

Elaboration de matériaux de construction à base de particules végétales??

Laurent ARNAUD
ENSAM CER de Cluny
TC Rilem

Construire en chanvre
Y. Diquelou, P. Glé, E. Gourlay

Doit-on aujourd'hui construire sa maison avec des particules végétales ?



- NE PAS REPRODUIRE
AUTORISATION DE L'AUTEUR
1. Utilisation du chanvre dans la construction
 2. Approche globale du comportement
 3. Performances thermiques et transferts hygrothermiques
 4. Conclusions

- NE PAS REPRODUIRE
AUTORISATION DE L'AUTEUR
1. Utilisation du chanvre dans la construction
 2. Approche globale du comportement
 3. Performances thermiques et transferts hygrothermiques
 4. Conclusions

1970 : la renaissance

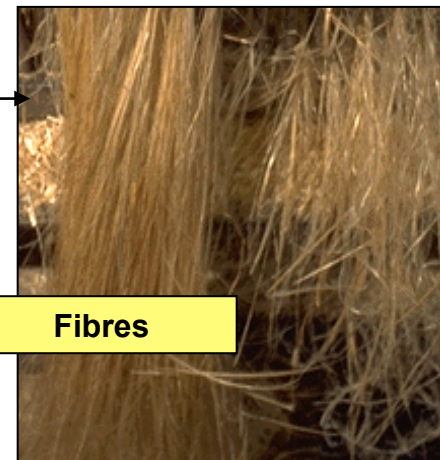
A cause des fibres synthétiques, de plus en plus utilisées dans la confection, les usines Bolloré de TROYES ont des difficultés à s'approvisionner pour leur production de pâte à papier

- ▶ contrats avec des agriculteurs et début de la production de chanvre dans l'Aube
- ▶ 1973 création de la Chanvrière de l'Aube à Bar-sur-Aube

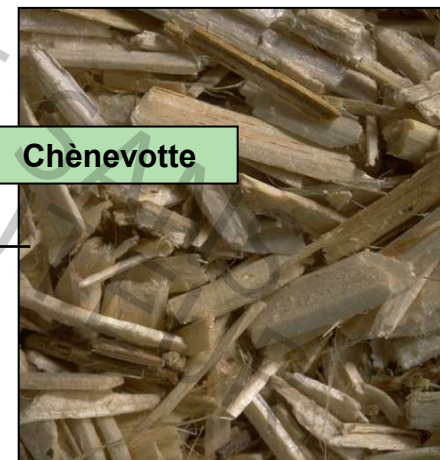


Avec 8 à 12 000 hectares, la France est la 1^{ère} région de production de chanvre en Europe.

Une industrie de première transformation



Fibres

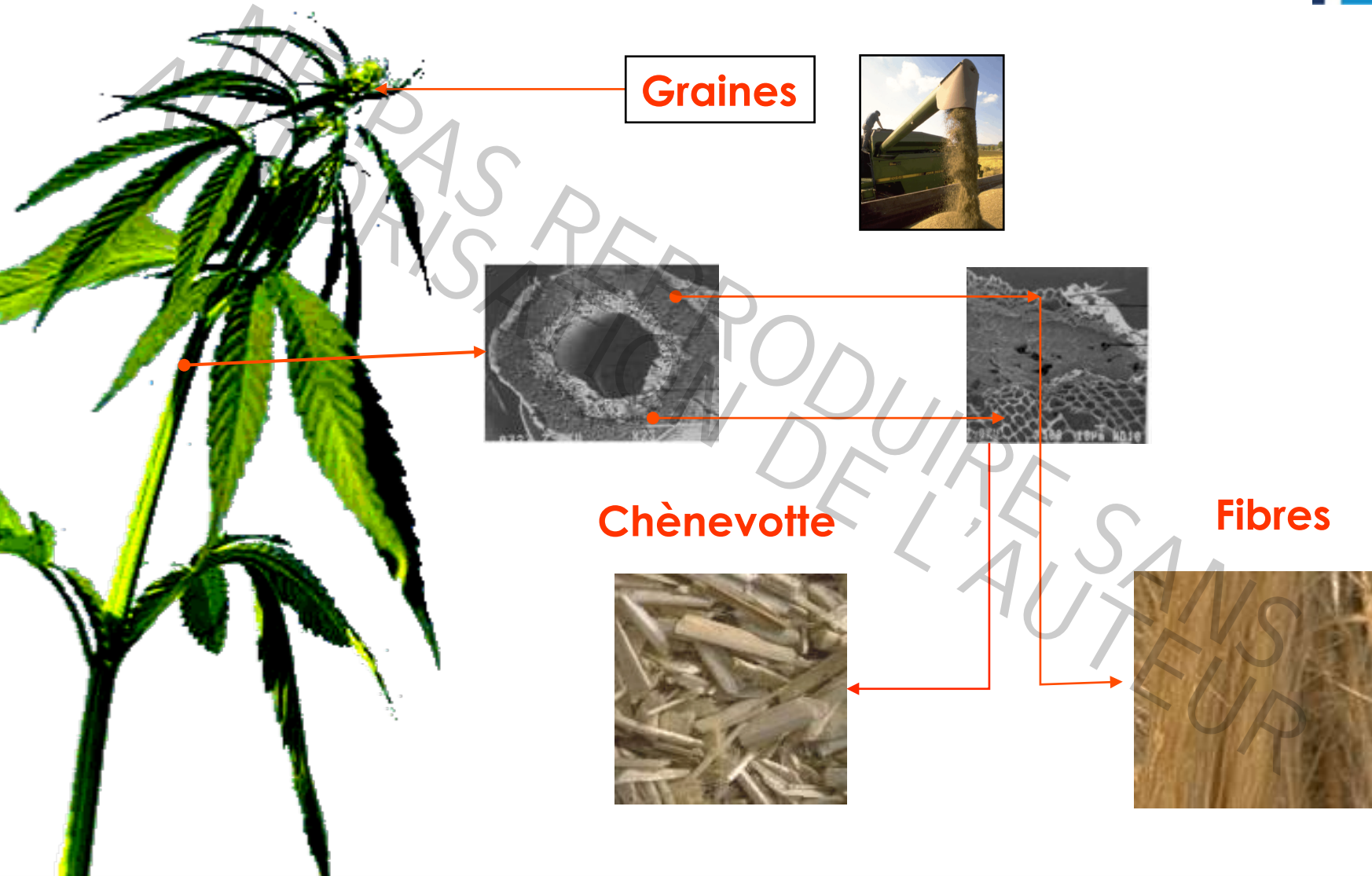


Chènevotte

Nouveaux débouchés des fibres végétales

- Les principales applications « passées » :
 - Le chènevis (graines) : alimentation animale
 - Les fibres : la pâte à papier
 - La chènevotte : litières animales
- Les axes de développement :
 - Le chènevis (graines) : cosmétiques et diététique
 - Les fibres : matériaux composites et isolation
 - La chènevotte : **matériaux de construction**







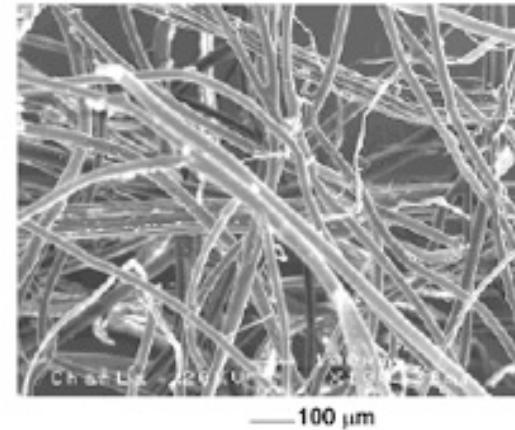
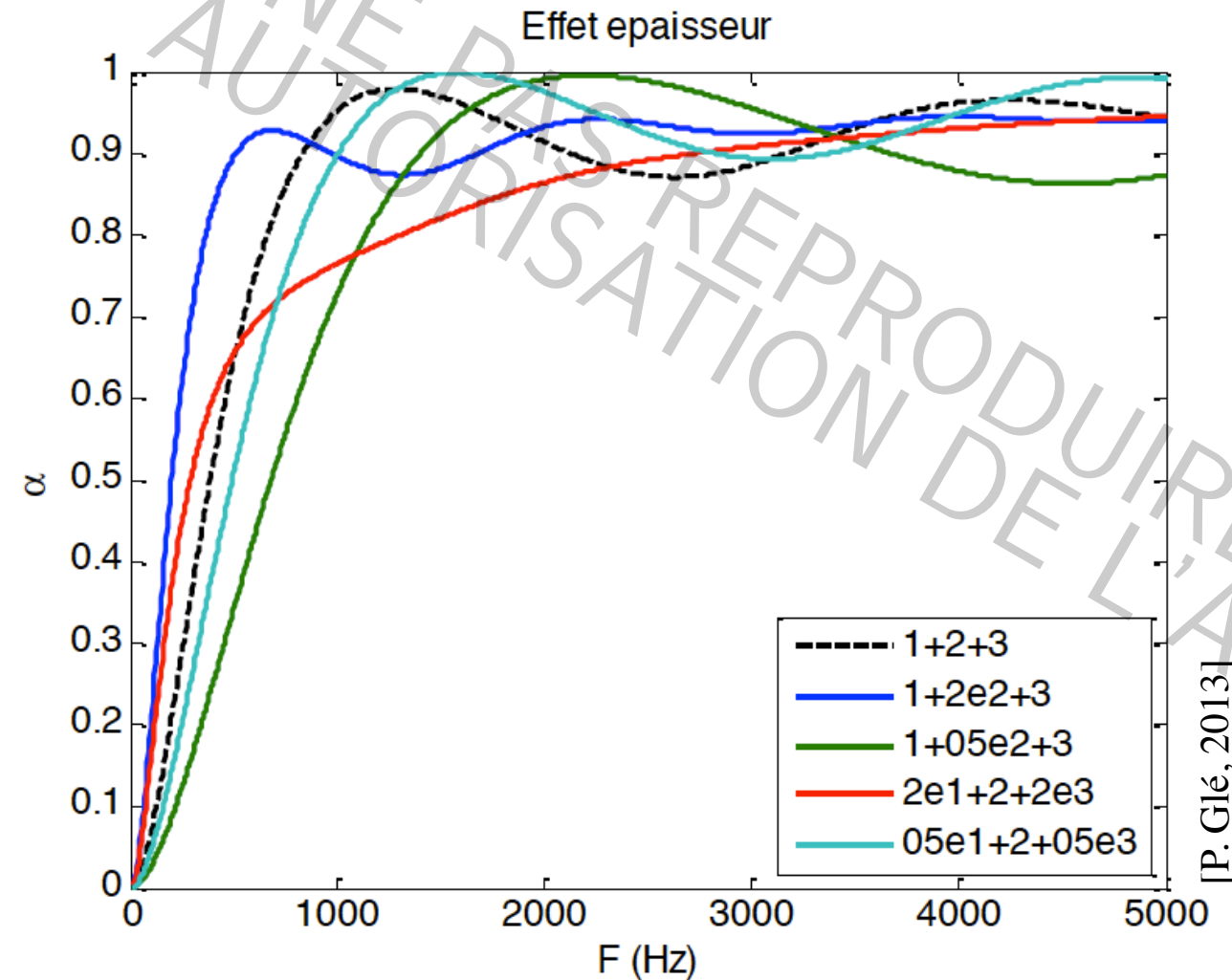
Fibres en laine végétales : fabrication

- Mélange de fibres de chanvre et fibres polyester bi-composant
 - Fabrication d'un matelas par cardage mécanique ou pneumatique
 - Passage au four entre 2 tapis roulants
 - Découpe et conditionnement
-
- *Densité : 25 à 40 kg/m³*
 - *Cond. Thermique : $\lambda = 0,040 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$*
 - *Bonnes propriétés mécaniques*



*Les laines de chanvre rentrent dans le cadre des **Avis Techniques** et des **Agréments Techniques Européens***

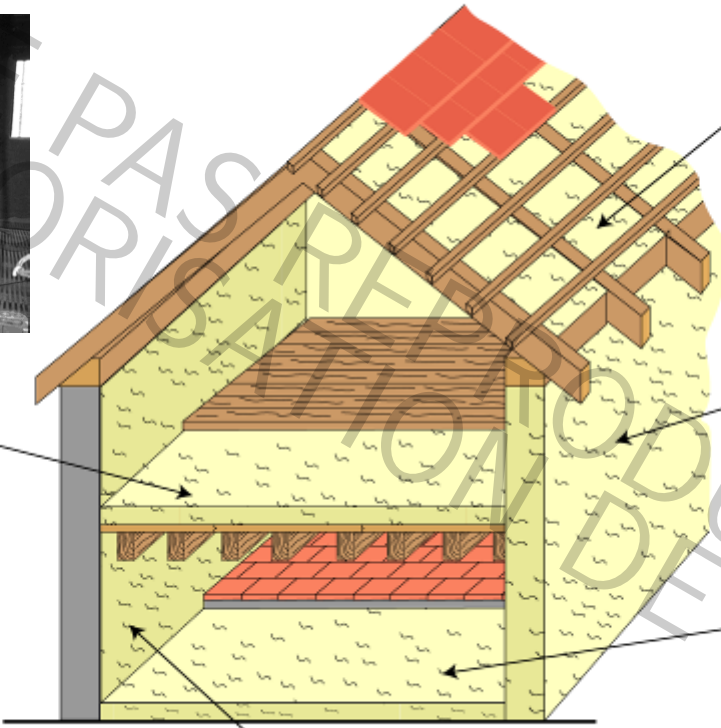
Laine végétale d'isolation







Béton de chanvre isolant sur plancher d'étage



Béton de chanvre en isolation de toiture

Béton de chanvre en mur

Béton de chanvre en dallage isolant sur terre plein

Mortier de chanvre en enduit intérieur



Rénovation



Réhabilitation

Maison Diocésaine de Chalons en Champagne
Maîtrise d'Œuvre : Atelier Méandre



Maison Individuelle : banchage - blocs





Préfabrication : Maison de L'Habitat / Avis Technique Expérimental

Maîtrise d'Ouvrage : Conseil Général du Puy de Dôme / Maîtrise d'Œuvre : A Duverger et Y Perret

- NE PAS REPRODUIRE
AUTORISATION DE L'AUTEUR
1. Utilisation du chanvre dans la construction
 2. Approche globale du comportement
 3. Performances thermiques et transferts hygrothermiques
 4. Conclusions

