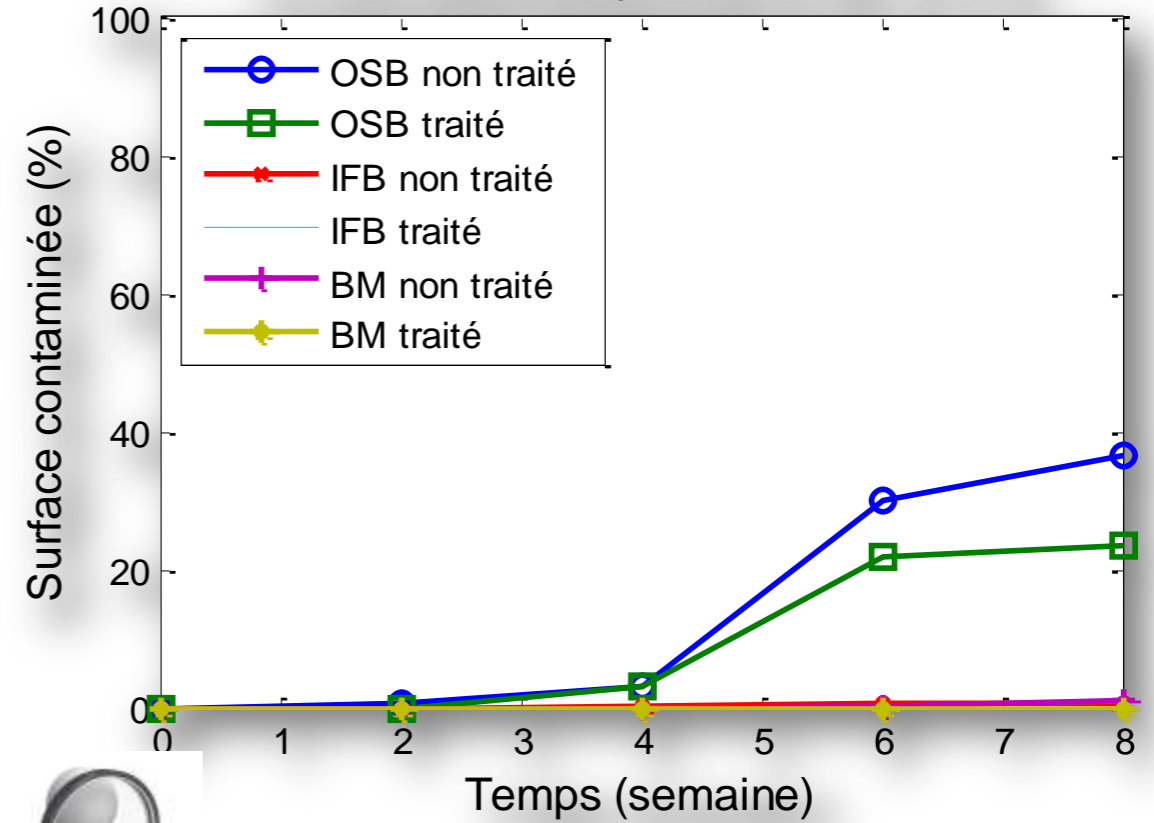
# Moisissure & durabilité

## Influence de HR sur l'indice M

Dessiccateur transparent de HR 99.4 %

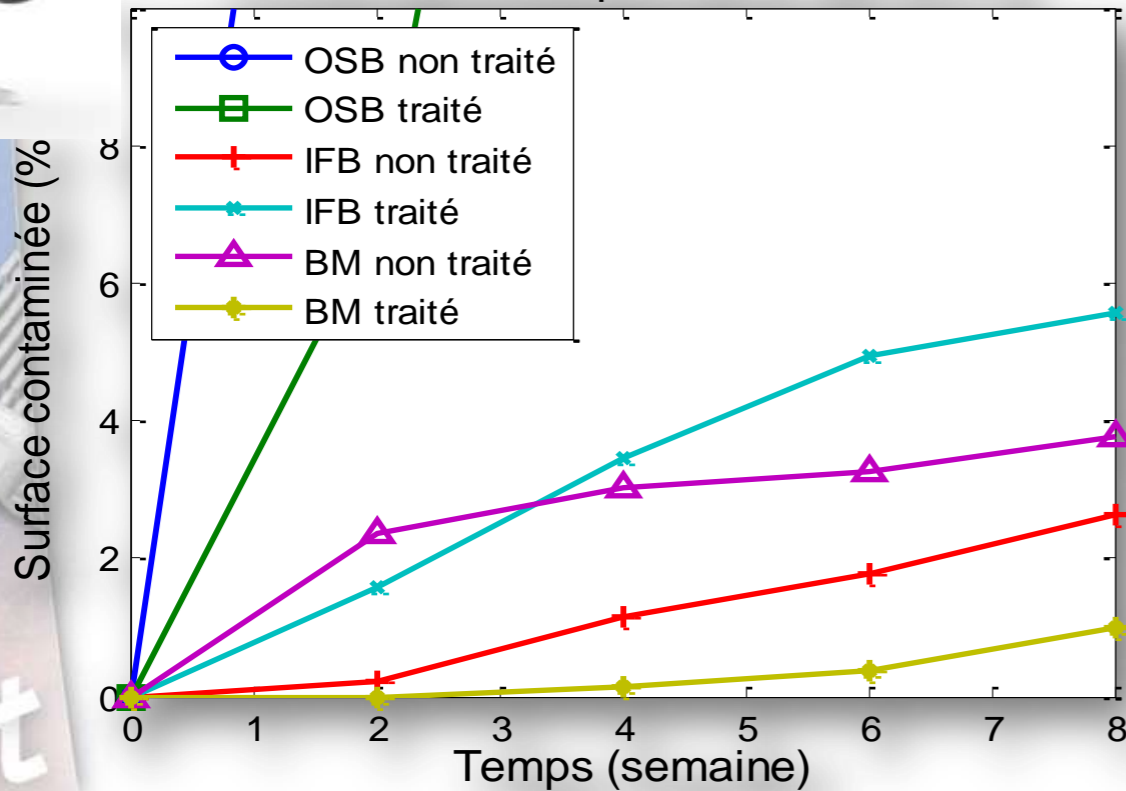


