

# Soutenance de thèse

Approche Conjointe Acoustique et Thermique pour  
l'Optimisation des Laines Végétales du Bâtiment

Clément PIÉGAY

## Rapporteurs

Florence COLLET

Olivier DAZEL

## Invité

Luc JAOUEN

## Encadrants

Emmanuel GOURDON

Philippe GLÉ

Etienne GOURLAY

## Examineurs

Laurent ARNAUD

Alain CELZARD

Sandrine MARCEAU

Jeudi 14 novembre 2019

# De grands défis environnementaux et sanitaires



- 45% de l'énergie finale consommée [ADEME 2018]
- 22 % des émissions de CO<sub>2</sub>

- **Nuisances sonores**  
86% des français déclarent être gênés à leur domicile [Etude IFOP 2014]
- **11,5 milliards € / an** [CNB & ADEME 2016]

## Recommandation de l'OMS

[OMS 2018]

- Lignes directrices visant à protéger des effets nocifs du bruit

## Recommandation du GIEC

[GIEC 2018]

- Réduire drastiquement la demande en énergie du bâtiment



« l'utilisation de matériaux biosourcés joue un rôle important dans le stockage du carbone atmosphérique »

[Fibra Innovation 2018]

Jean Jouzel, ancien vice-président du GIEC



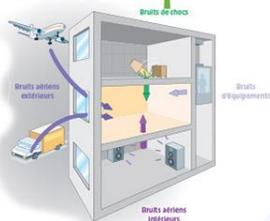
« Les matériaux biosourcés sont, par définition, des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale »

[Définition du MTES]

# Les réponses réglementaires



Réglementation Acoustique



CRÉATION D'EMPLOI ECO INDUSTRIES COP21 ENERGIES RENOUVELABLES ECONOMIES D'ENERGIE

**LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE pour la CROISSANCE VERTE LA LOI EST VALIDÉE !**

CLIMAT DURABLE MOBILITÉ ÉCONOMIE CIRCULAIRE FRANCE EXEMPLAIRE SIMPLIFICATION ZÉRO PESTICIDES LUTTE CONTRE LE GASPILLAGE

**DIMINUTION DE NOTRE CONSOMMATION D'ÉNERGIE**

**-20% En 2030**      **-50% EN 2050**

OBJETIF DE LA LOI

@ecologiEnergie - #LOIROYAL #VOTREENERGIE

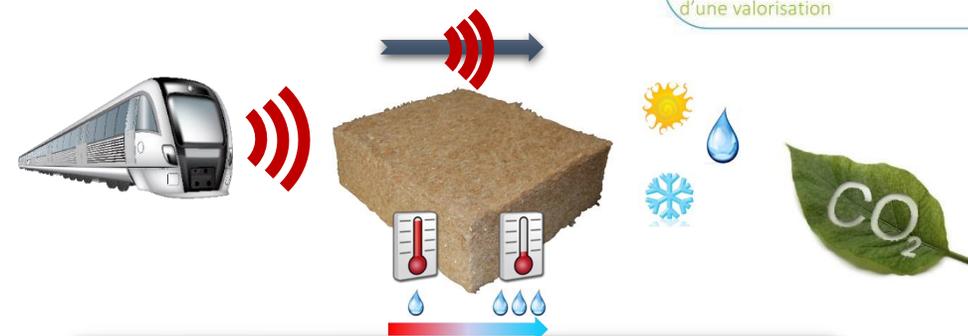


**RE 2020** Bâtiment à **Énergie Positive & Réduction Carbone**



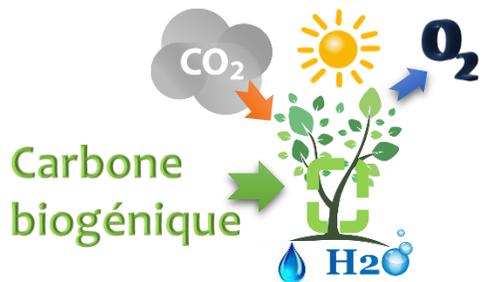
**Titre II - Article 14**

VI.- L'utilisation des matériaux biosourcés concourt significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles...



- Isolant** → **Enjeu majeur**
- Confort hygrothermique
  - Confort acoustique

# De la culture des plantes aux laines végétales



[Pittau *et al.* 2018]



Carbone (C) = 50% masse plante

**15 t de CO<sub>2</sub> captées**

1 ha de forêt = 1 ha de chanvre/lin

**90 ans**  **1 an**

[Eriksson *et al.* 2018]

## Cultures performantes



## Récolte des tiges



## Fibres



## Laines végétales



+ polymères

### Plantes à croissance rapide

- Diversification de la rotation
- Peu de traitements phytosanitaires

### Rouissage

[Mazian *et al.* 2018]

- 1ère étape naturelle de transformation qui conditionne les opérations d'extraction