Fonctions d'un **matériau de construction** en service

Assurer la **stabilité mécanique** de la construction

Assurer **l'isolation phonique**

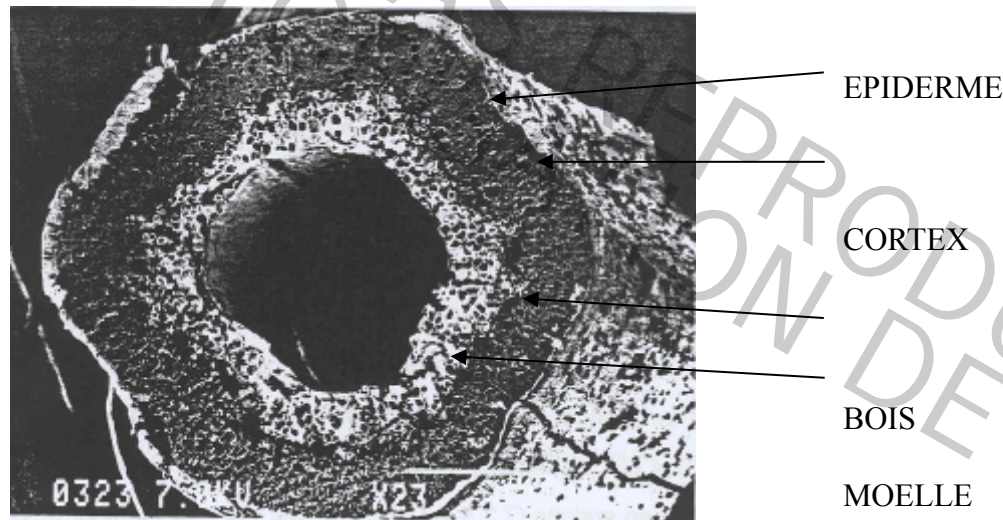
Assurer **l'isolation thermique**

Réguler les échanges

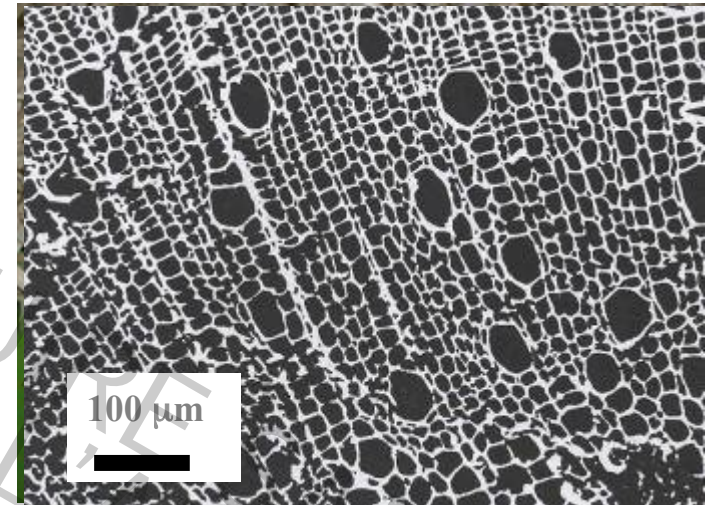


- Caractérisation des constituants

Particules végétales de chanvre



[GARCIA JALDON, 95]



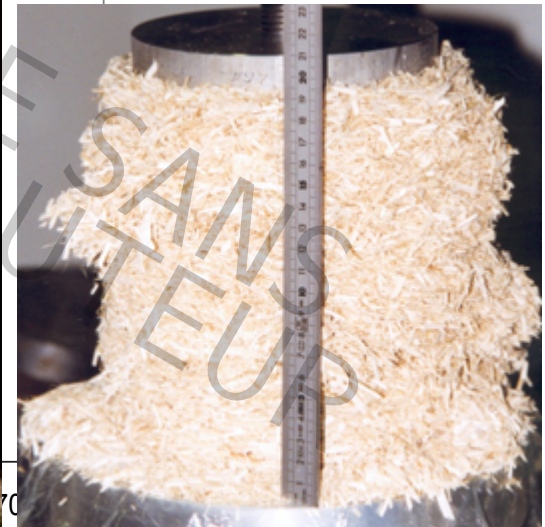
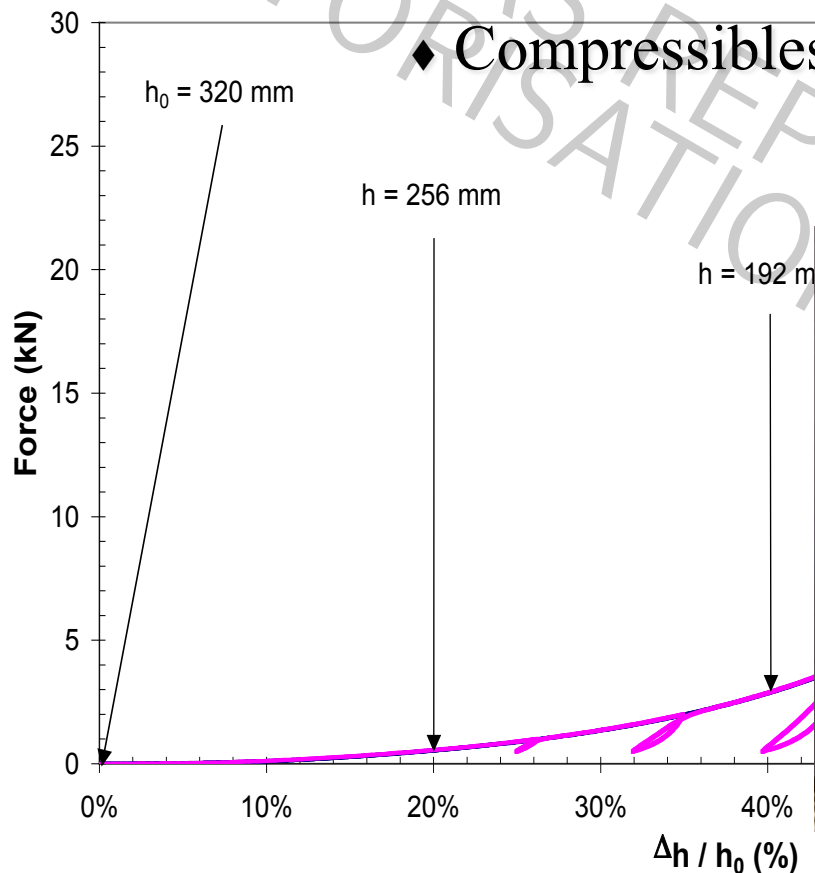
[GARCIA JALDON, 95]

- ♦ Particule de taille: $2 \times 0,5 \times 0,2 \text{ cm}^3$
- ♦ Poreuses (capillaires de 10 à 60 μm)

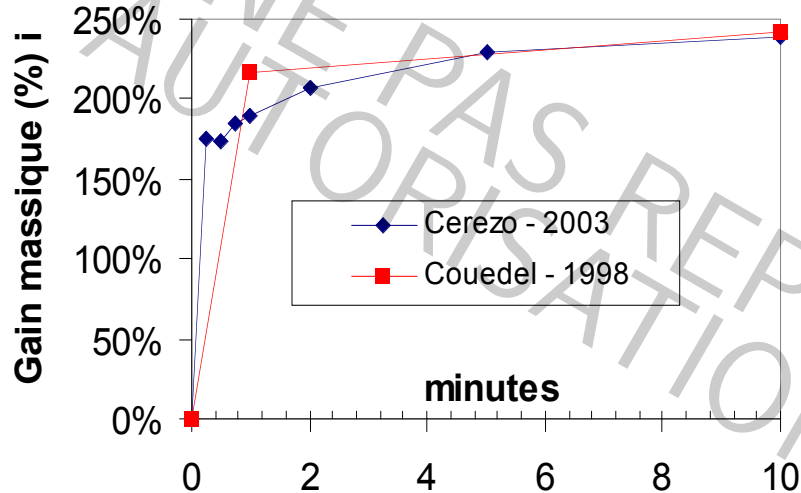
- Caractérisation des constituants

Particules végétales de chanvre

- ♦ Légères ($\rho = 320 \text{ kg/m}^3$)
- ♦ Compressibles: Taux de compression $> 60 \%$

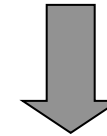


• Caractérisation des constituants



◆ Sensibles à l'eau

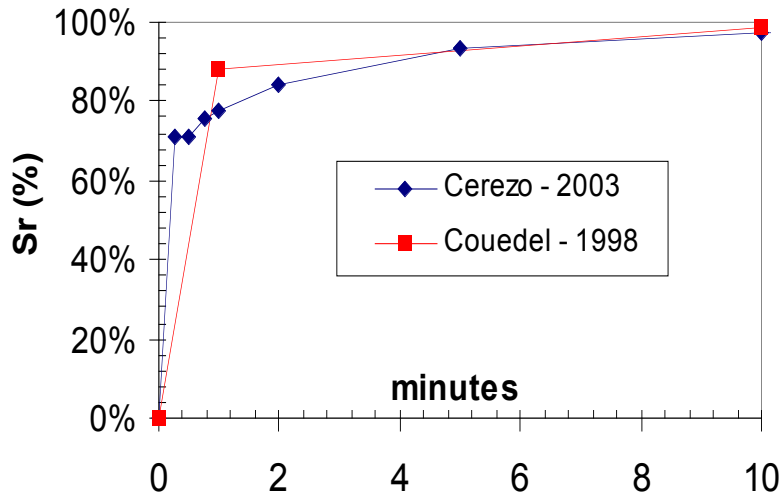
Remontées capillaires



Absorption d'eau
liquide

Taux de saturation $S_r = \frac{V_{eau}}{V_{vides}}$

Saturation : totale et rapide



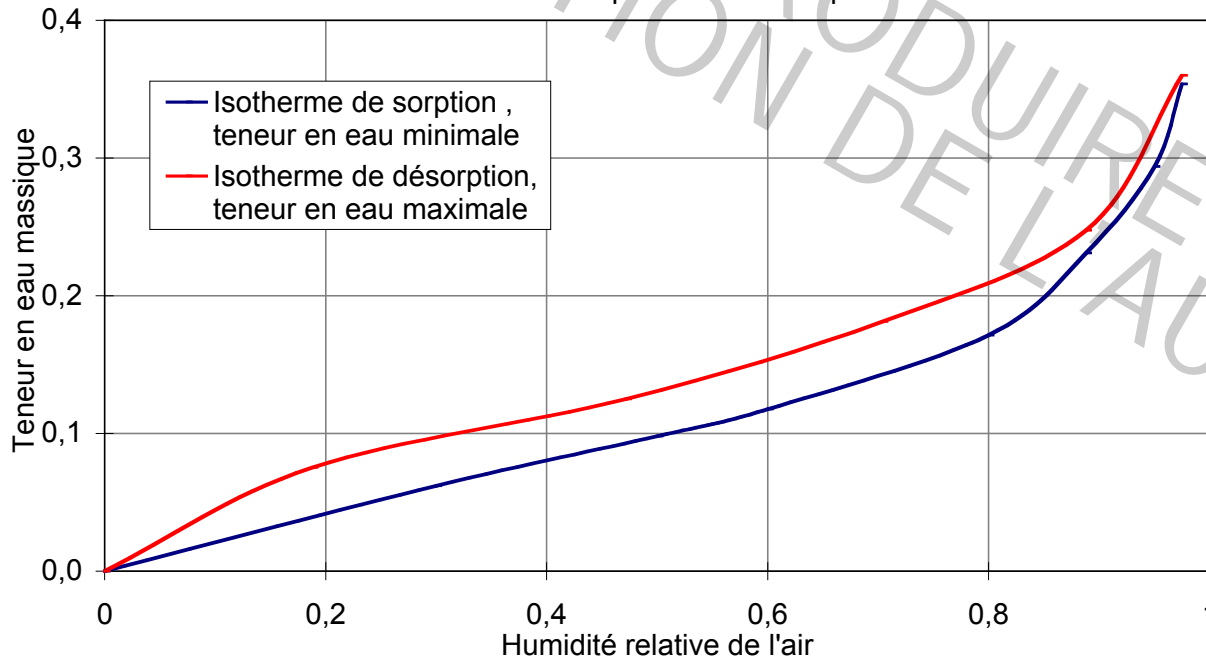
• Caractérisation des constituants

♦ Sorption / désorption

- T fixe et H_R variable $\longrightarrow$ Gain de masse

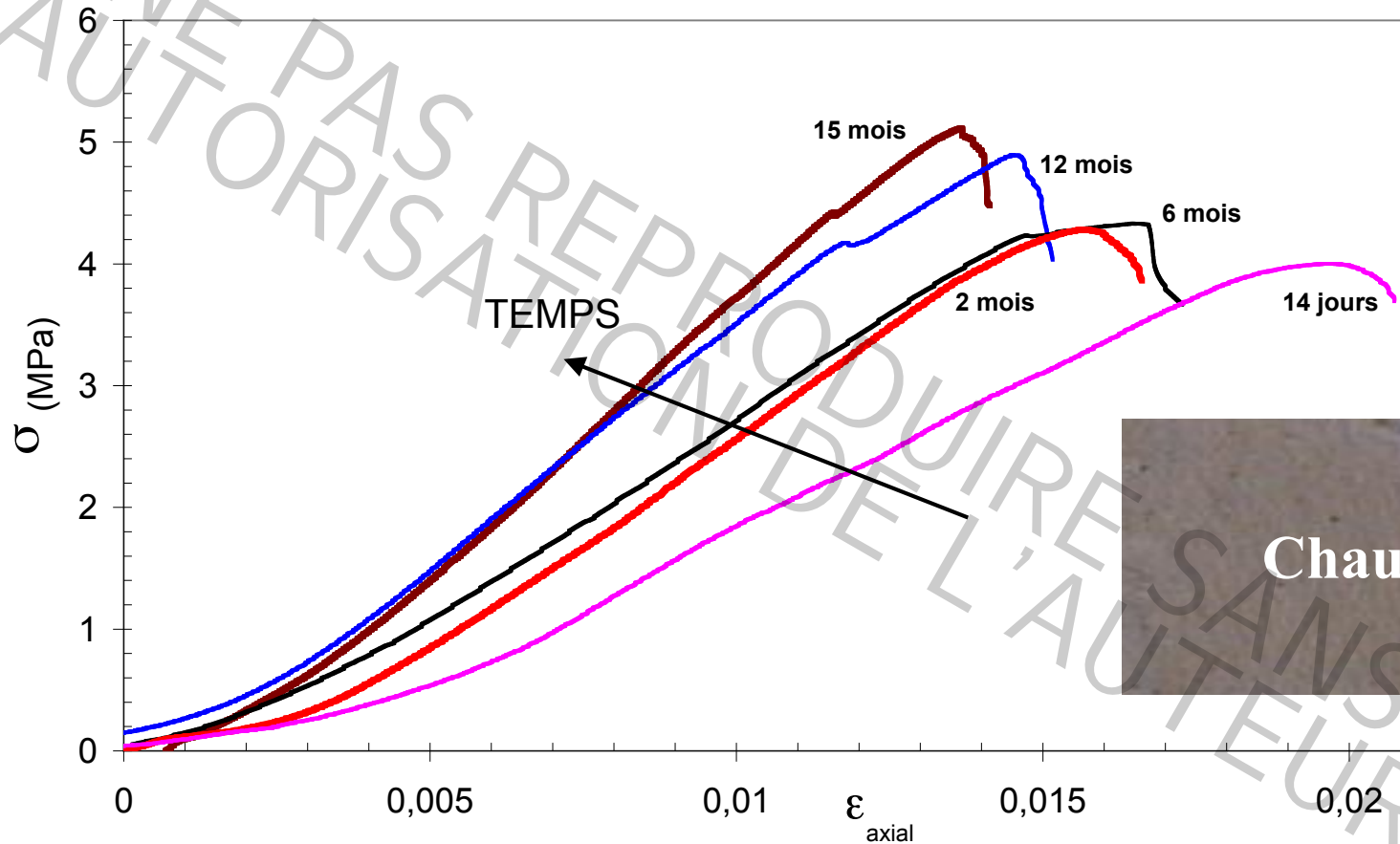
- Teneur en eau massique $\omega = \frac{M_{eau}}{M_{sèche}}$