Dessiccateur transparent de HR 92.8 %

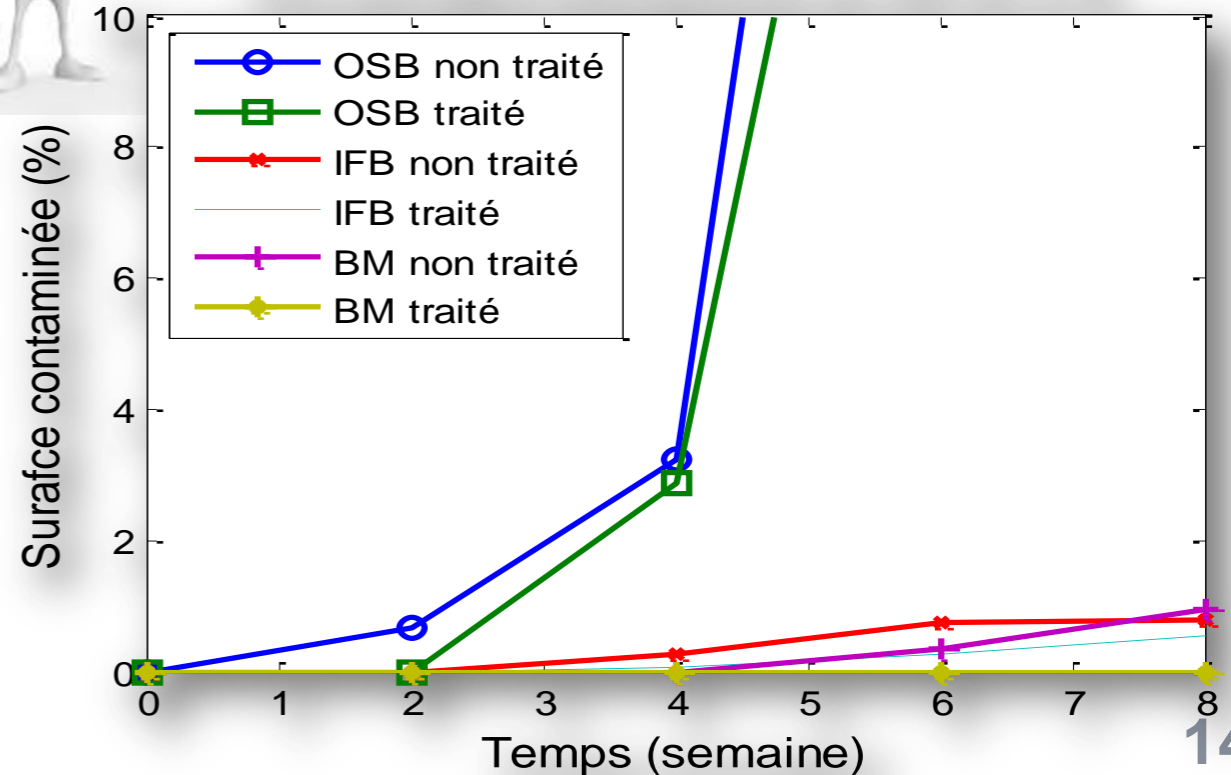


≠

Dessiccateur transparent de HR 99.4 %

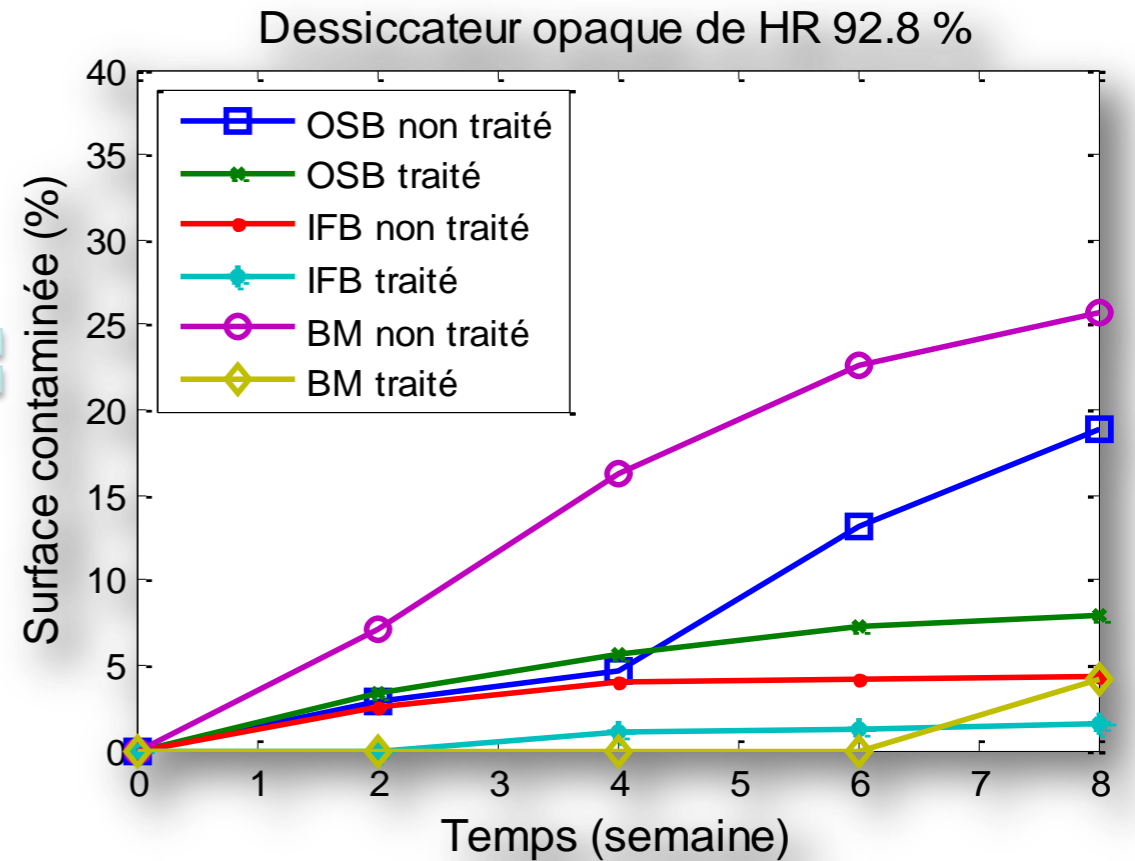
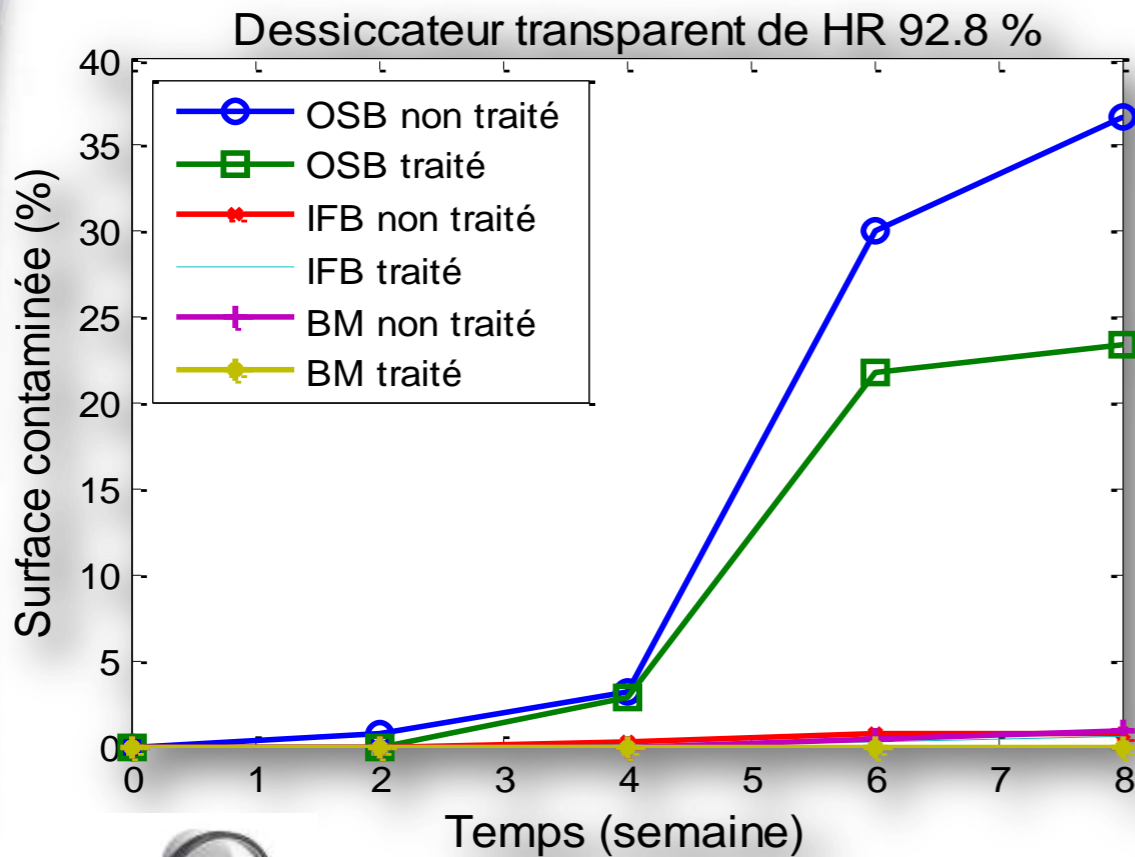