### Thermoliage

- Process de fabrication des laines végétales

# Des matériaux performants mais encore peu utilisés

## Isolants fibreux de la famille des matériaux poreux

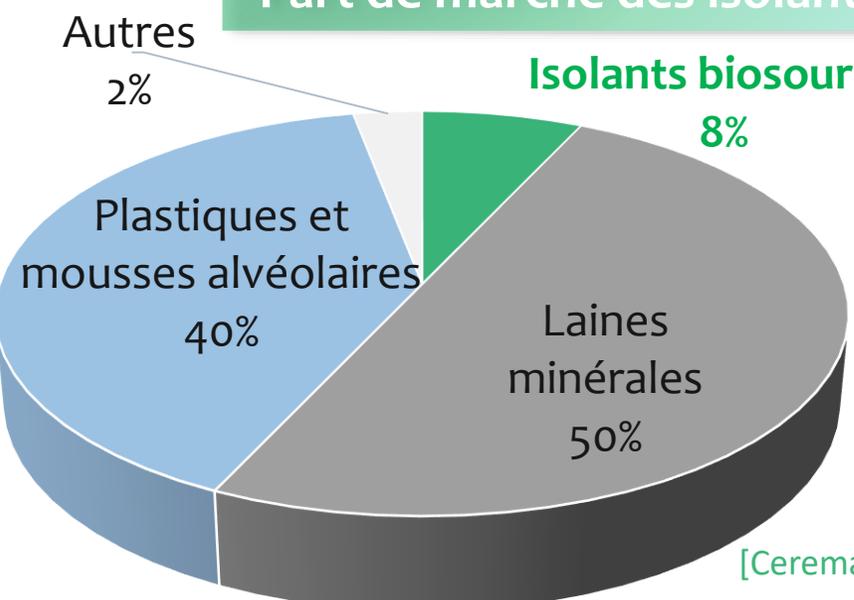
Structure interne constituée d'une partie solide discontinue composée de fibres et possédant un réseau de pores ouverts sur l'extérieur



## Propriétés multifonctionnelles

- Absorption acoustique [Glé 2013] [Arenas & Asdrubali 2018]
- Isolation thermique [Collet 2004] [Volf et al. 2015]
- Caractère hygroscopique [Collet et al. 2008]
- Durabilité [AQC 2016]

## Part de marché des isolants



[Cerema 2017]



- La part monte à 12% pour les maisons individuelles
- dont 50 % laines de bois



- Prix
- Méconnaissances / craintes

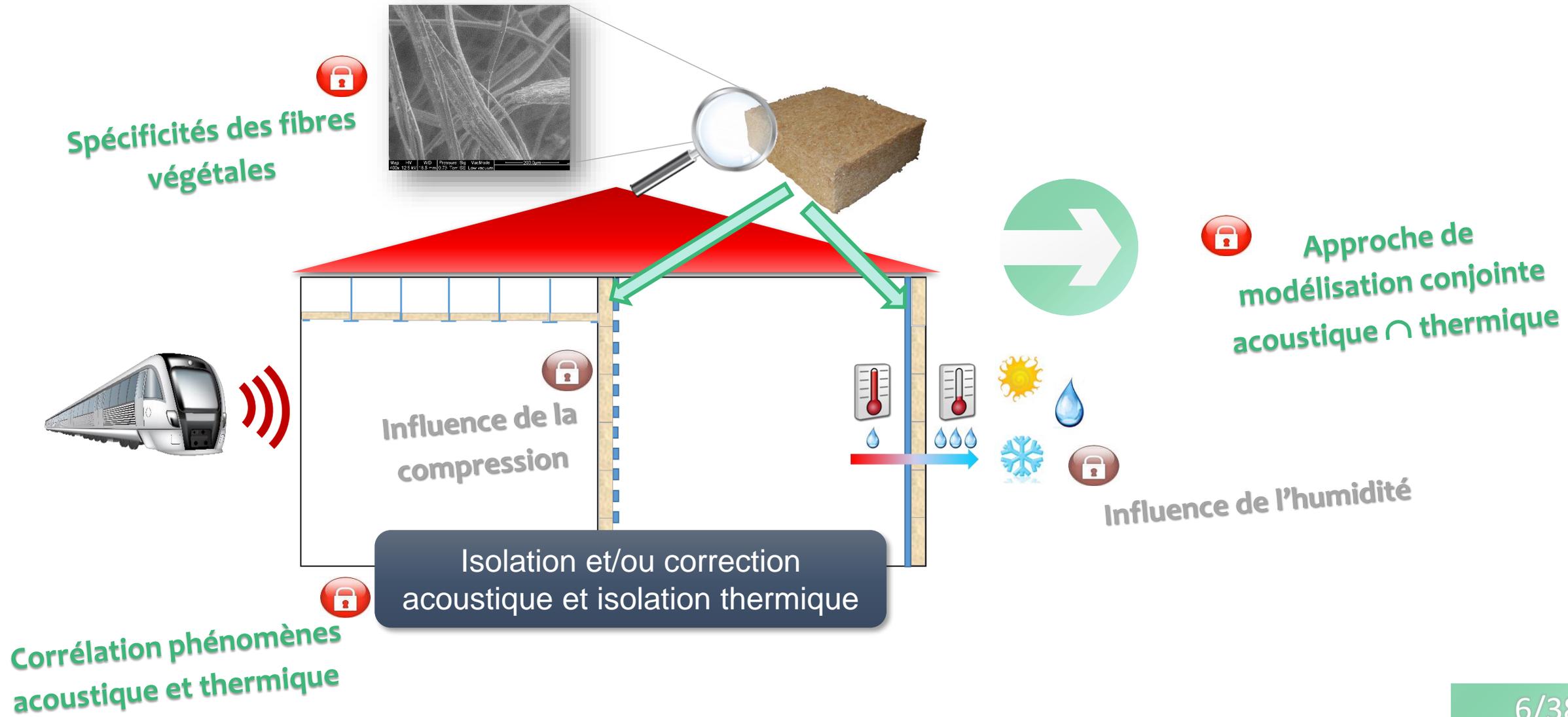


## Préconisations [CESE 2015]

Investigations scientifiques et techniques

# Identification des verrous scientifiques

Pertinence de l'optimisation conjointe des performances acoustiques et thermiques des laines végétales