Teneur en eau de la canosmose en équilibre à 20 degrés
Isothermes de sorption et de désorption



[GARNIER, 00]

- Caractérisation des constituants : Liant



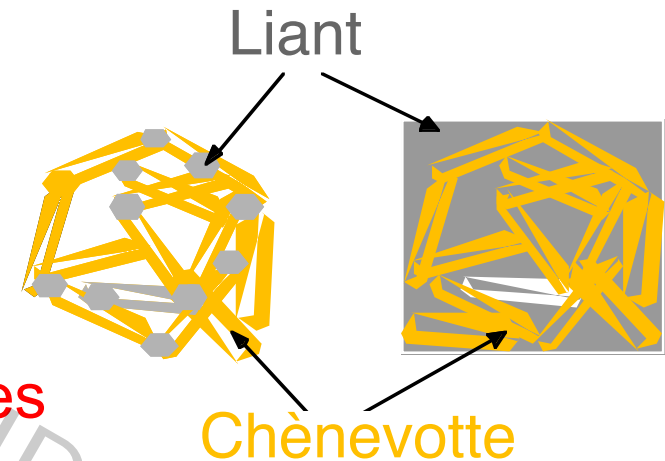
- Performances mécaniques moyennes

$$\sigma_{\text{max}} \approx 5 \text{ MPa} \quad E \approx 450 \text{ MPa} \quad \epsilon_{\sigma_{\text{max}}} \approx 10^{-2}$$

- Bétons et mortiers



- **Béton de chanvre** = Chènevotte + Liant + eau
 - Gamme large de dosages en liant
18 - 55 % en masse
 - Formulations types identifiées
et validées
- ⇒ Structures macroscopiques différentes
- ⇒ Propriétés différentes



% MASSIQUE EN LIANT



- Bétons et mortiers

- ♦ *Des constituants de natures différentes*

- ➔ Interactions physiques

- Compétition pour l'eau

- ➔ Interactions chimiques

- Végétal et prise du liant

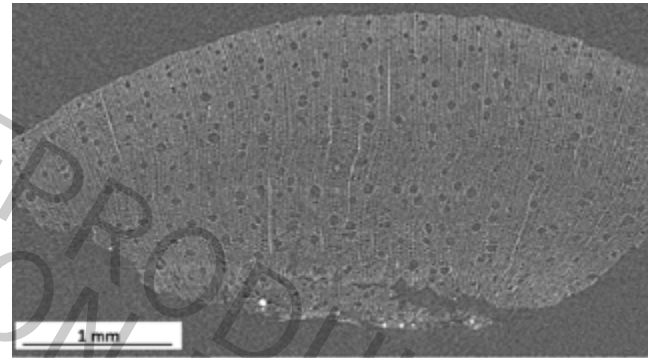
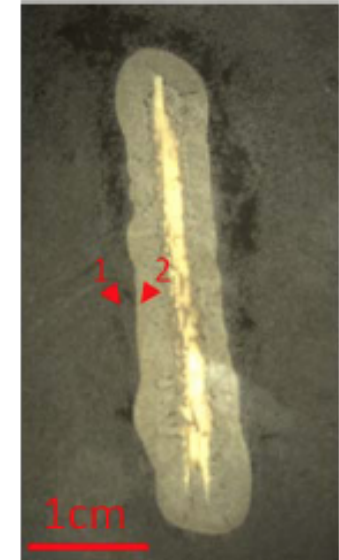
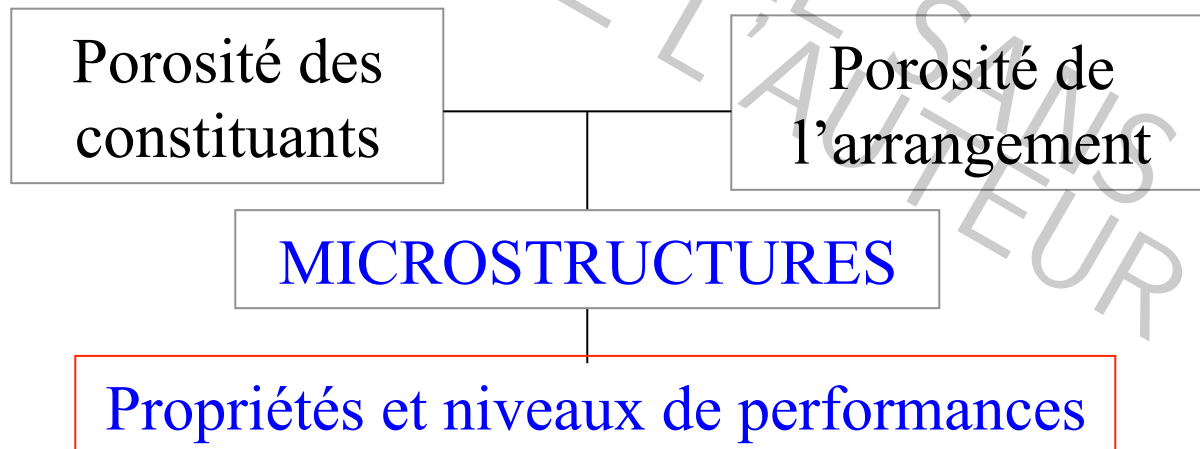


Fig. 5. Intra-particle pores of a particle of shiv S1 [21] – Mateis, INSA Lyon.

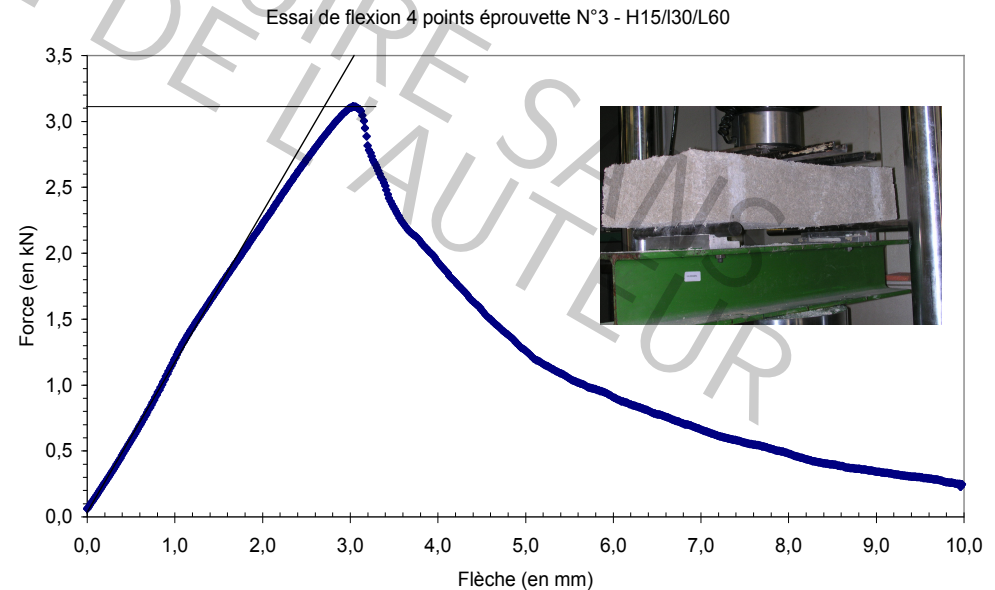
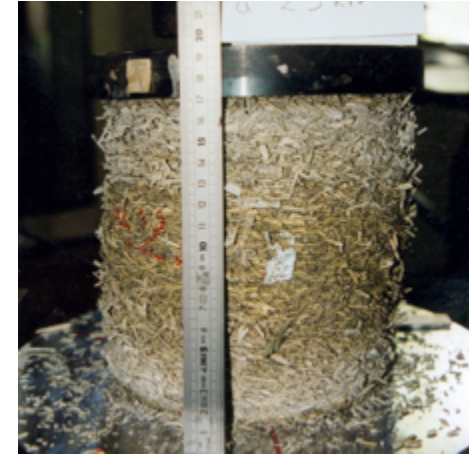
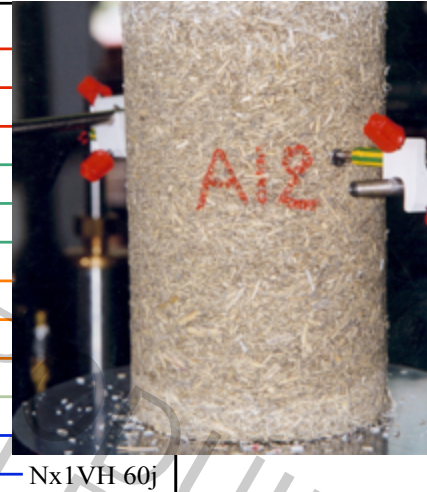
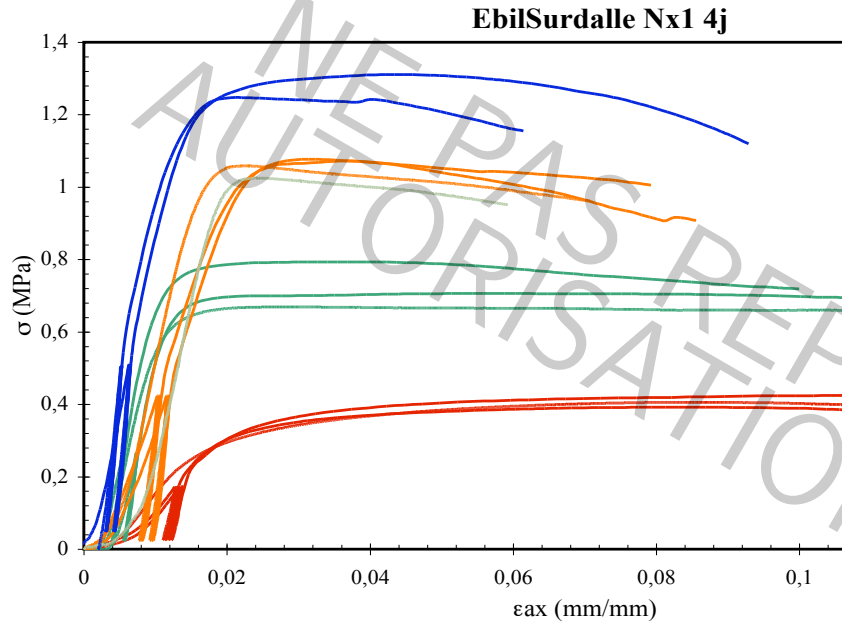


[Y. DIQUELOU, 2013]

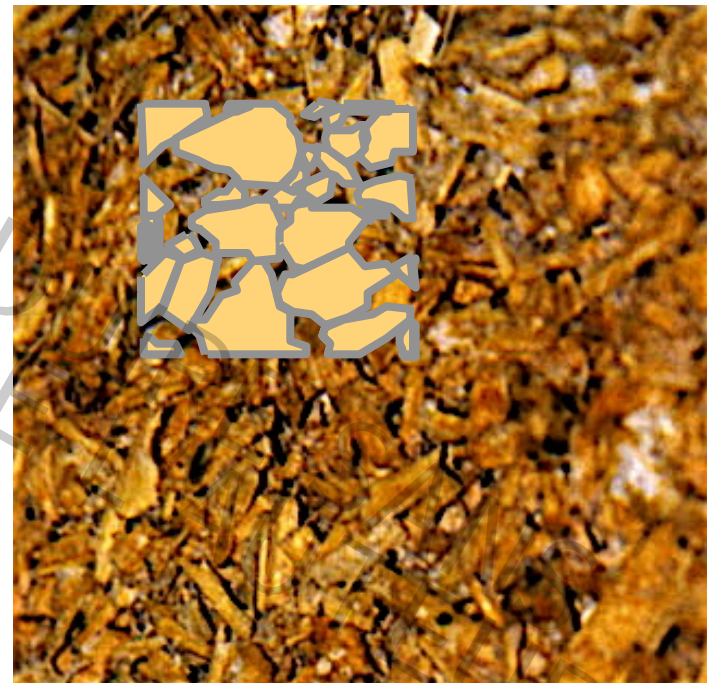
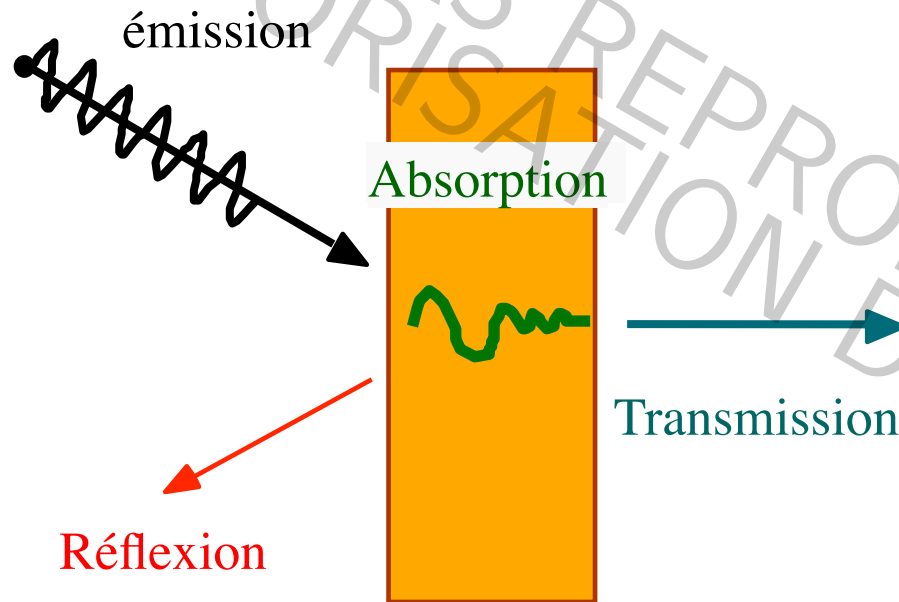
- ♦ *Porosité*



- Mécanique



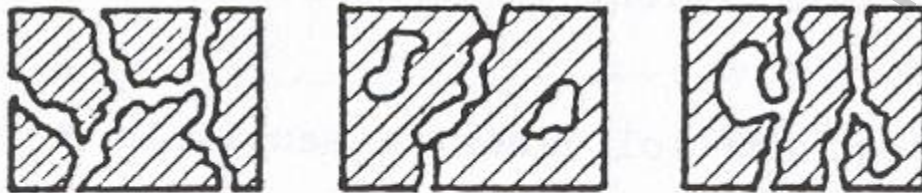
- Acoustique



- Acoustique

- Son: propagation d'ondes dans l'air
- Effet à l'interface air - matériau
- Propagation dans le milieu poreux