Dessiccateur transparent de HR 92.8 %

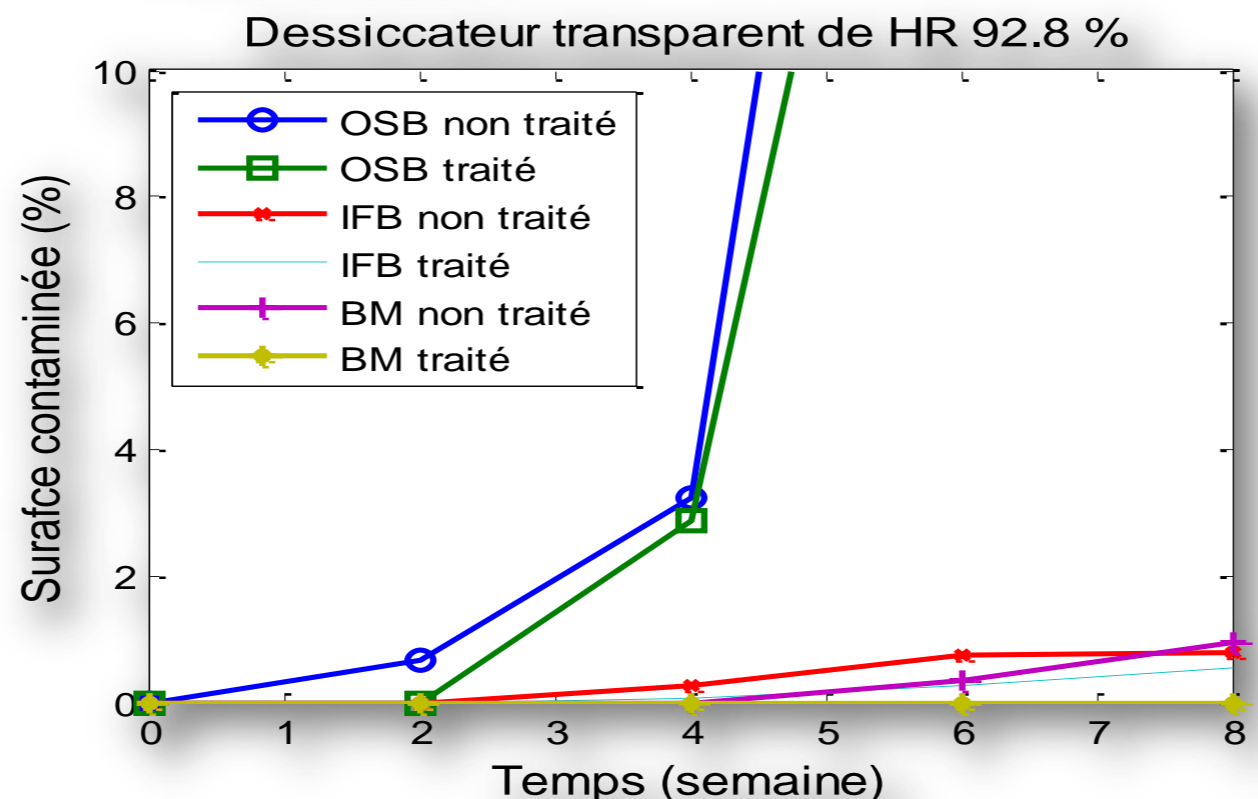


# Moisissure & durabilité

## Influence de la lumière sur l'indice M



≠



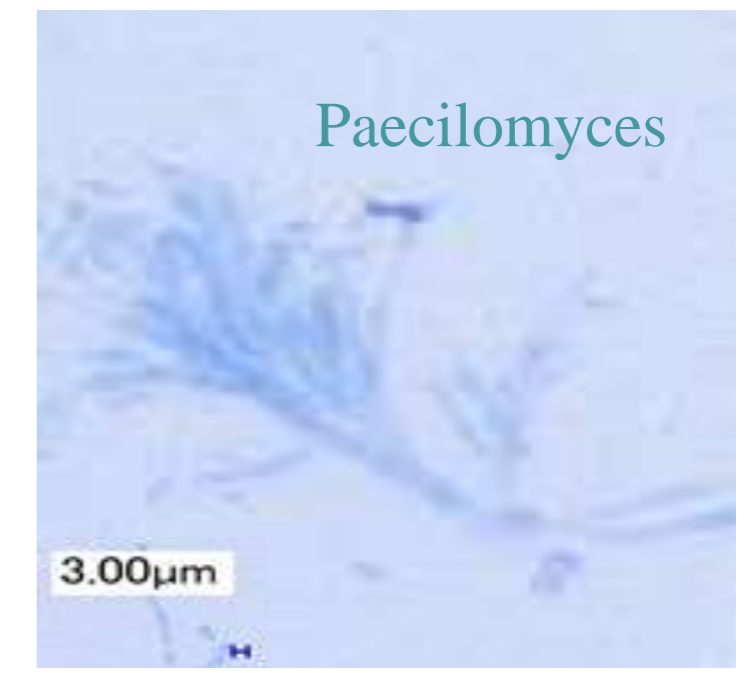
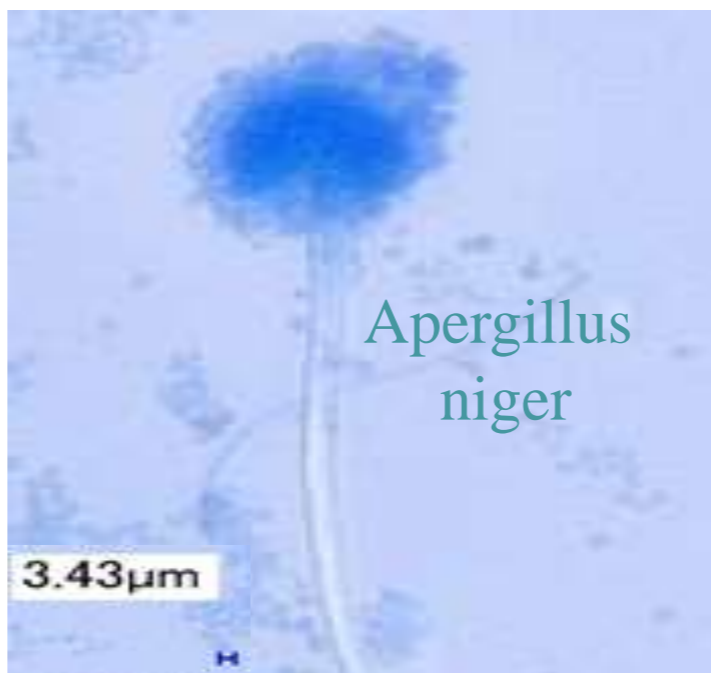
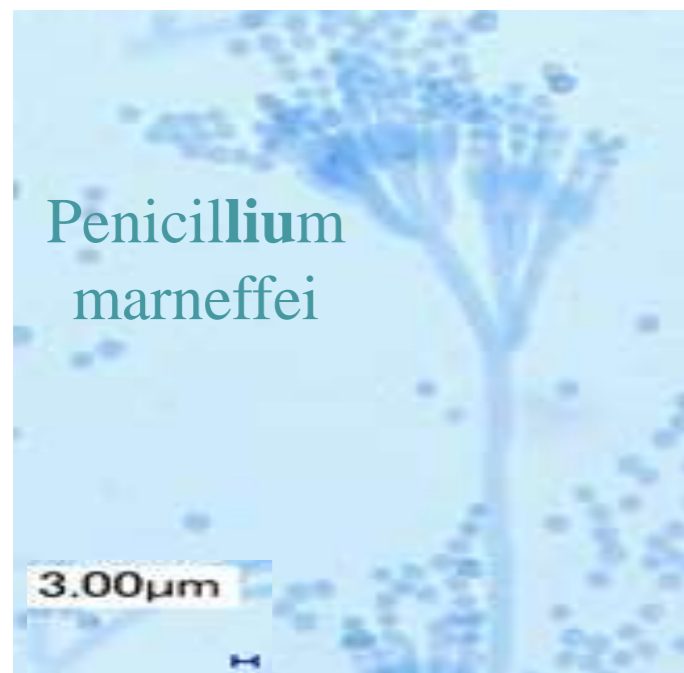
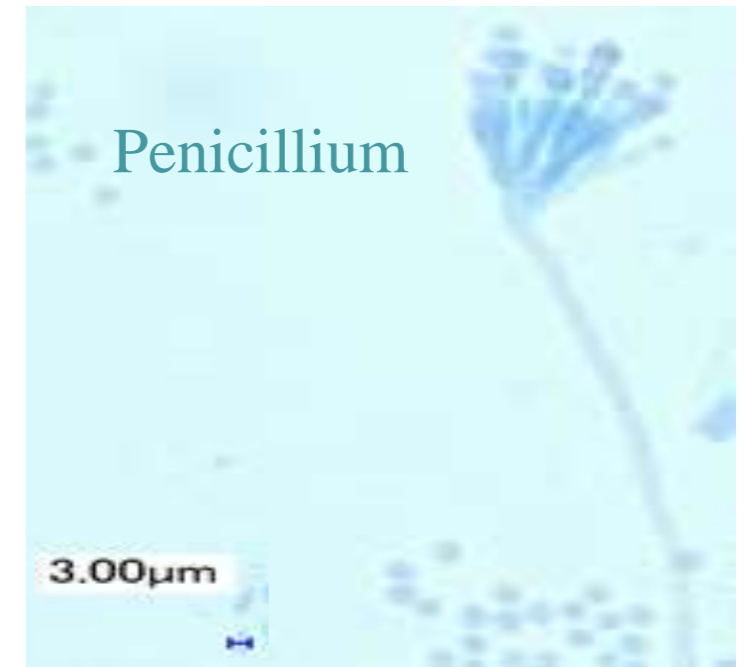
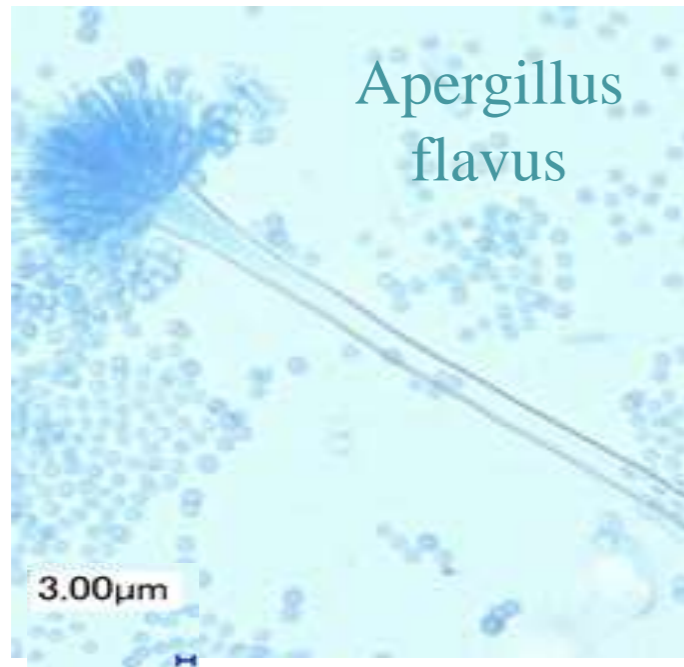
# Moisissure & durabilité