# Des fibres aux laines végétales : une grande variabilité

## Conditions de culture

[Pallesen 1996] [Tomsen *et al.* 2005]

[Placet *et al.* 2017]

- Propriétés du sol
- Conditions météorologiques
- Période de semis et récolte
- Durée et type du rouissage
- Traitements mécaniques



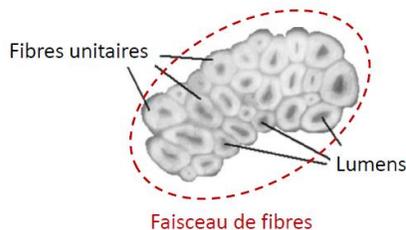
## Echelle des Fibres

- Composition chimique [Pereira *et al.* 2015] [Ramesh 2016]
- Morphologie / Dimensions [Charlet *et al.* 2010] [Placet *et al.* 2010]

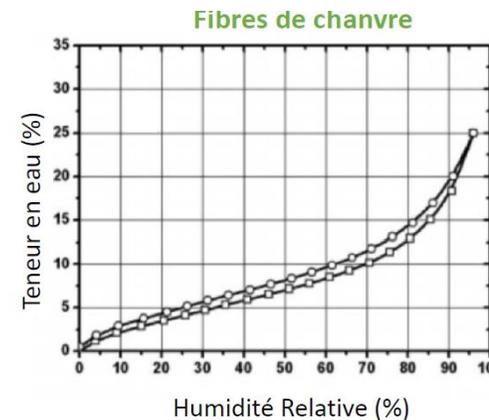
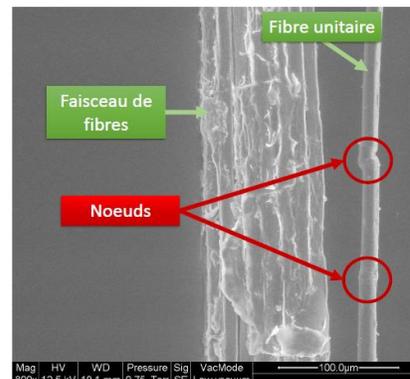


## Echelle des Laines

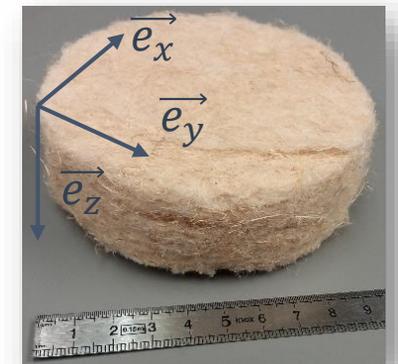
- Répartition / Orientation [Luu 2016]
- Distribution tailles de fibres [Luu *et al.* 2017a]
- Caractère hygroscopique [Collet 2004] [Hill *et al.* 2009]
- Anisotropie [Lei *et al.* 2018]



[Charlet *et al.* 2010]



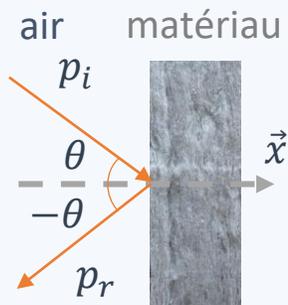
[Hill *et al.* 2009]



# Les propriétés acoustiques et thermiques des laines

## Absorption acoustique

- **Correction acoustique** : maîtriser le niveau sonore d'un local en fonction de ses usages
- Coefficient d'absorption acoustique :  $\alpha$



$$\alpha = 1 - \left| \frac{p_r}{p_i} \right|^2$$

### Hypothèses

- acoustique linéaire [Bruneau 1998]
- phase solide considérée comme rigide [Zwikker & Kosten 1949] [Doutres *et al.* 2009]
- phase fluide siège de dissipations par effets visco-inertiels et thermiques

## Thermique

- 3 modes de transferts de chaleur : **conduction, convection et rayonnement**
- Conductivité thermique :  $\lambda$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
- $\lambda_{eq} = \lambda_{cond} + \lambda_{conv} + \lambda_{rayt}$  [Bories *et al.* 2008]
- **Hypothèse d'effets convectifs négligeables dans les isolants fibreux** [Bankvall 1973] [Lux *et al.* 2006] [Tilioua *et al.* 2012]

## Approche conjointe

- Très peu de travaux dans la littérature
- Matériaux granulaires [Cerezo 2005]
- Matériaux fibreux [Rwawiire *et al.* 2017]
- **Pas d'identification de paramètres ou d'approches de modélisation conjointes**

# Modélisation micro-macro

## Modélisation propriétés Acoustiques et thermiques

### Modélisation Acoustique

- Semi-phénoménologique



Fluide équivalent : JCAL  
 [Johnson *et al.* 1987]  
 [Champoux & Allard 1991]  
 [Lafarge *et al.* 1997]  
 Géométrie des pores