Deux notions clés: porosité et perméabilité



$$\phi_{\text{ouverte}} = \frac{V_{\text{v.c.}}}{V_t}$$

Connectée

Occluse

Plégée

- Acoustique : Moyens expérimentaux

- Porosité ouverte

Φ

[Beranek, 1942]



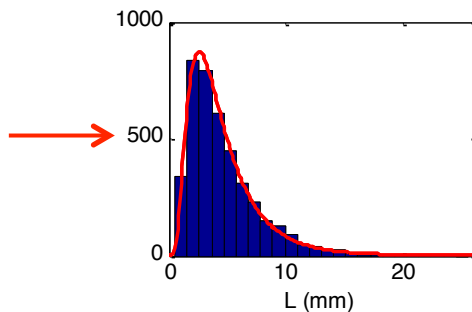
- Résistivité

$$\sigma = \eta / \Pi$$

[ISO 9053]



- Granulométrie



[Ceyte, 2009]

- Grandeurs acoustiques

α

TL

R = 5 cm

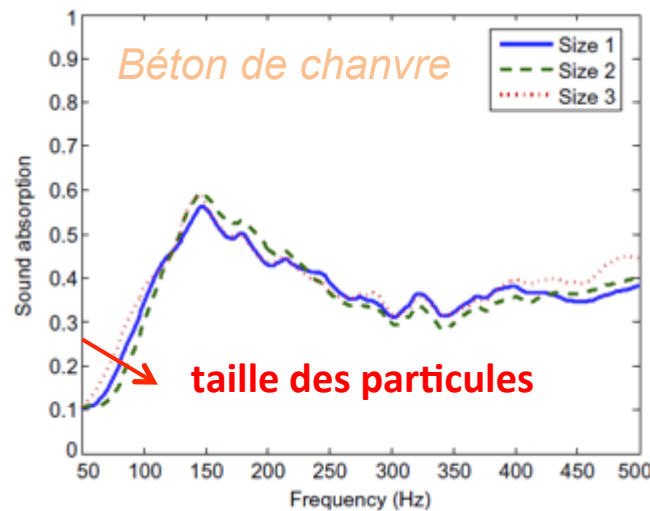
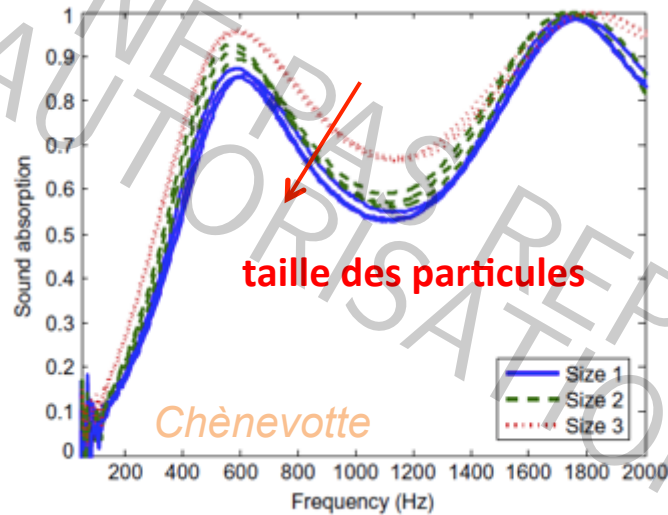


1 m

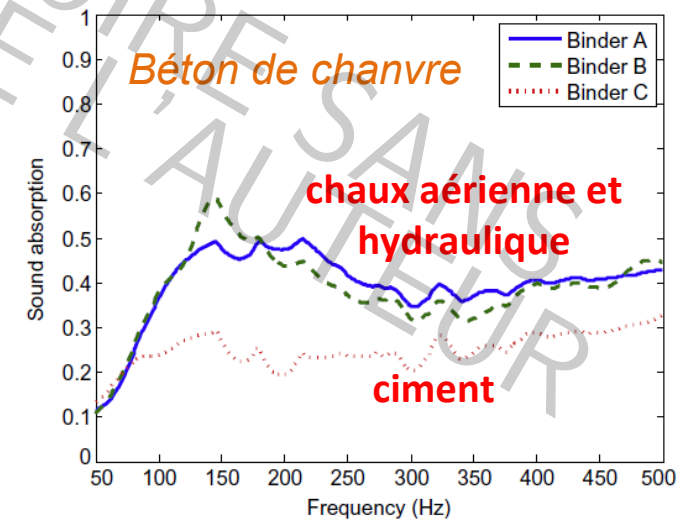
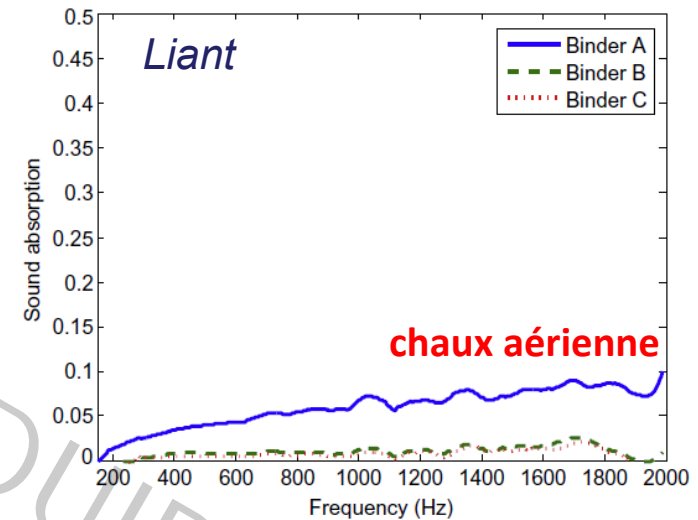
Petit tube

Aux propriétés des constituants

Granulométrie du chanvre



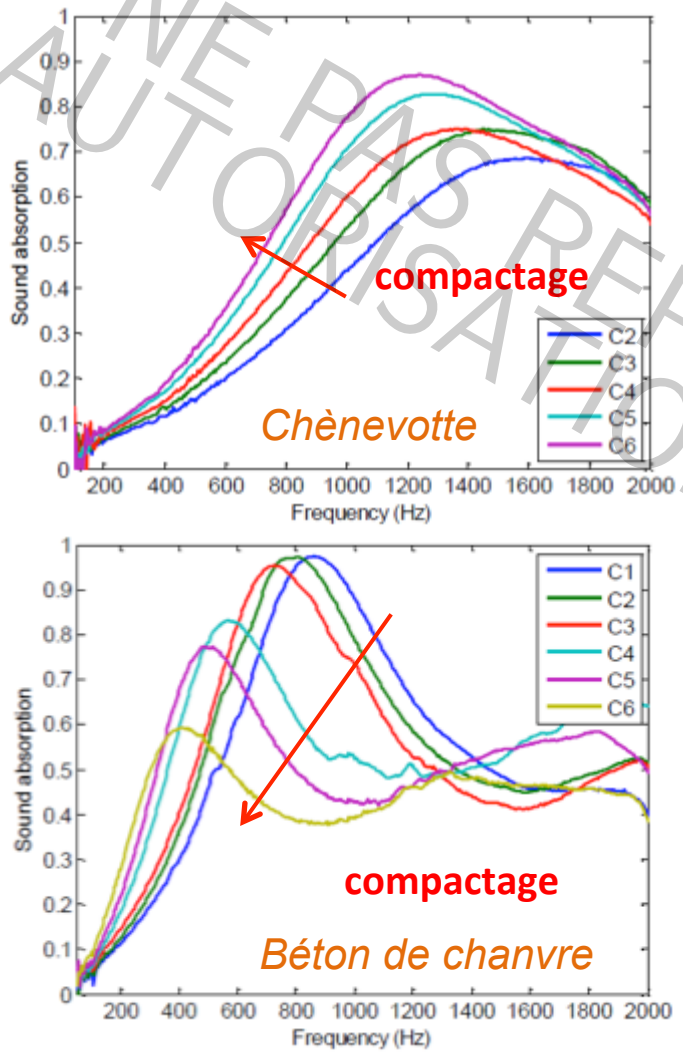
Nature du liant



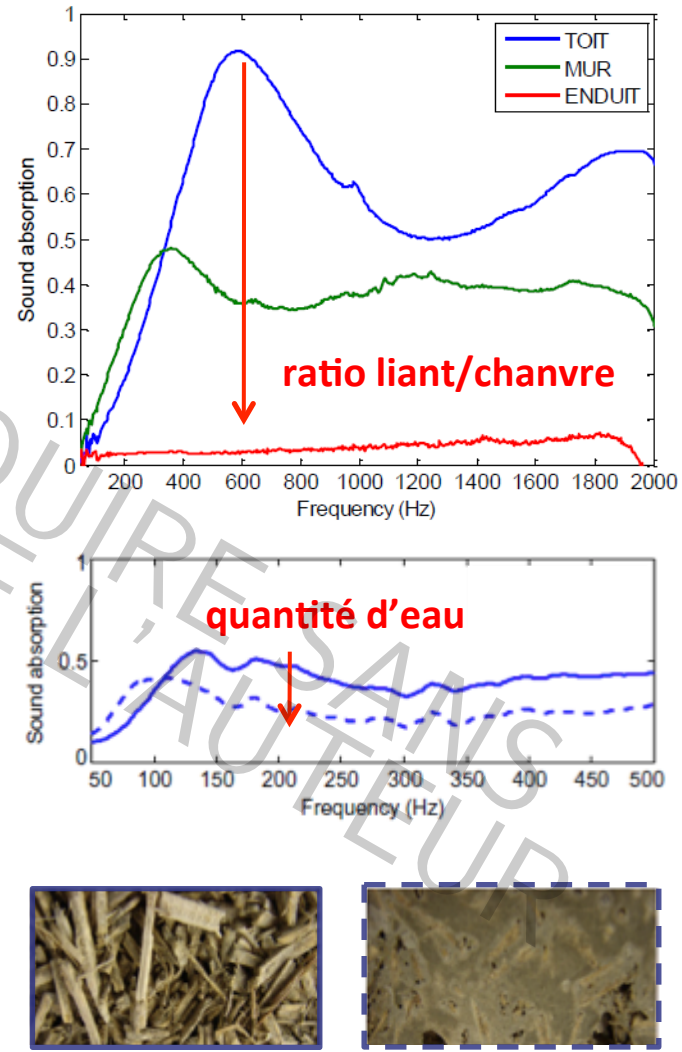
[P. Glé, 2013]

A la mise en œuvre du matériau

Densité du matériau



Dosages en eau et en liant



[P. Glé, 2013]