## Champignons identifiés dans les différentes conditions

Bois	HR%	Eclairage	Espèces identifiées
OSB	99.4	Transparent	Penicillium, Penicillium marneffeii, Scopulariopsis, Aspergillus nidulans
OSB	92.8	Transparent	Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus niger, Penicillium marneffeii
OSB	92.8	Opaque	Scopulariopsis, Penicillium
OSB	84.3	Transparent	Asp flavus, Asp niger, Scopulariopsis, Pnicillium, Cladosporium cladosporioides, Paecilomyces
IFB	99.4	Transparent	non identifiée, Aspergillus fumigatus, Paecilomyces
IFB	92.8	Transparent	Penicillium cladosporium
IFB	92.8	Opaque	Aspergillus flavus, Scopulariopsis, Espèce non identifiée, Penicillium
BM	99.4	Transparent	Scopulariopsis, Penicillium
BM	92.8	Transparent	Penicillium
BM	92.8	Opaque	Penicillium, Aspergillus flavus

# Moisissure & durabilité

## Champignons identifiés sous microscope Keyence





# Annexes



# Autres solutions ?



## Perspective

### Toitures végétalisées

*L'Historial de la Vendée, France*



### Façades végétalisées

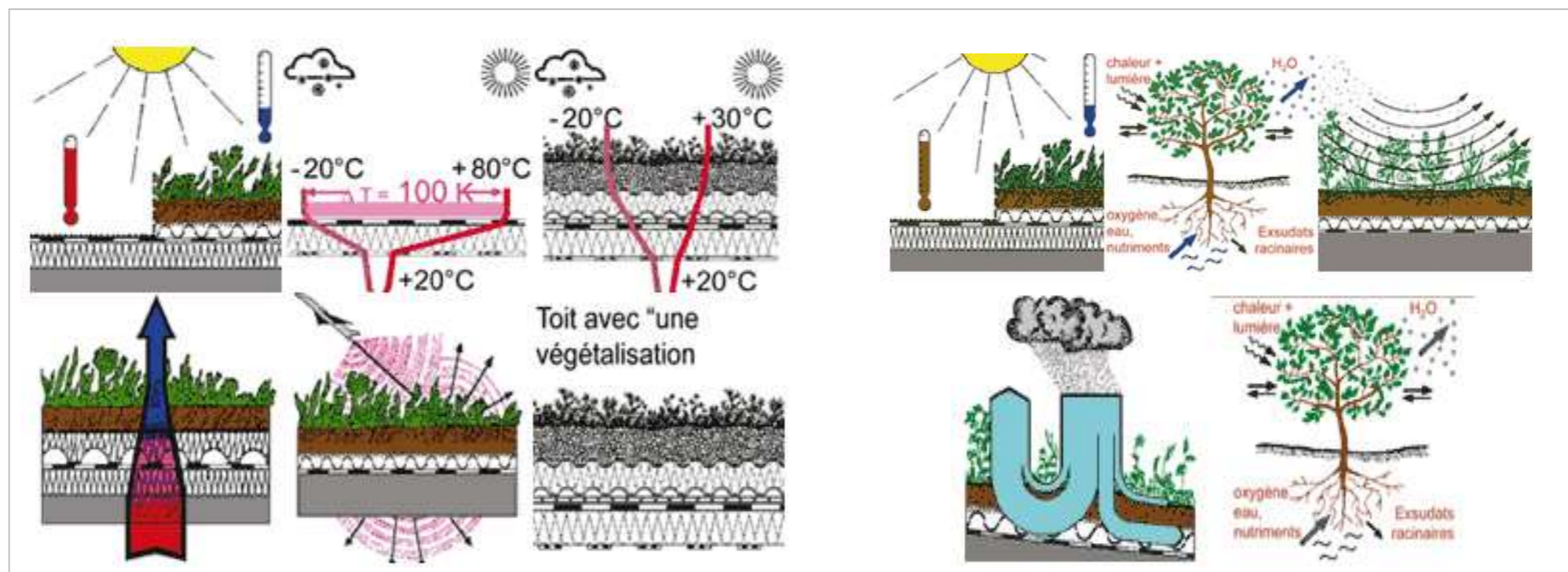
*Les Halles d'Avignon*



## Autres solutions ?

### Divers bénéfiques des enveloppes végétalisées

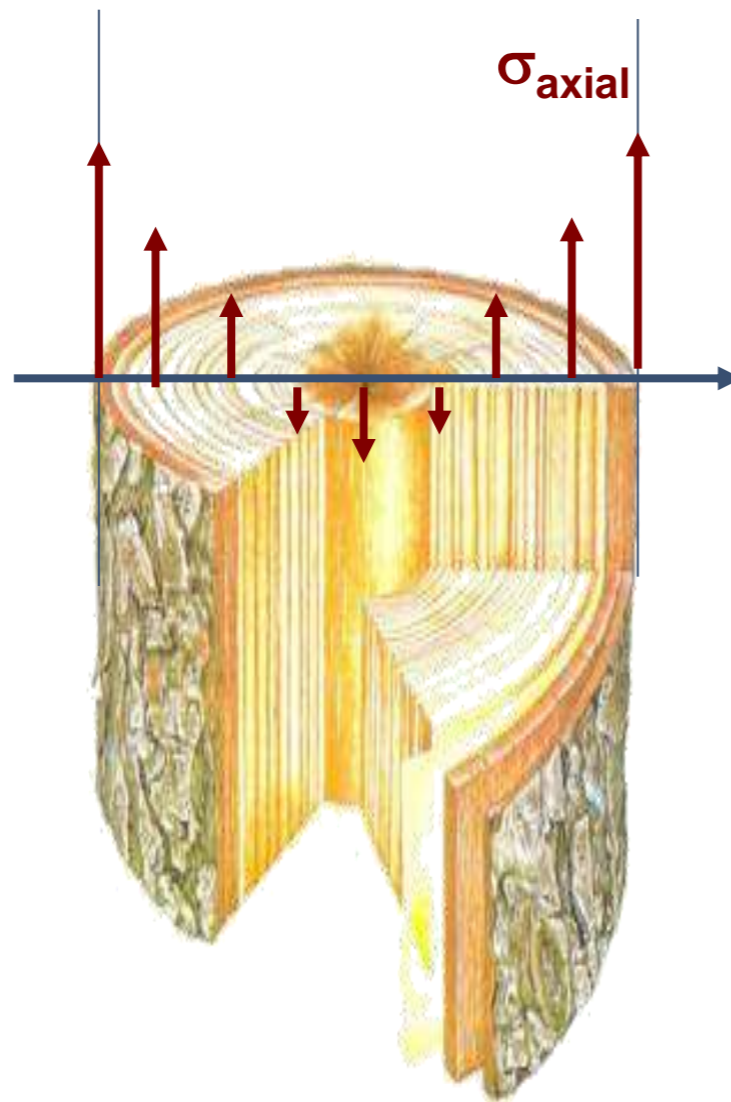
- Rétention de l'eau pluviale et dépollution des eaux de ruissellement
- Amélioration de la qualité de l'air urbain
- Isolation acoustique