- Empirique



Miki  
 [Miki 1990]

- Homogénéisation micro-macro



HSP  
 [Bensoussan *et al.* 1978]  
 [Sanchez-Palencia 1980]

Description rigoureuse  
 des lois de comportement  
 macroscopique



Couplage HSP-HAC  
 Granulaires  
 [Boutin & Geindreau 2008]  
 [Boutin & Geindreau 2010]

### Modélisation Thermique

- Association phases solides/fluides



Parallèle / série  
 [El Sawahli *et al.* 2016]  
 [Rwawiire *et al.* 2017]

Relations analytiques liant  
 les paramètres  
 microstructuraux aux  
 propriétés macroscopiques



Fibreux en statique  
 [Boutin 2000]

Granulaires  
 [Boutin 1996]  
 [Cerezo 2005]

## Homogénéisation micro-macro

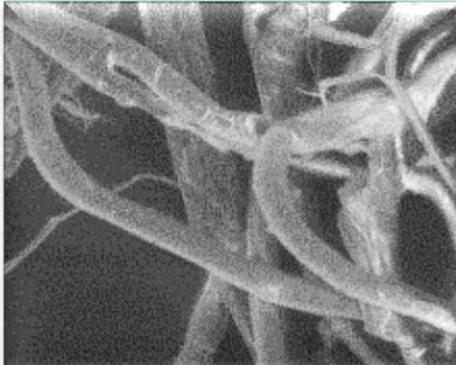
Techniques mathématiques s'appuyant sur la définition d'un milieu homogène équivalent au milieu hétérogène à l'échelle macroscopique. Ce milieu doit présenter le même comportement et répondre aux mêmes conditions aux limites.

# Problématique

En s'appuyant sur les spécificités des laines végétales, peut-on développer une approche de modélisation micro-macro commune afin d'optimiser leurs performances acoustiques et thermiques en vue d'apporter des solutions pour la construction et la rénovation de bâtiments durables ?

# Démarche et objectifs

## Echelle micro



Fibres

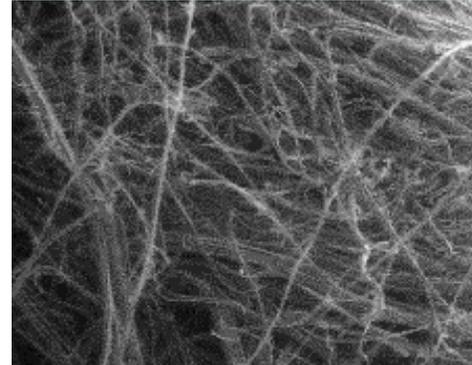
- Rayons de fibres

$$Rf_{veg}, Rf_{pol}$$

- Cond th fibres  $\lambda_s$

- Densité fibres  $\rho_s$

## Echelle méso



Réseau de fibres

- Porosité  $\phi$

Influence eau / Influence masse volumique

## Echelle macro



Panneaux de laines

- Absorption acoustique  $\alpha$
- Conductivité thermique  $\lambda$

## 1 Caractérisations expérimentales

- Spécificités des laines végétales
- Enrichissement des BbD
- Données pour les modèles

## 2 Modélisation

- Spécificités des laines végétales
- Relations analytiques
- Approches communes

## 3 Procédure conjointe

- Paramètres d'entrée communs
- Paramètres restreints
- Outils pour l'optimisation

Méthodes d'homogénéisation

Optimisation acoustique  $\cap$  thermique

# Présentation des matériaux de la thèse

## Panneaux de laines végétales semi-rigides

- 22 matériaux monocouches thermoliés
- De 1 à 3 types de fibres végétales (chanvre-lin, chanvre-lin-coton, bois-kénafe)
- 9 familles de laines
- Epaisseur  $e$  : 25 – 160 mm
- Masse volumique apparente :

$$\rho_a : 25.3 - 93.8 \text{ kg.m}^{-3} (T = 25 \pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C/HR} = 0 \pm 2\%)$$

$$\rho_a : 26.3 - 96.8 \text{ kg.m}^{-3} (T = 25 \pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C/HR} = 40 \pm 2\%)$$