Effets de dissipation dans un poreux

Cas du
béton de
chanvre

10 à 50 Hz

500 à 10000 Hz

10 à 8000 Hz

- Effets mécaniques

Hypothèse de squelette rigide: 1 onde P dans fluide

$$\omega_m = \frac{\sigma \phi^2}{\rho_m}$$

- Effets visco-inertiels

Régime visqueux

Régime inertiel

$$\omega_v = \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty}$$

- Effets thermiques

Régime isotherme

Régime adiabatique

$$\omega_t = \frac{\kappa}{\rho_0 C_p \Lambda'^2}$$

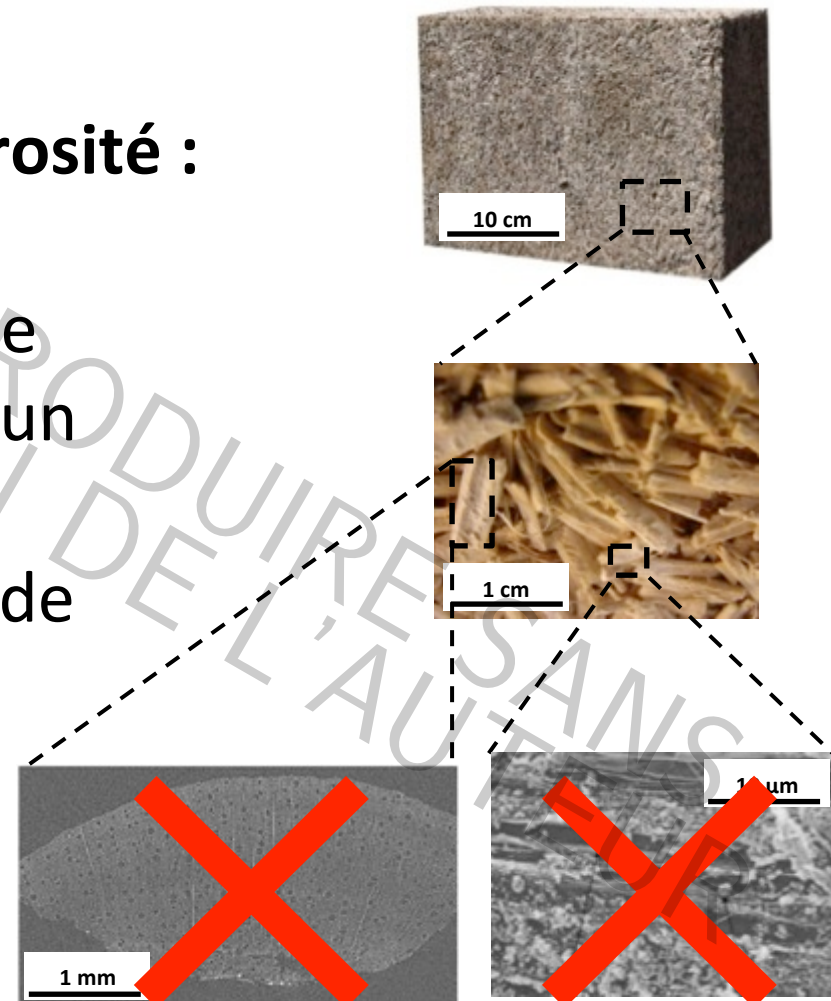
Fréquences audibles: 20 à 20000Hz

Fréquences bâtiment: 100 à 5000Hz

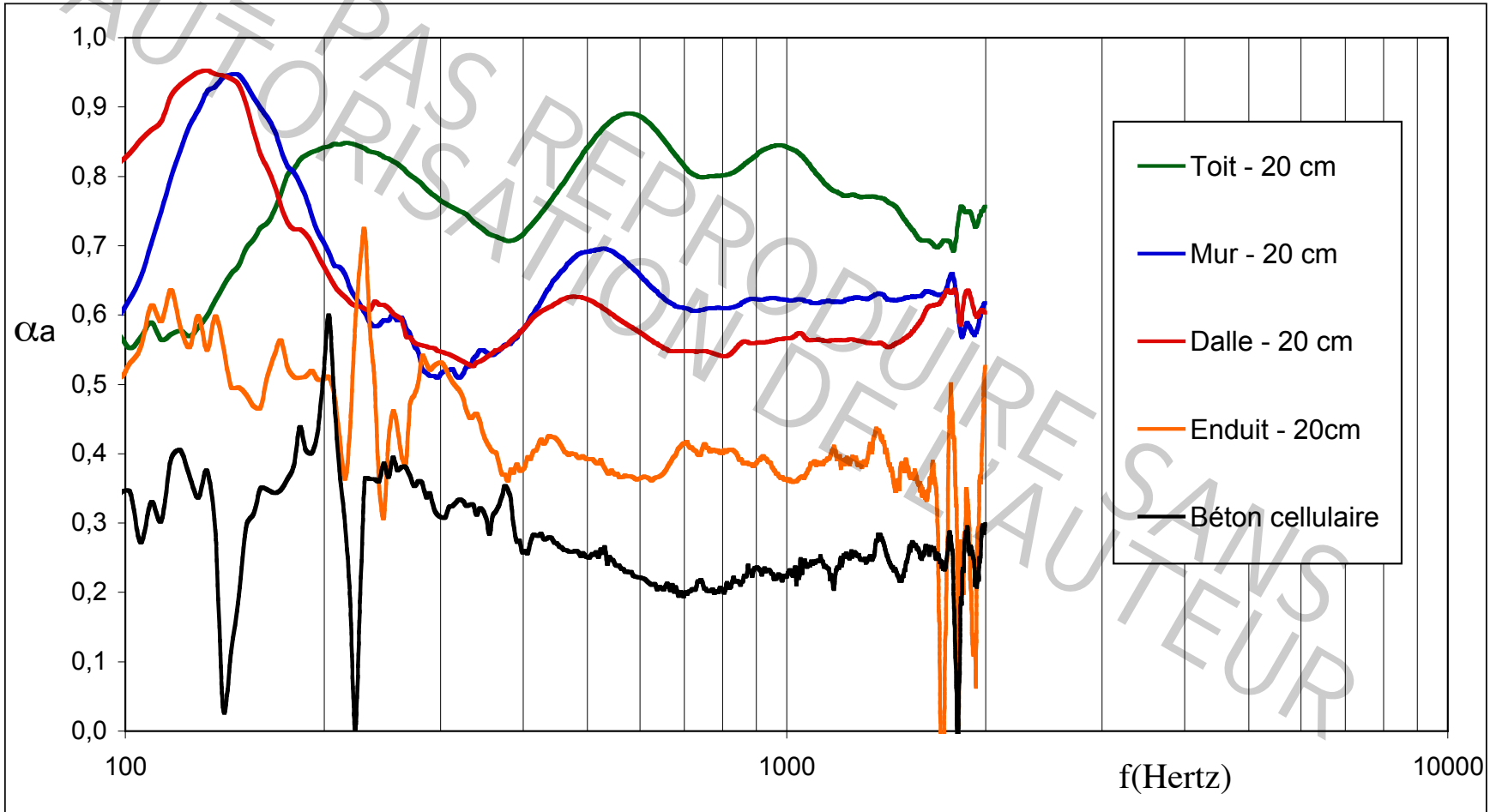
Des paramètres acoustiques aux propriétés acoustiques

Matériau à 3 échelles de porosité :

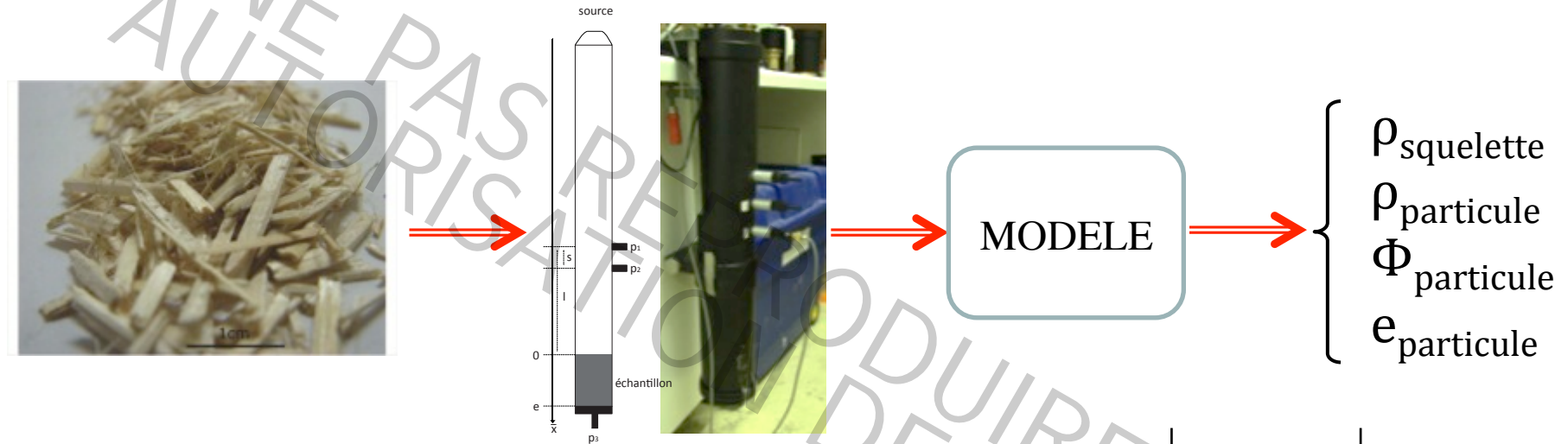
- Modélisation multi-échelle
- Deux échelles inactives d'un point de vue acoustique (masquage par contraste de perméabilité)



- Acoustique

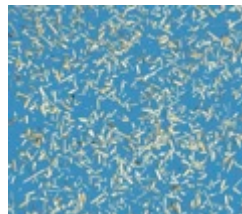
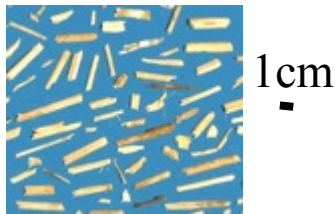


- Acoustique** : Caractérisation des particules de chanvre par mesures acoustiques [P. Glé, 2013]



Résultats de la caractérisation sur 10 chènevottes

(FNPC, LCDA et autres) – densités apparentes de 100 à 150 kg/m³



	Min	Max
$\rho_{\text{squelette}} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	870	1350
$\rho_{\text{particule}} \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	362	633
$\Phi_{\text{particule}}$	0.426	0.728
$e_{\text{particule}} \text{ (mm)}$	0.184	0.905

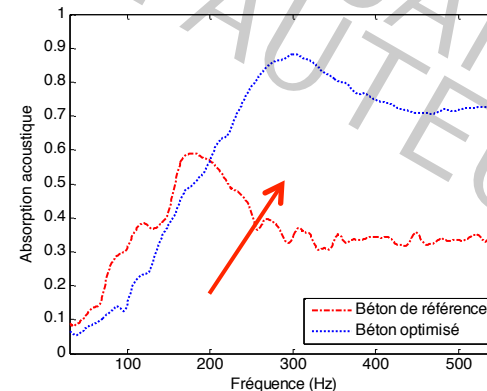
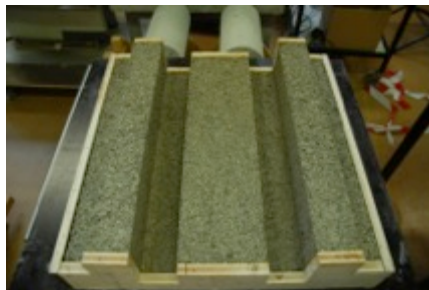
- Acoustique :

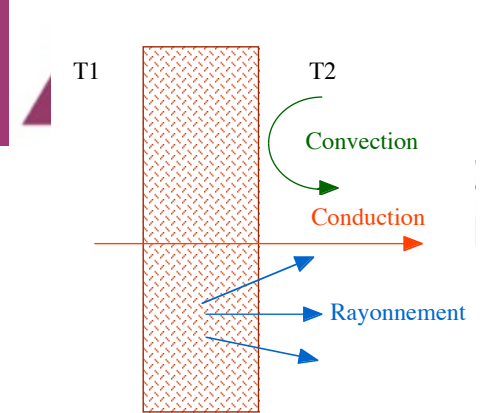
- Conclusions

- Matériau acoustiquement très intéressant
- Nombreux leviers de contrôle identifiés
- Comportement multi-échelle modélisé
- Technique de caractérisation des matières premières

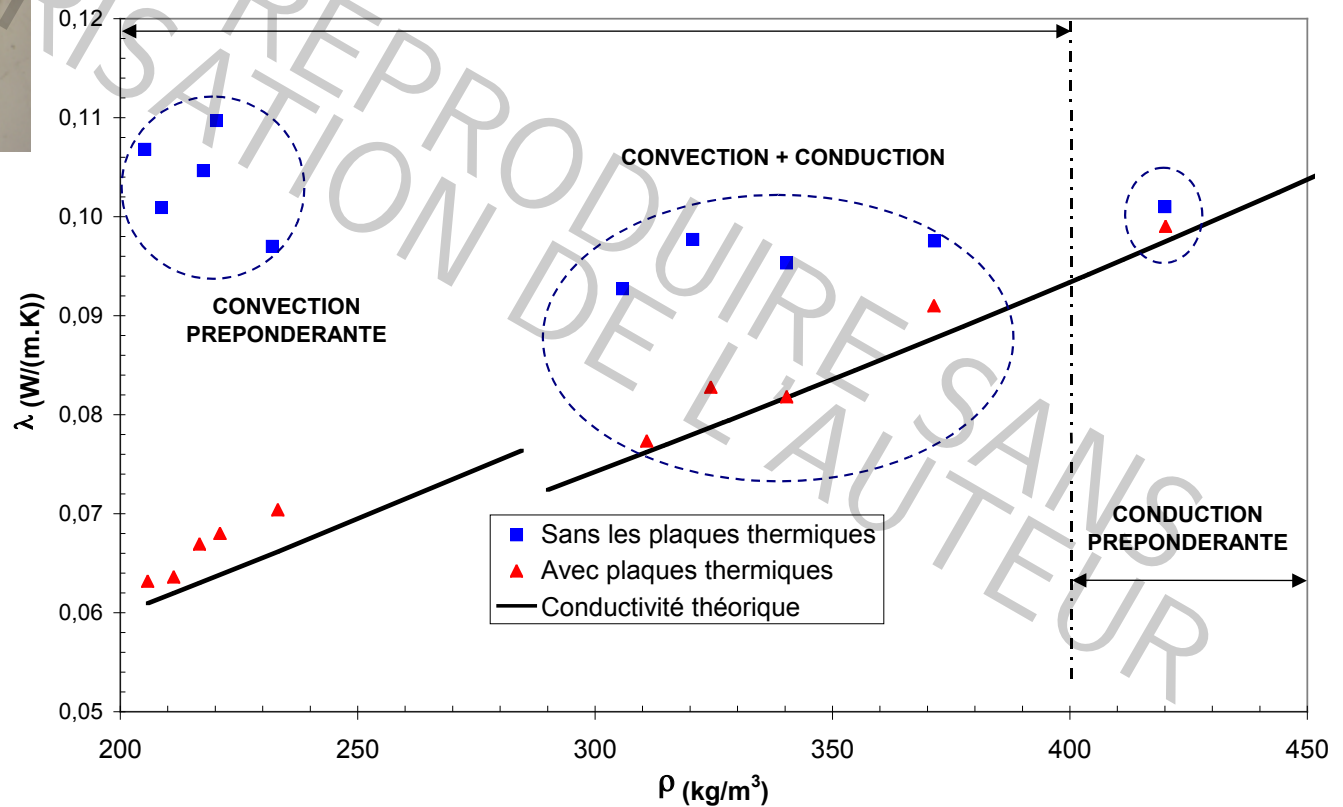
- Perspectives

- Optimisation les propriétés acoustiques des bétons de chanvre par gradient de propriétés et irrégularités de surface





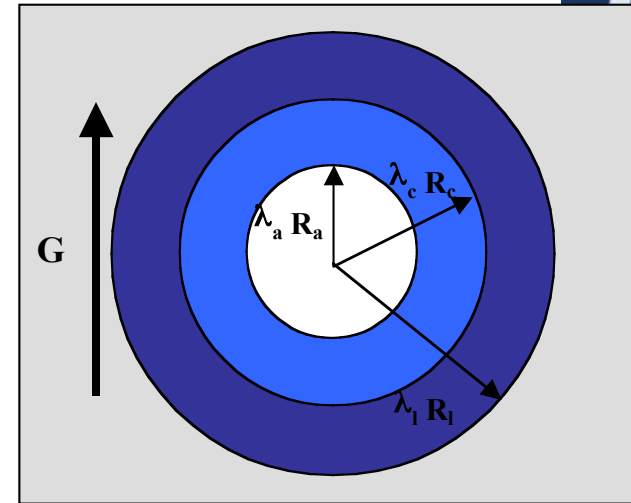
- Thermique : mesures expérimentales



• Thermique : modélisation

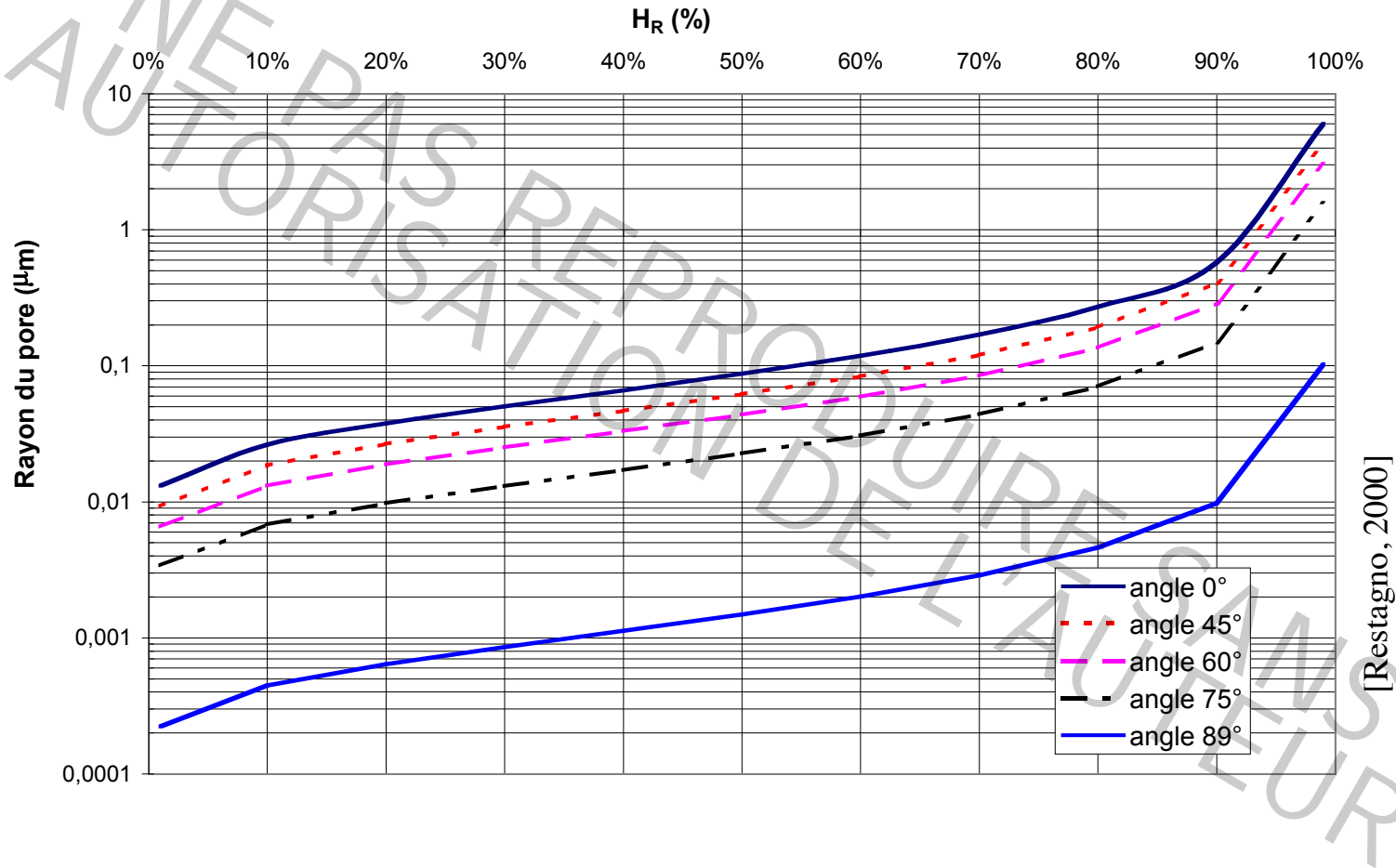
Modèle autocohérent HAC

- Motif générique
- Paramètres: k , concentrations
- Volumiques θ et δ , conductivité des constituants λ_i



$$\lambda_{eq} = \lambda_3 \left[1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1 + \frac{(\lambda_1/\lambda_2 - 1)\delta}{3}}{\frac{\lambda_1}{\lambda_3} - 1 - \frac{\delta(\lambda_1/\lambda_2 - 1)(2\lambda_2/\lambda_3 + 1)}{3}}} \right]$$