- Réduction des charges thermiques des bâtiments
- Augmentation de la durée de vie de la membrane d'étanchéité à travers la réduction des pics et fluctuations de sa température
- Amélioration du microclimat des centres villes
- Valeur esthétique





# De l'arbre au bois

## Un matériau précontraint



Tension en périphérie  
Compression à coeur

**Contrainte de croissance**  
=  
**contrainte de support**  
+  
**contrainte de maturation**

# De l'arbre au bois

## Le bois => matériau précontraint

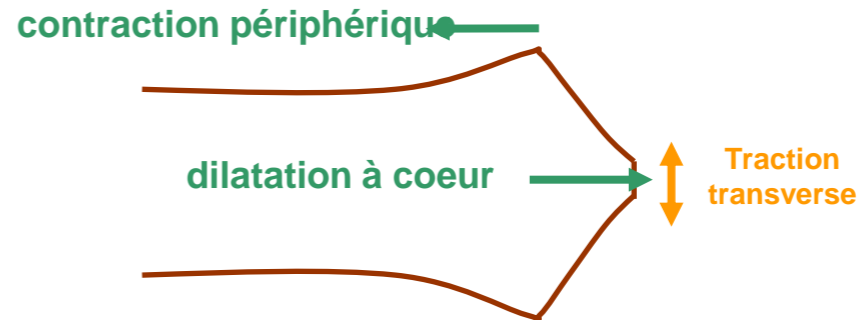
### Aspects positifs

- le bois résiste mieux en traction axiale
- permet à l'arbre de tenir droit (= haubanage actif)



### Aspects négatifs

- Lors de l'abattage les précontraintes se libèrent : la périphérie initialement tendue se contracte, le cœur se dilate  
→ fentes à coeur



Eucalyptus en Afrique du Sud

# Porosité



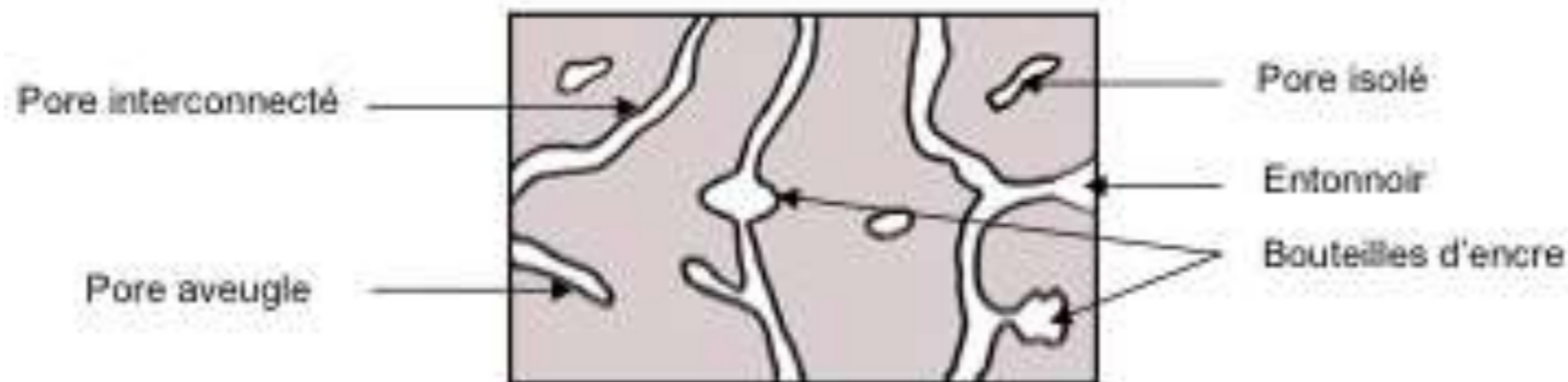
## Porosimétrie au mercure



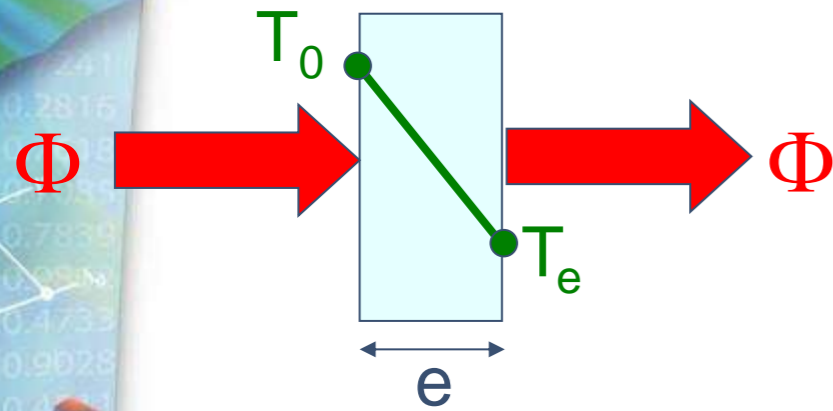
Le caractère d'invasion est l'une des limites de la méthode de porosimétrie à mercure

En réalité le mercure n'accède qu'à des pores qui sont interconnectés !

=> la principale limite de la porosimétrie au mercure trouve son origine dans l'effet couramment appelé « **Effet bouteille d'encre** » où le volume des classes de pores les plus fins est sous estimé