## Types de fibres végétales

- Lin
- Chanvre
- Kénafe
- Bois
- Coton
- Coco



## Fibres polymères

- Polyester [8-20%] en masse, 30% pour la laine de coco



## Echantillons

- Echantillons cylindriques  $\varnothing = 100 \pm 2 \text{ mm}$

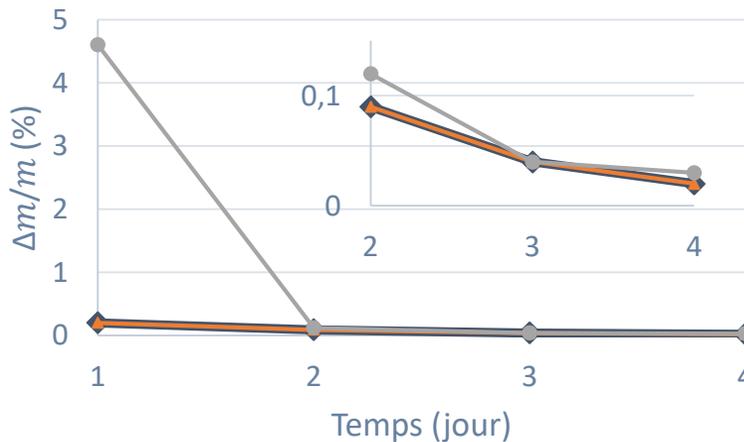


# Présentation des conditions de mesures

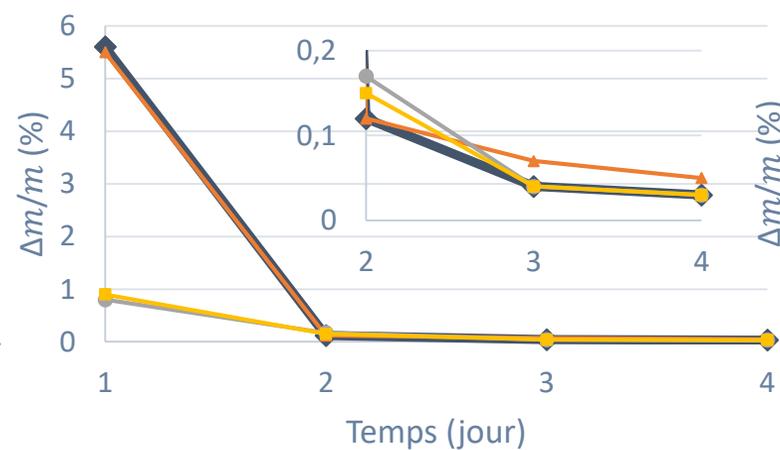
## Etablissement de la masse de référence

- Séchage des échantillons en étuve à 50°C avec suivi de la masse

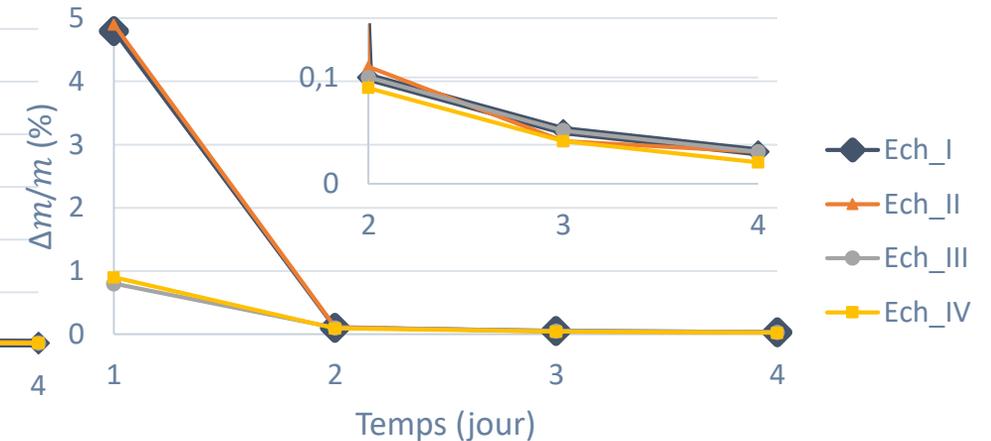
Laine de coco (I)



Laine de chanvre (L)



Laine de lin (D)



## Conditionnement des matériaux

- Dessiccateur avec gel de silice :  $HR = 3\%$
- Laboratoire :  $HR = 40\%$
- Dessiccateur avec solution saturée NaCl :  $HR = 75\%$

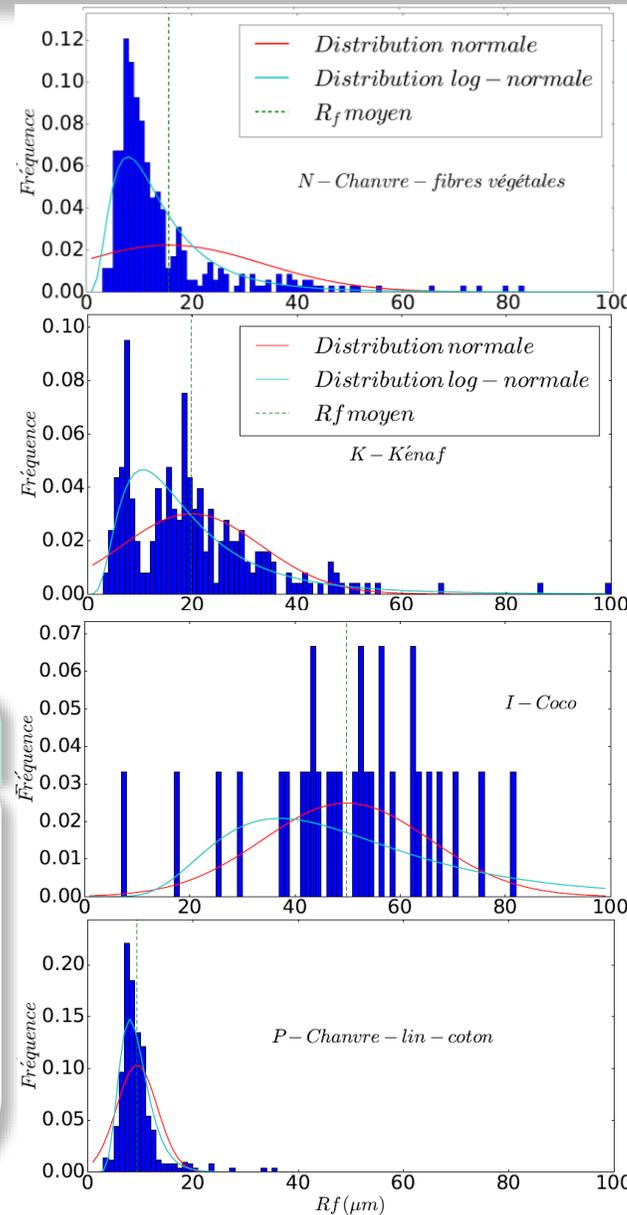
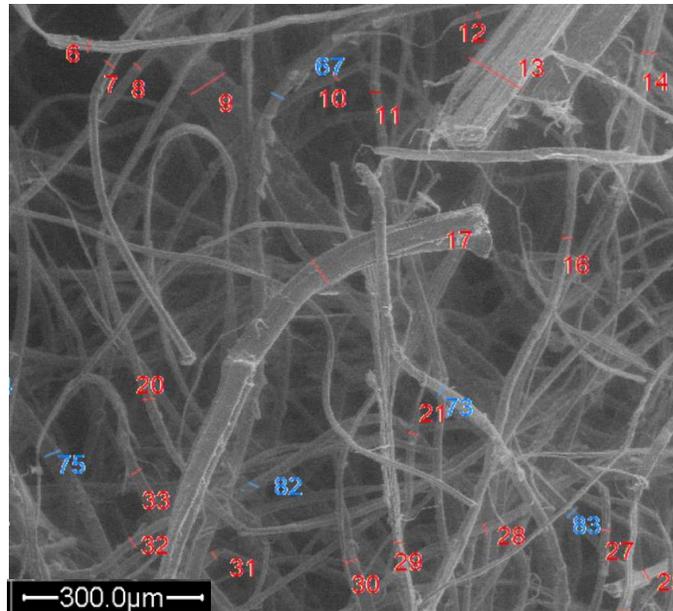
# Caractérisations des paramètres micro et méso