- Thermique et humidité relative



Changements de phase avec %HR

- Thermique et humidité relative

Comparaison 3 matériaux

HR = 70 %

- Béton de chanvre

HLC2 : 32 kg/m³

HLC1 : 24 kg/m³

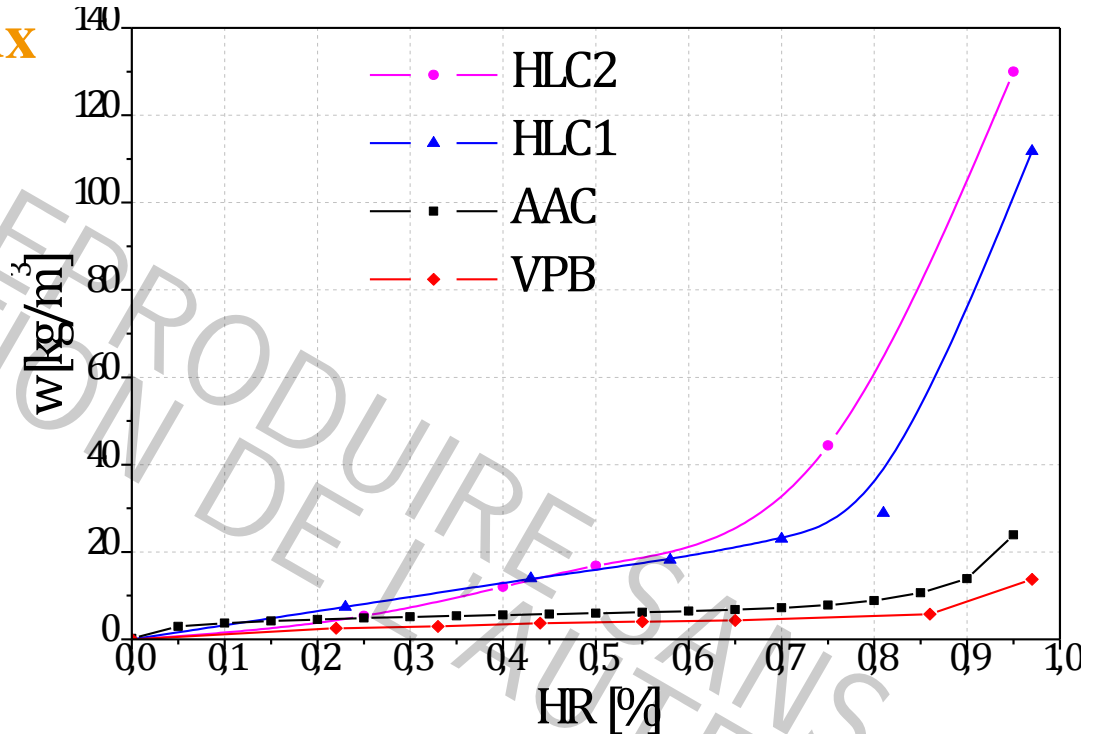
- Béton cellulaire

AAC : 7 kg/m³

- Blocs terre cuite

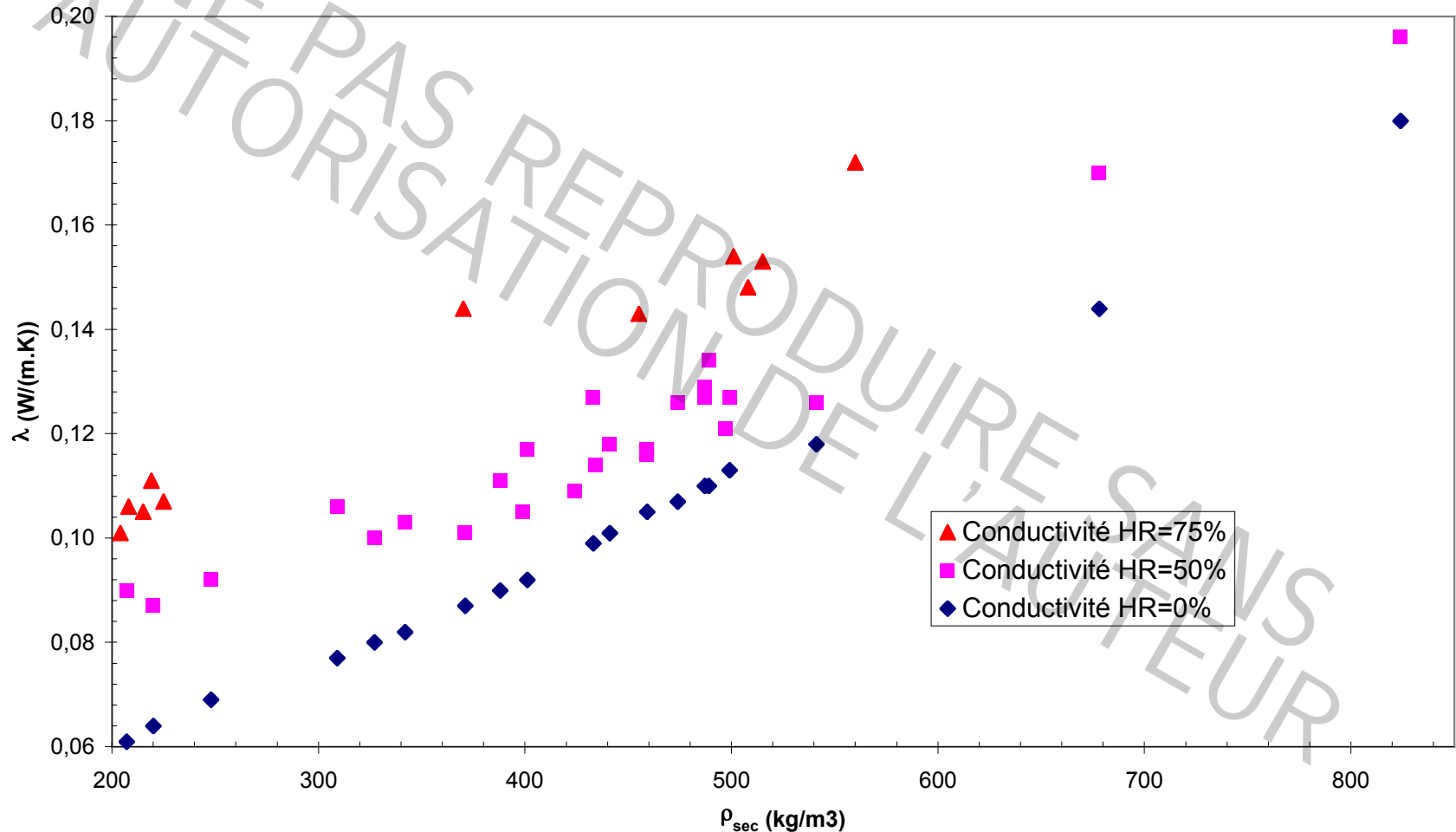
VPB : 4 kg/m³

[BELLINI, 1992], [CEREZO, 2005], [DWI ARGO, 1994]



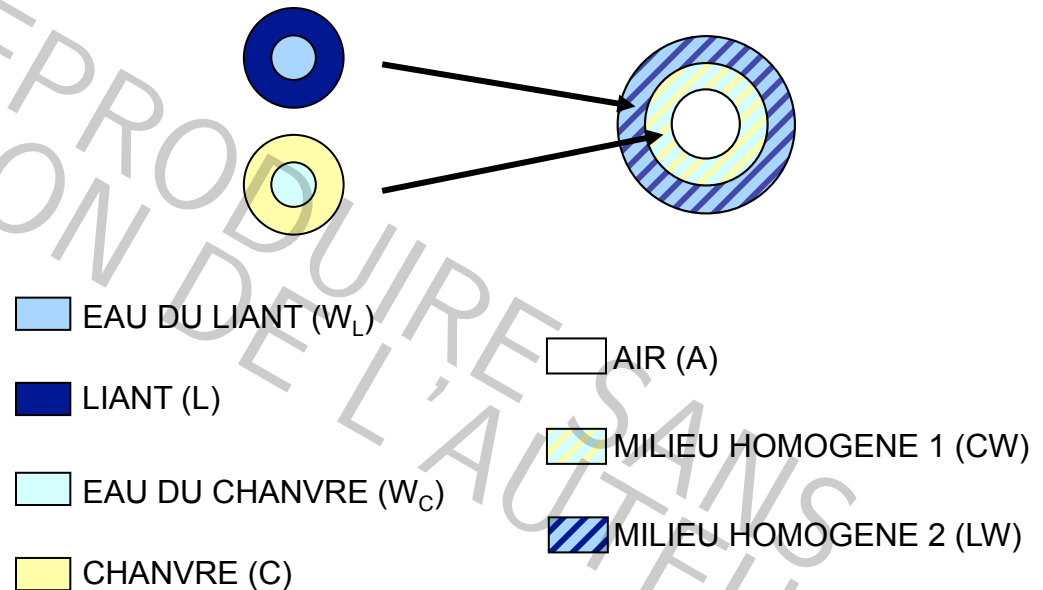
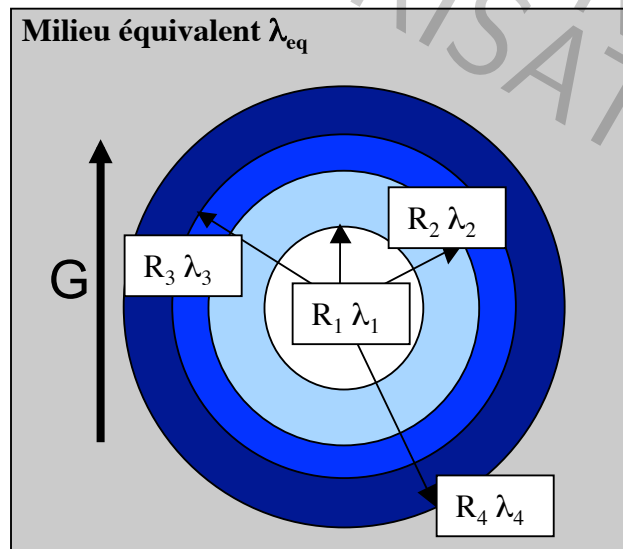
Les **BÉTONS** de **CHANVRE** affichent une
plus grande aptitude aux **échanges** d'humidité