# Méthode stationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Conductivimétrie'



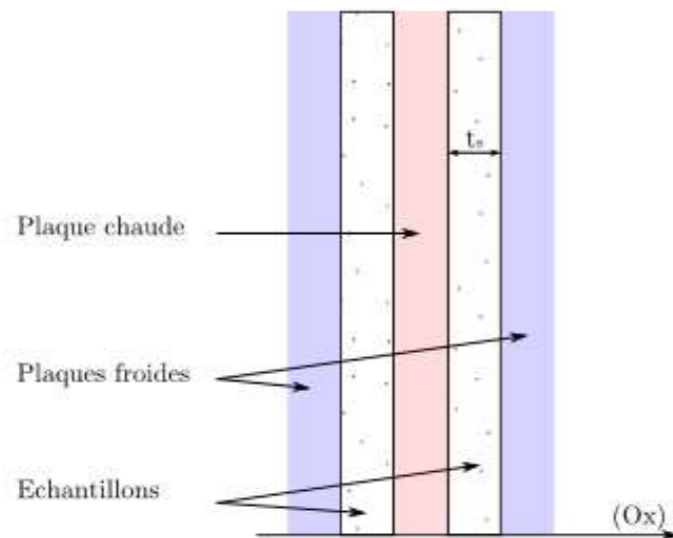
Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
<p><b>Résistance thermique (K/W)</b></p> $R_{th} = \frac{e}{k} = \frac{T_0 - T_e}{\Phi}$ <p><math>k</math> = conductivité thermique en <math>Wm^{-1}K^{-1}</math></p>	<p>- Épaisseur <math>e</math></p> $k = \frac{e}{R_{th}}$

$$\begin{cases} \nabla^2 T(x) = 0 \\ T(0) = T_c \text{ et } T(t_s) = T_f \end{cases}$$

$$T(x) = T_c + \frac{(T_f - T_c)}{t_s} x$$

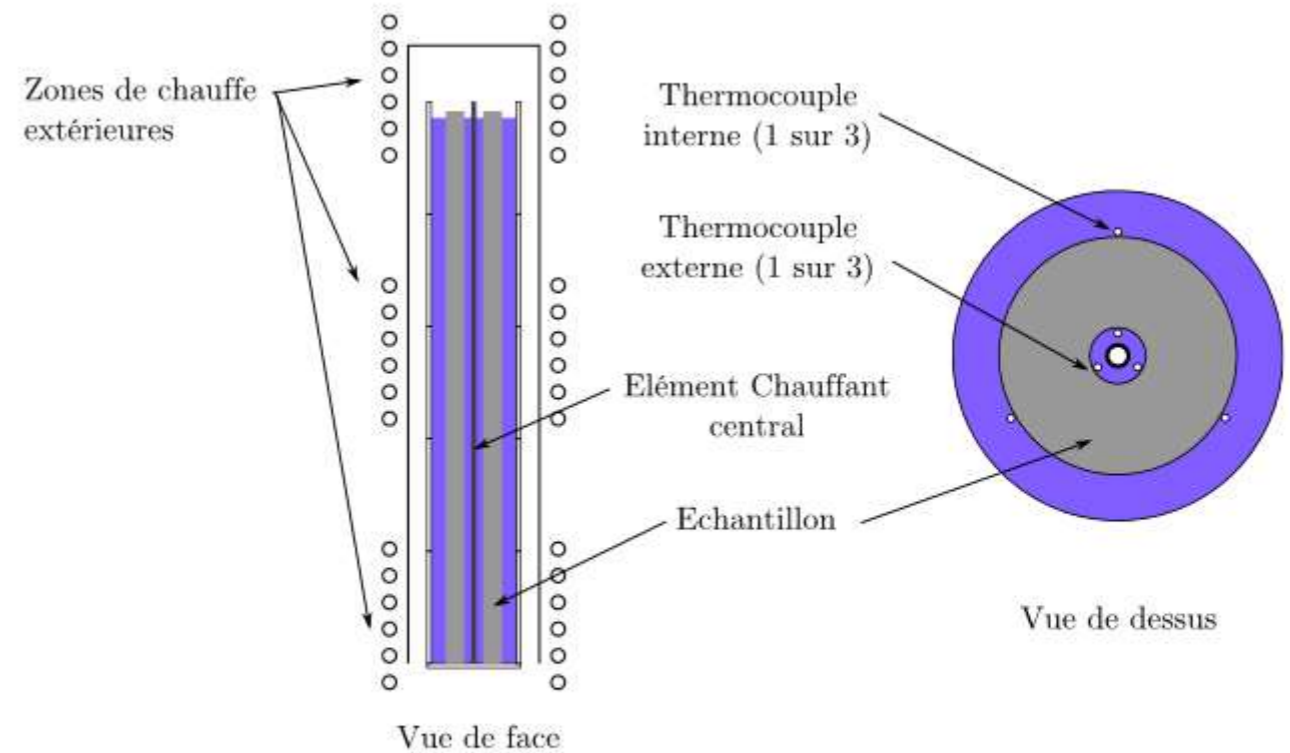
$$\frac{\phi}{2} = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta T S}{t_s}$$

$$\lambda = \frac{\phi t_s}{2S \Delta T}$$



Plaque chaude gardée - Schéma de principe pour la méthode de la plaque

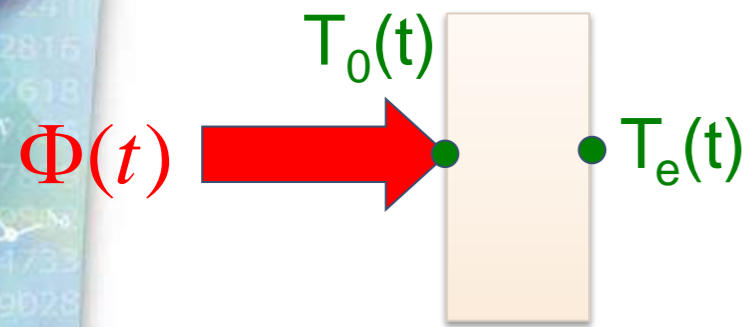
chaude gardée.



Instrument de mesure basé sur la méthode du flux radial - Illustration adaptée de *Thermal Analysis of materials* [24], détaillant les éléments constitutifs d'un instrument à flux radial.



# Méthode instationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Diffusivimétrie'



Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
<p><b>Temps diffusif (s)</b> <math>t_{diff} = \frac{e^2}{a}</math></p> <p>avec <math>a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \left(\frac{k}{b}\right)^2</math></p> <p><math>a</math> = diffusivité thermique en <math>m^2/s</math></p>	<p>- Épaisseur <math>e</math></p> <p>- Capacité calorifique <math>\rho \cdot C_p</math> volumique ou effusivité <math>b</math></p> <p><math>k = \frac{\rho \cdot C_p}{t_{diff}} e^2</math> ou <math>k = \sqrt{\frac{b}{t_{diff}}} e</math></p>

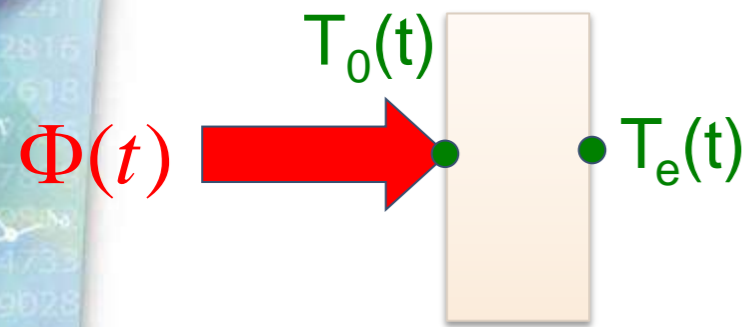
- **Modèle moins simple** : équation de la chaleur instationnaire 1D

- **Identification** de la conductivité **moins simple** : problème d'estimation non-linéaire de plusieurs paramètres (minimisation moindre carrés mesures-modèle). Identification **préliminaire de la diffusivité**

- **Expérience moins difficile** :

- garantir un transfert 1D : excitation uniforme et pas de pertes latérales
- mesure seulement d'un thermogramme ( $T(t)$  en face arrière ou avant)
- la mesure du flux absorbé est inutile, il fait partie des paramètres estimés

# Méthode instationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Diffusivimétrie'



Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
<p><b>Temps diffusif (s)</b> <math>t_{diff} = \frac{e^2}{a}</math></p> <p>avec <math>a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \left(\frac{k}{b}\right)^2</math></p> <p><math>a</math> = diffusivité thermique en <math>m^2/s</math></p>	<p>- Épaisseur <math>e</math></p> <p>- Capacité calorifique <math>\rho \cdot C_p</math> volumique ou effusivité <math>b</math></p> <p><math>k = \frac{\rho \cdot C_p \cdot e^2}{t_{diff}}</math> ou <math>k = \sqrt{\frac{b}{t_{diff}}} \cdot e</math></p>

Équation de la chaleur en géométrie cylindrique  $(r, \theta, z)$  :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{P}{\rho C_p} \quad \text{avec} \quad D = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

Équation de la chaleur en géométrie cylindrique infinie :

$$\frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{avec} \quad D = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

Hypothèses du problème simplifié :

- milieu semi-infini ;
- échantillon initial isotherme ;
- puissance injectée connue.