Dispositif	Paramètre	HR 0%	HR labo	HR 75%	Echantillon	Compression
MEB	Rf		X			
Porosimètre différentiel pression	$\rho_s \phi$		X			
Porosimètre comparaison volumes d'air	$\rho_s \phi$		X			
Pycnomètre hélium	$\rho_s \phi$		X			
Tube impédance	$\alpha_\infty \Lambda \Lambda' \Xi_0$		X			X

# Caractérisations des propriétés des laines

Dispositif	Propriété	HR 0%	HR labo	HR 75%	Echantillon	Compression
Tube impédance	$\alpha, \rho, K$	X	X	X		X
	$\rho_{imp}$		X			
	$E, \nu$		X			
Conductivimètre Fil Chaud	$\lambda$	X	X			
Conductivimètre Hot Disk	$\lambda$	X	X	X		X
Conductivimètre Boîte Chaude	$\lambda$		X			X
DVS	$w_m$		X			X
Résistivimètre	$\sigma$		X			X

# Distributions de rayons de fibres



Type de laine	Réf.	$R_{f\text{ pol}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{f\text{ veg}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{f\text{ moy}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_{\text{ moy}}$ ( $\mu\text{m}$ )
Chanvre	N	10.75	15.60	14.28	1.74
Kénaf	K	12.86	19.84	16.88	1.68
Coco	I	11.52	49.79	15.63	1.61
Chanvre-lin-coton	P	10.89	9.38	9.49	1.37