- Thermique et humidité relative



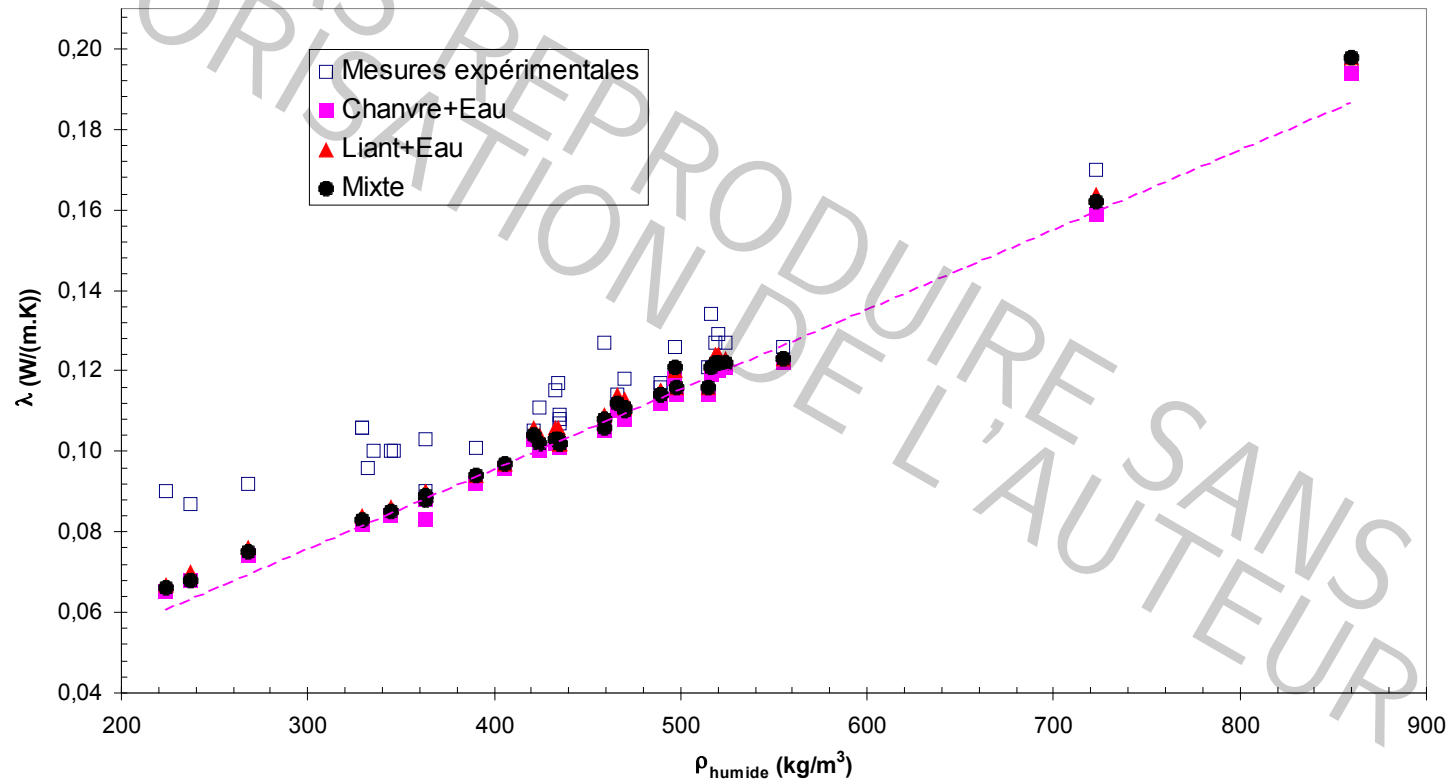
- Thermique et humidité relative

Intégration de l'eau : 2 modèles



- Thermique et humidité relative

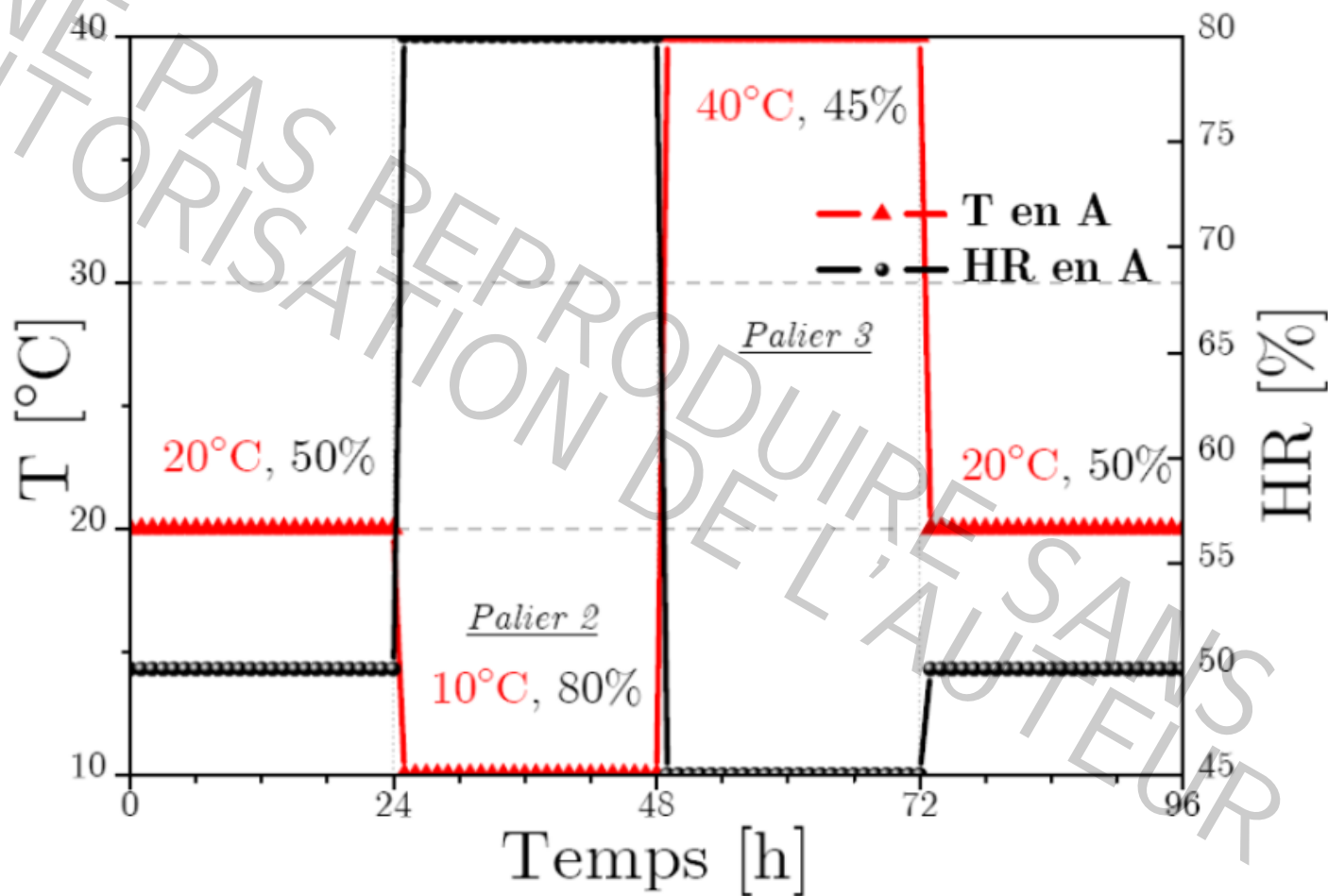
Intégration de l'eau : 2 modèles



- NE PAS REPRODUIRE
AUTORISATION DE L'AUTEUR
1. Utilisation du chanvre dans la construction
 2. Approche globale du comportement
 3. Performances thermiques et transferts hygrothermiques
 4. Conclusions

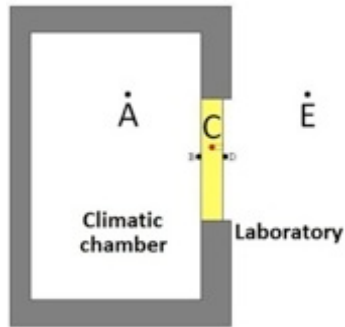
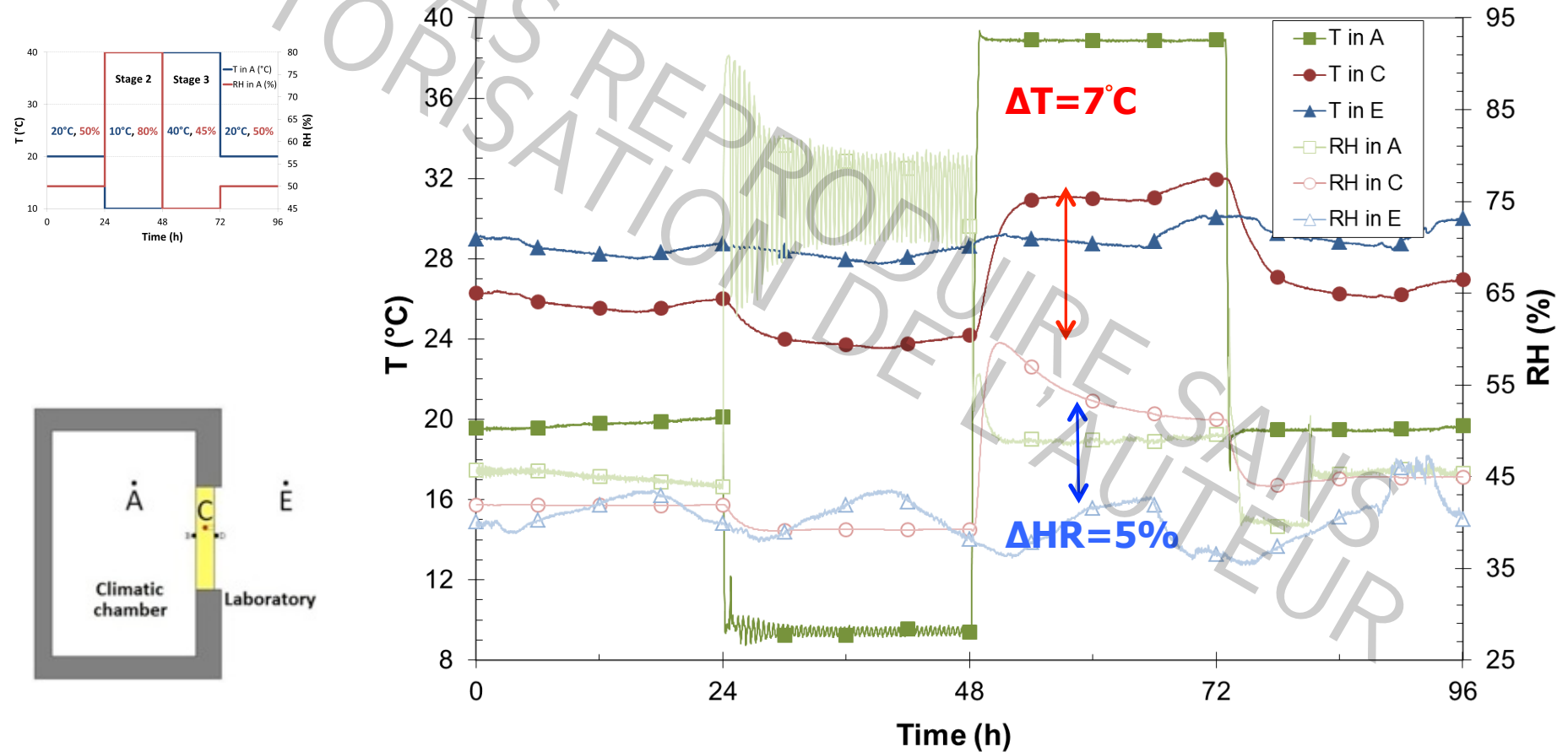
- Travail essentiel pour l'évaluation des performances énergétiques (classement, labels, ...)
- Qualité des ambiances
- Fonctionnement d'un mur : matériau poreux
- Gradients de température T et d'humidité relative $\%HR$
- Comparaison de matériaux





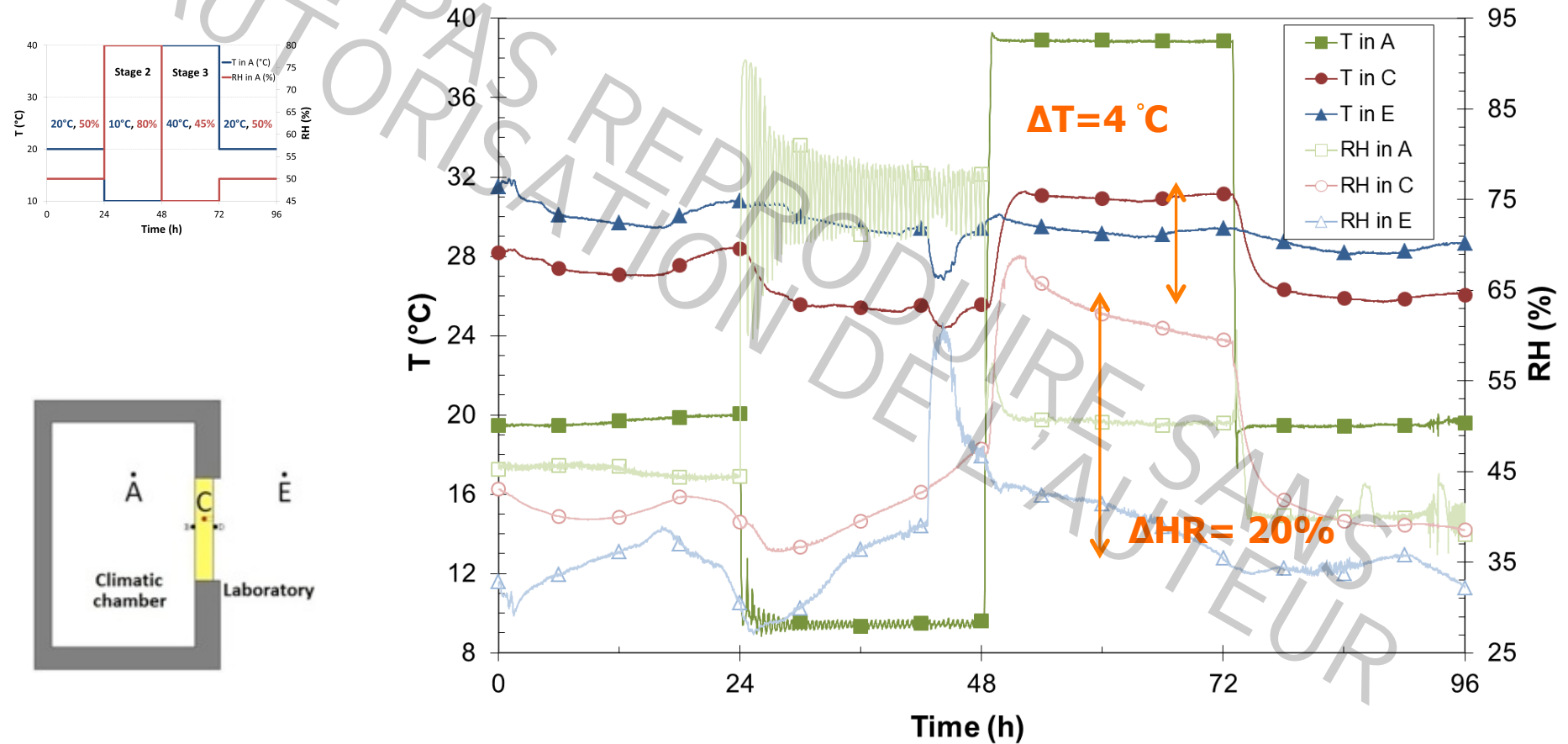
Cas **SANS** échanges convectifs

[GOURLAY, 2012]