Méthode de l'asymptote linéaire aux temps longs :

La conductivité thermique du matériau est estimée à partir du coefficient directeur de la régression linéaire de la courbe représentant la variation de  $[T_s(t) - T_s(t=0)]$  en fonction de  $\ln(t)$  :

$$T_s(t) - T_s(t=0) \approx \frac{\Phi}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \Phi \left( R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{D}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right)$$

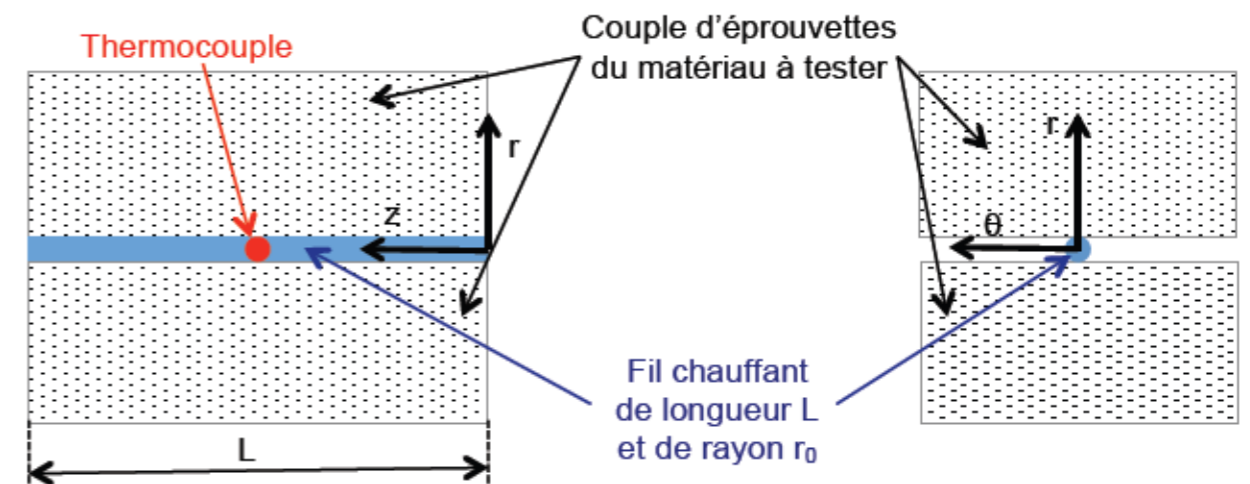
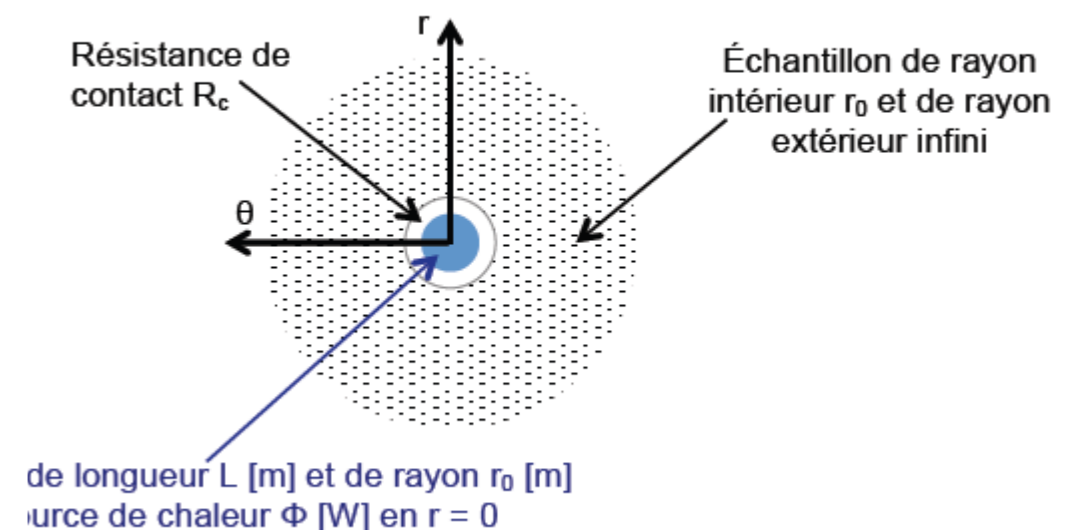
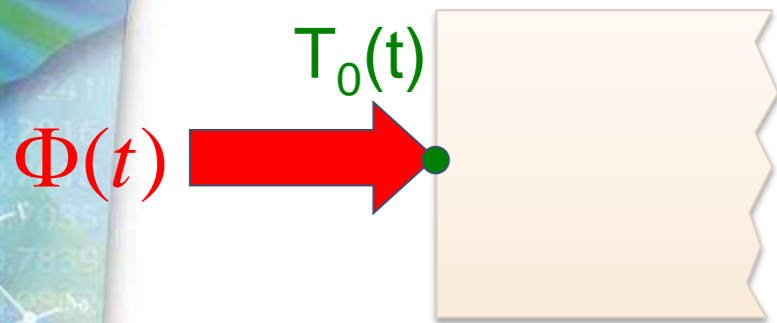


Schéma de la modélisation associée



# Méthode instationnaire, milieu semi-infini : 'Effusivimétrie'



Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
$\beta = \frac{\Phi}{b} \quad (m^2 K s^{-1/2})$ <p>avec <math>b = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{k}{\sqrt{a}}</math></p> <p><math>b =</math> effusivité thermique en <math>W m^{-2} K^{-1} s^{1/2}</math></p>	<p>- Capacité calorifique volumique <math>\rho \cdot C_p</math> ou diffusivité thermique <math>a</math></p> <p>- Flux</p> $k = \left( \frac{\Phi}{\beta} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot C_p}} \quad \text{ou} \quad k = \frac{\Phi}{\beta} \sqrt{a}$

- **Classe de méthode** : 'Sondes planes' de type 'Plan chaud'
- **Modèle simple** : équation de la chaleur instationnaire 1D

-  $T(t) = \frac{Q}{b} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi t}}$  si flux = Dirac d'énergie  $Q$  et  $T(t) = \frac{2\Phi}{b} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}}$  si  $\Phi =$  constante

- **Identification** de la conductivité **simple**, identification **préliminaire de l'effusivité**

- **Expérience moins difficile** :

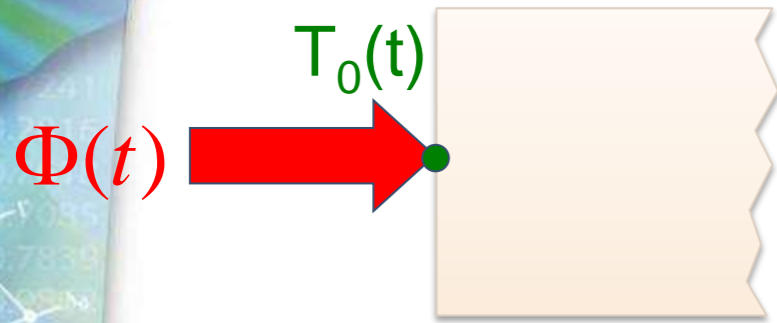
- garantir un transfert 1D : excitation uniforme et pas de pertes latérales, montage symétrique

- mesure seulement d'un thermogramme (sur la surface chauffée)

- si l'expérience se complique (effets 2D notamment, prise en compte de l'inertie de la sonde), le modèle peut évoluer et l'identification pourra porter également sur ces paramètres supplémentaires