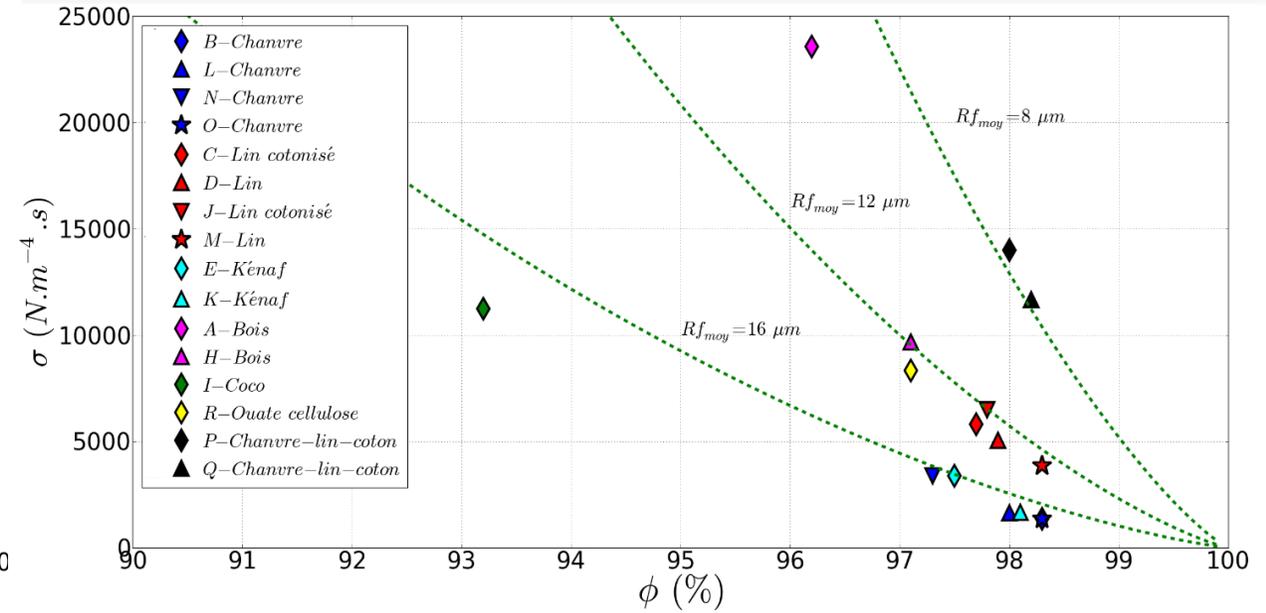
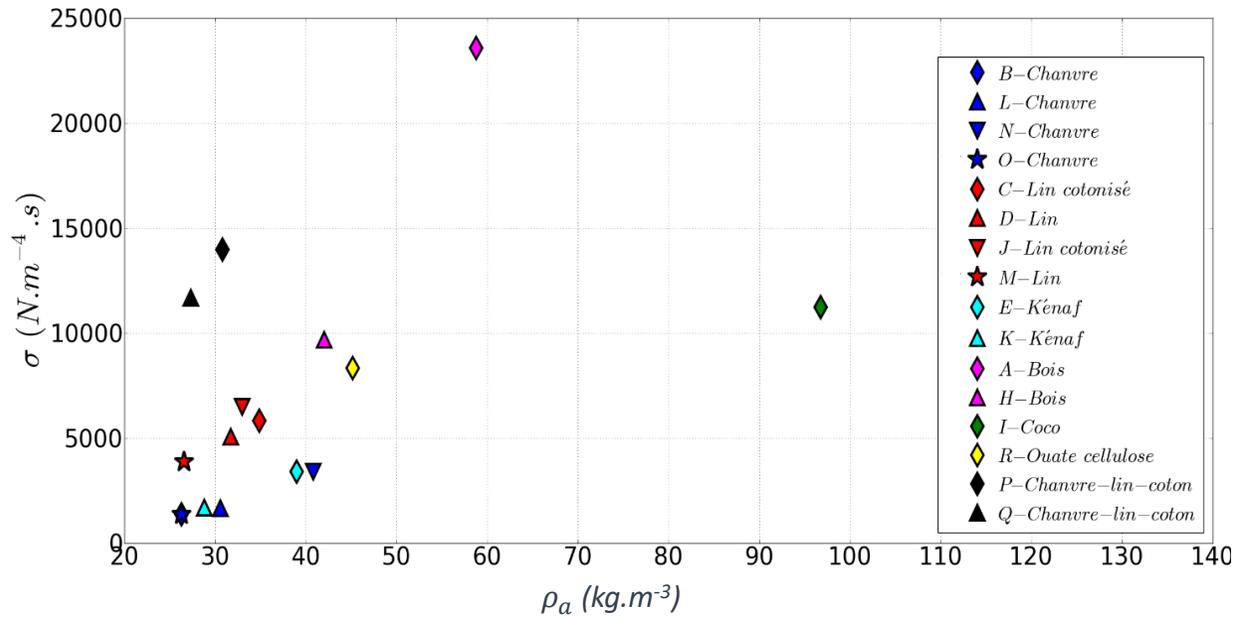
### Hypothèses

- Fibres et faisceaux considérés comme circulaires pour le relevé manuel des rayons de fibres

### Résultats

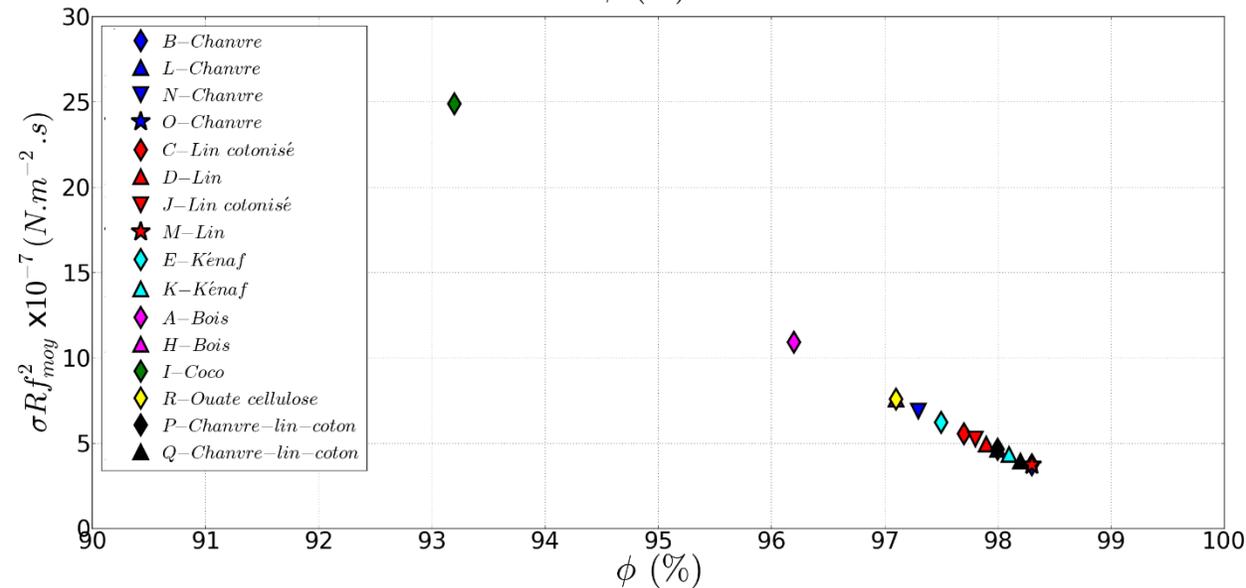
- Grande variabilité et hétérogénéité des distributions de rayons de fibres végétales
- Possibilité de modéliser par une distribution log-normale