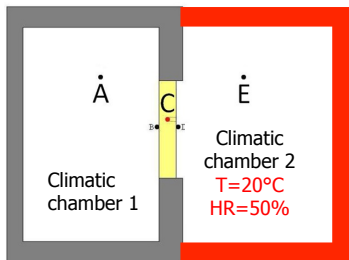
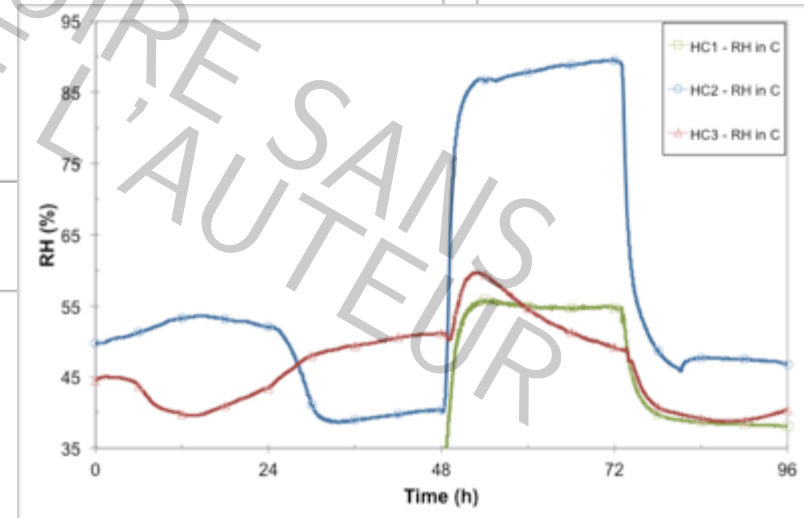
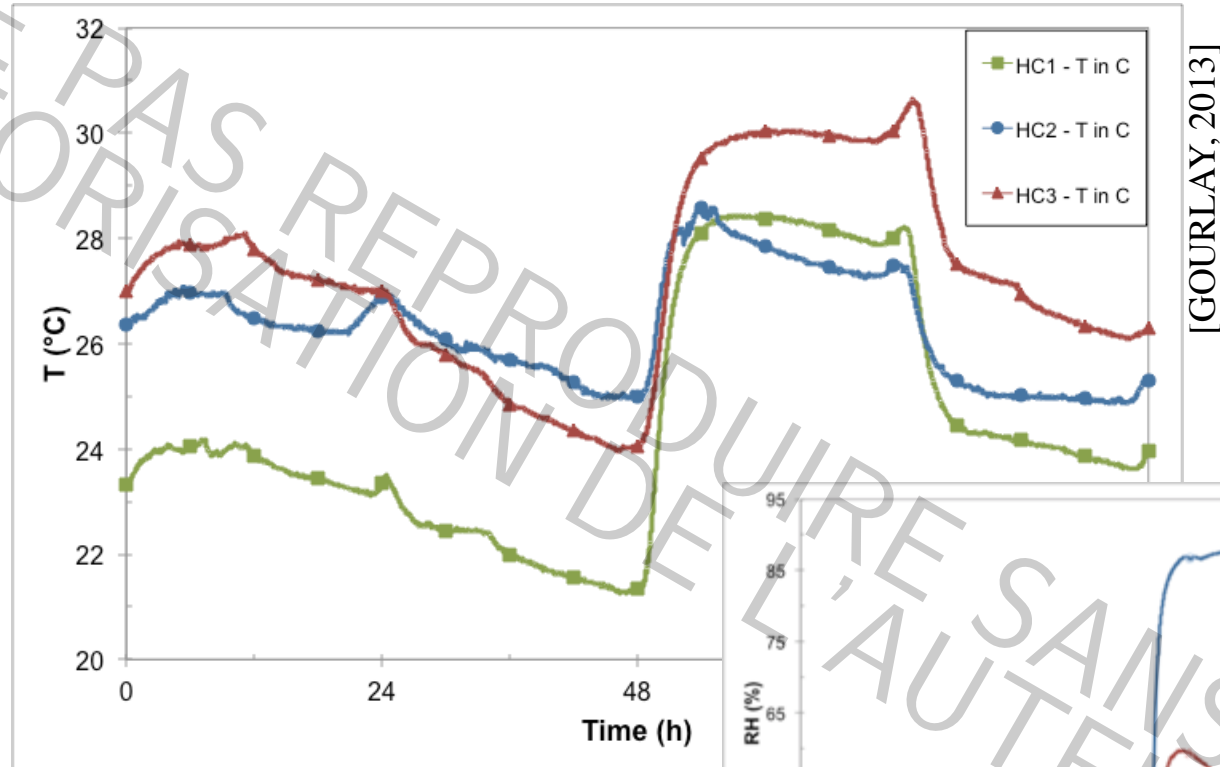
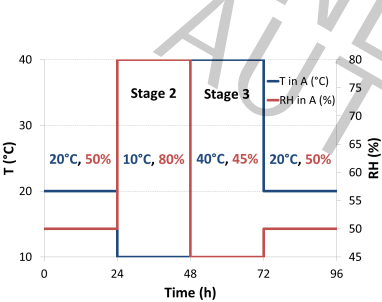


Cas **AVEC** échanges convectifs

[GOURLAY, 2012]



Effet de la chènevotte (taille diff., form, liant id)



Paramètres: T et HR

Impact du changement de phase
(L_v : chaleur latente de changement de phase)

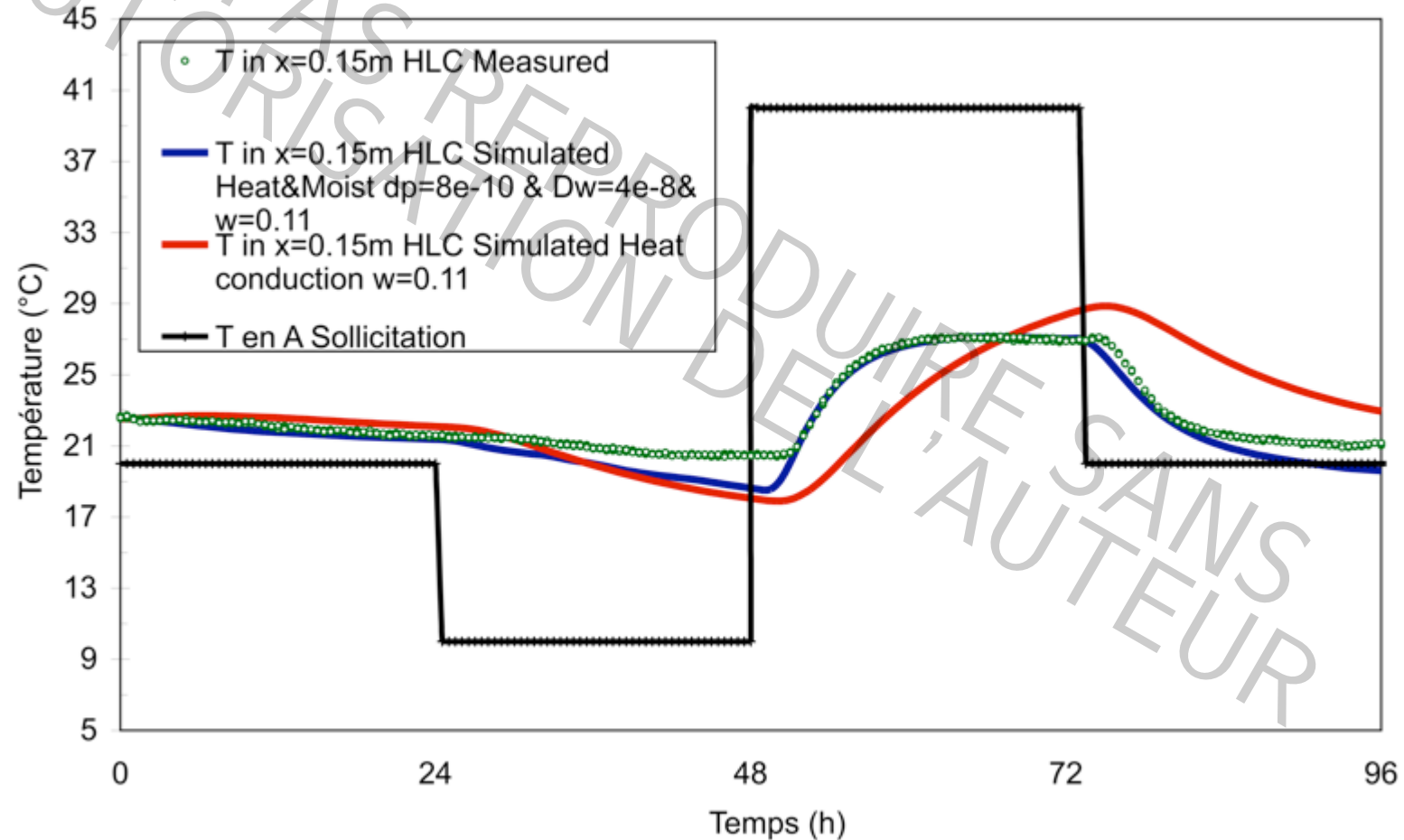
$$\rho.c. \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \cdot \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat}) \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial HR} \cdot \frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial HR} \cdot D_w \cdot \frac{\partial HR}{\partial x} \right) + \delta_p \cdot \frac{\partial}{\partial x} (HR \cdot p_{sat})$$

Transport d'eau liquide
(D_w : diffusivité hydrique isotherme [$m^2.s^{-1}$])

Diffusion de vapeur
(δ_p : perméabilité à la vapeur d'eau)

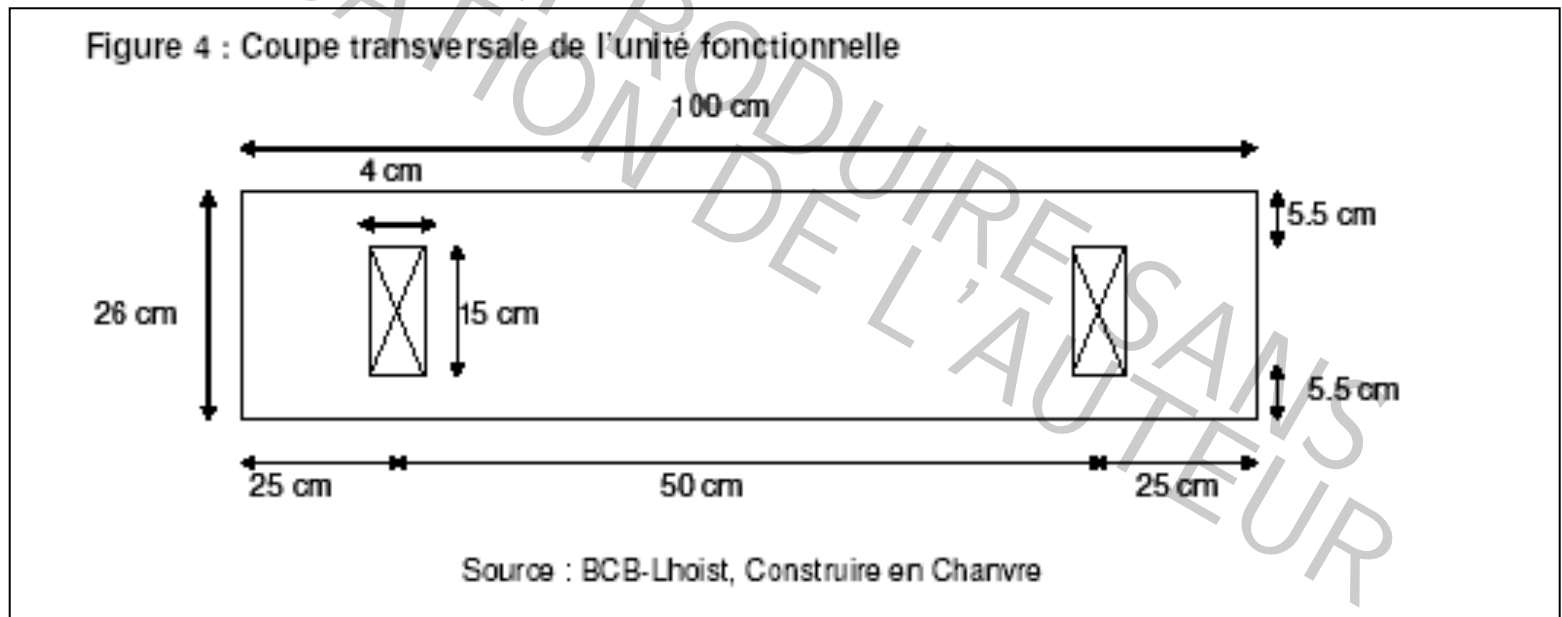
Modélisation numérique avec prise en compte des transferts et changements de phase



- NE PAS REPRODUIRE
AUTORISATION DE LIRE
SANS AUTEUR
1. Utilisation du chanvre dans la construction
 2. Approche globale du comportement
 3. Performances thermiques et transferts hygrothermiques
 4. Conclusions

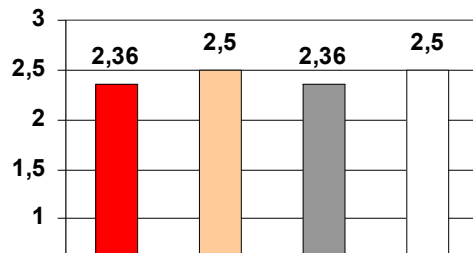
ACV: Analyse du Cycle de Vie des bétons de chanvre

Unité fonctionnelle : 1m² de mur en béton de chanvre ayant une résistance thermique de 2.36 m².K/W



Resistance thermique

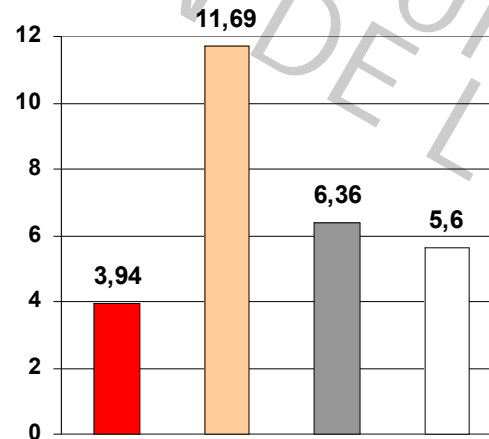
de différents matériaux destinés à
la construction de murs
(m²,K/W)



- Béton chanvre et chaux sur ossature bois (26cm)
- MONOMUR Terre Cuite rectifié pour pose à joint mince (37cm)
- Blocs en béton + PSE Th 38 épaisseur 10+80
- Béton Cellulaire (Thermopierre - 30cm - 400 kg/m³)

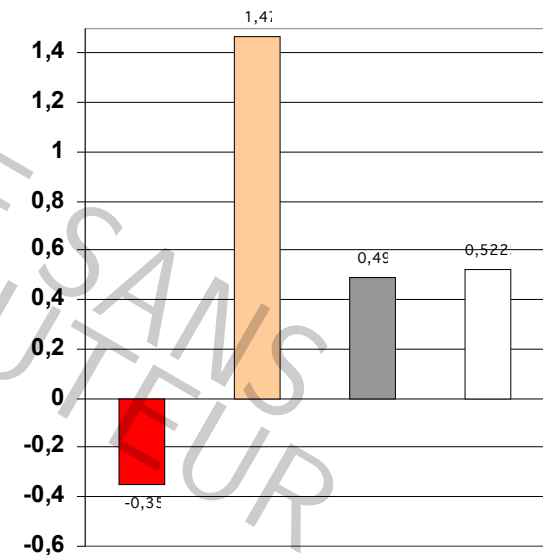
Consommation Energie Primaire Totale

production de 1m² / 1an de vie
(MJ/an)



Changement climatique

pour 1m² de mur / 1 an de vie
(kg équivalent CO₂/an)

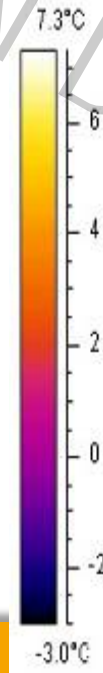




Briques



Béton de chanvre



Exemple de réalisation :

- Réhabilitation d'un bâtiment tertiaire
- « Isolation » d'une maçonnerie traditionnelle de pierres par un enduit chanvre / chaux (6 - 10 cm)



Maison Diocésaine de Chalons en Champagne
Architectes : Atelier Méandre

- Moyenne nationale de consommation énergétique
> 250 kWh/m²/an
- Moyennes des consommations (4 ans)
< 64 kWh/m²/an

Merci de votre attention

Laurent.arnaud@ensam.eu