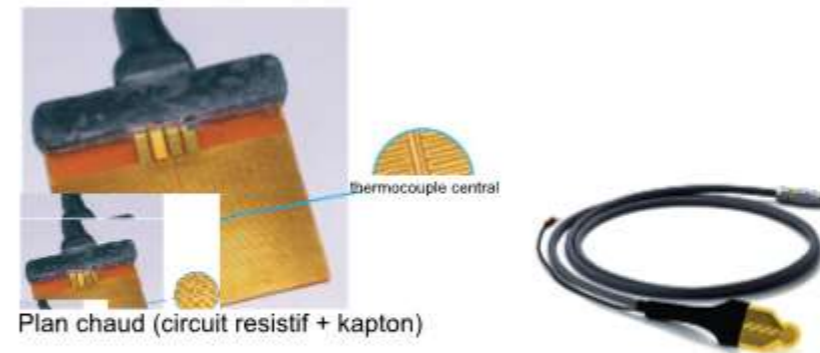
- **Il faut connaître le flux entrant dans le matériau pour identifier l'effusivité (souvent effet Joule)**

# Méthode instationnaire, milieu semi-infini : 'Effusivimétrie'



Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer $k$
$\beta = \frac{\Phi}{b} \quad (m^2 K s^{-1/2})$ <p>avec <math>b = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{k}{\sqrt{a}}</math></p> <p><math>b =</math> effusivité thermique en <math>W m^{-2} K^{-1} s^{1/2}</math></p>	<p>- Capacité calorifique volumique <math>\rho \cdot C_p</math> ou diffusivité thermique <math>a</math></p> <p>- Flux</p> $k = \left( \frac{\Phi}{\beta} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot C_p}} \text{ ou } k = \frac{\Phi}{\beta} \sqrt{a}$


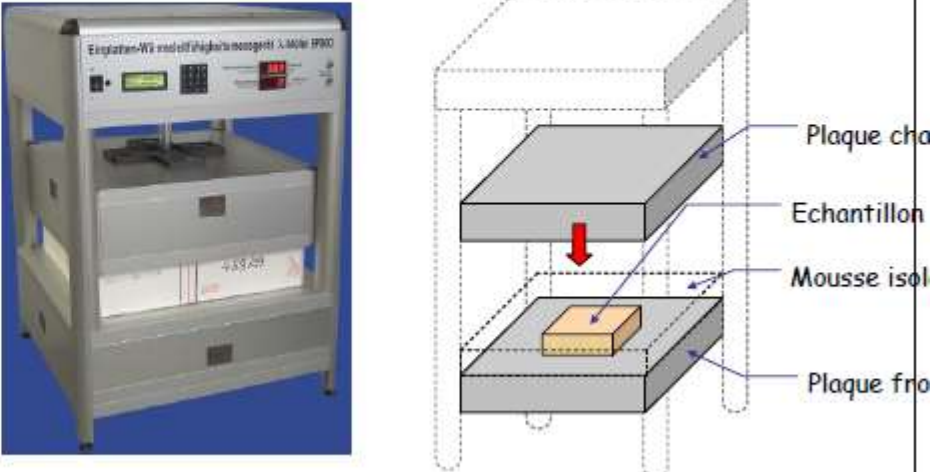
- La réponse thermique peut être suivie via l'évolution des émissions radiatives de l'échantillon, via les modifications provoquées sur le gaz qui environne l'échantillon ou directement par un suivi de la température.
- Ces mesures pourront être faites avec ou sans contact, en face avant ou en face arrière de l'échantillon



**Méthode du plan chaud : modèle et réalisation** - Illustration d'un dispositif réalisé et commercialisé par la société Thermoconcept mettant en œuvre la technique du plan chaud.

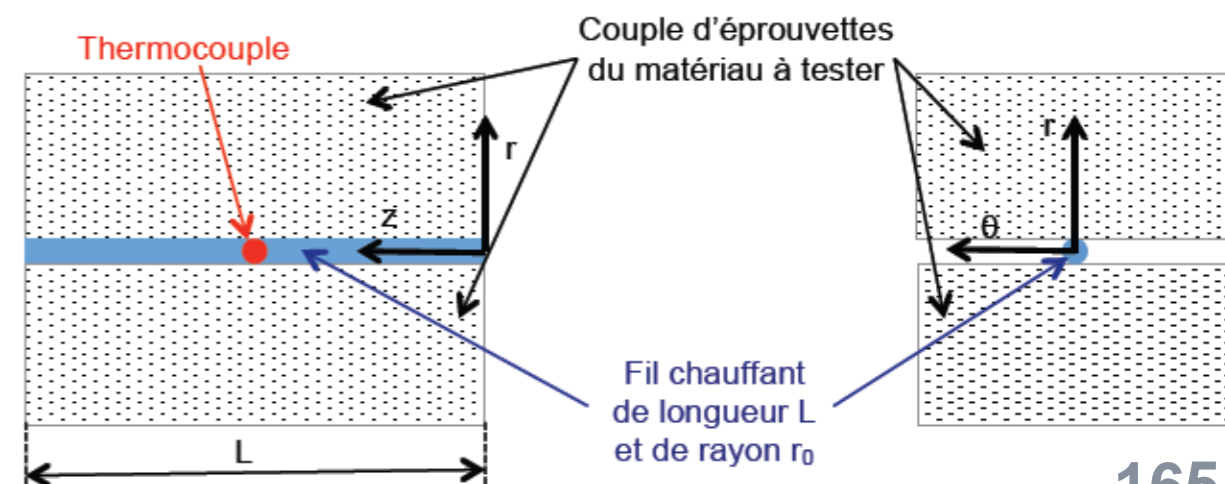
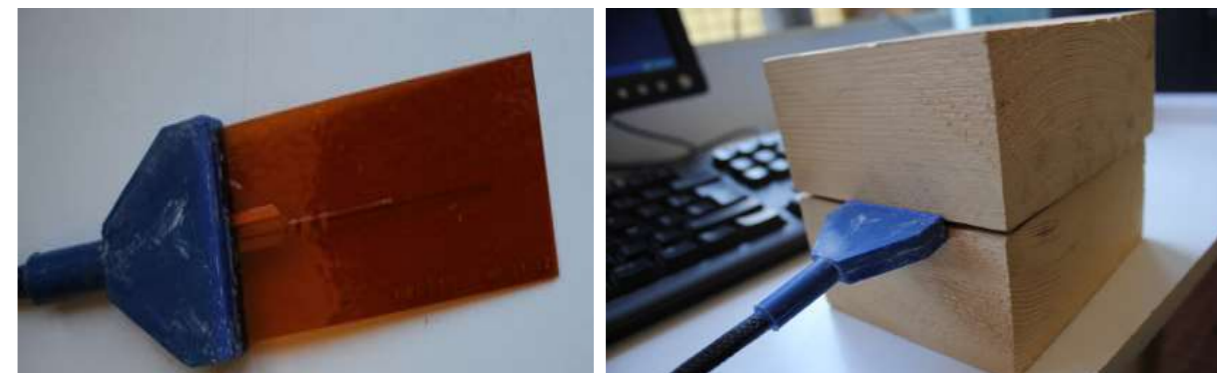
Les propriétés thermophysiques (diffusivité et effusivité thermique) sont déduites suite à une perturbation thermique contrôlée de l'échantillon.

# Méthode instationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Diffusivimétrie'

LaSIE	LMDC
Méthode en régime transitoire	En régime stationnaire par la méthode de la plaque chaude gardée (NF EN 12664)
<p data-bbox="425 337 686 367">TCi – C-THERM</p> 	<p data-bbox="1262 439 1509 470"><math>\lambda</math>-Meter EP 500</p> 

L'éprouvette est placée entre une plaque froide et une plaque chaude et est soumise à un gradient de température. Le principe de la mesure de la conductivité thermique repose sur le rapport entre le flux de chaleur qui traverse le matériau et le gradient de température qu'il génère.

L'appareil est constitué d'un capteur (sonde) réflecteur thermique unilatéral et inter facial qui émet une source de chaleur constante et passagère sur l'échantillon. Un courant est émis vers l'élément chauffant du capteur => augmentation de T à l'interface entre le capteur et l'échantillon (généralement moins de 2° C)  
 => une chute de tension dans le capteur.  
 => l'étude du taux de variation de la tension dans le capteur



# De l'arbre au bois

## Croissance de l'arbre

- tissu générateur issu du bourgeon
- surface active d'ampleur indéfiniment croissante

**cambium**