# Résistivité et porosité ouverte des laines végétales

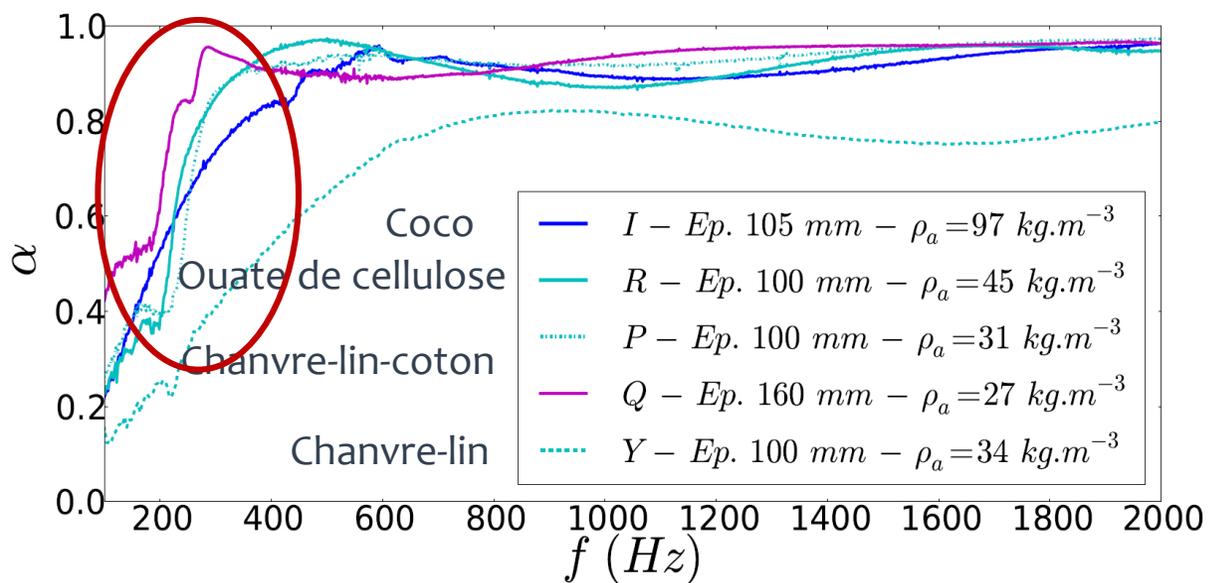
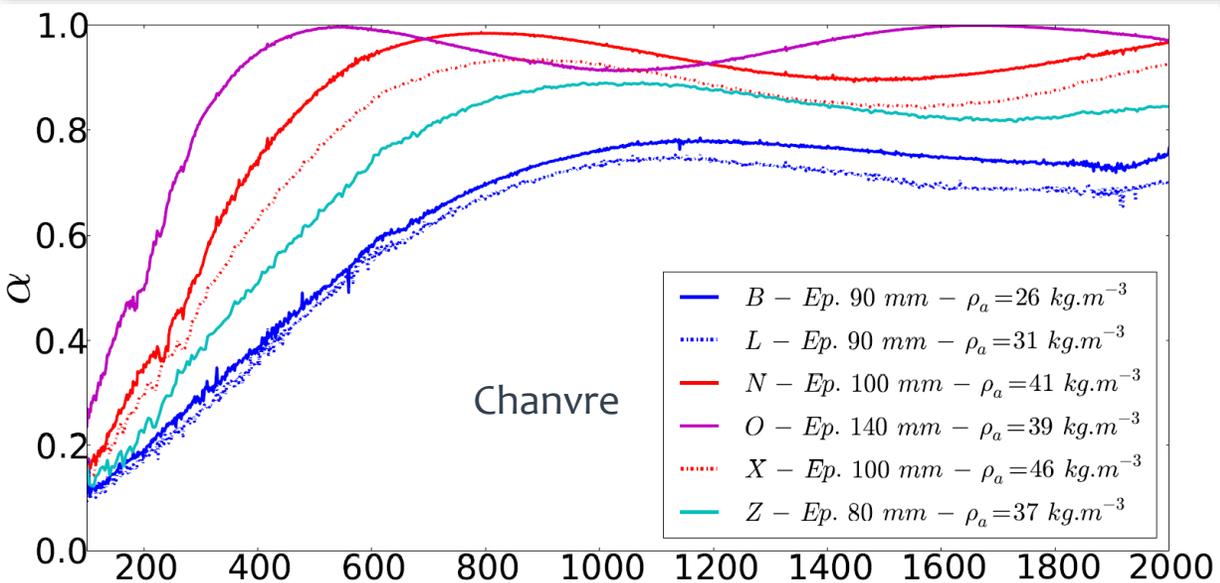


## Résultats

- 1000  $N \cdot m^{-4} \cdot s < \sigma < 25\,000 N \cdot m^{-4} \cdot s$
- Porosité élevée :  $96.2\% < \phi < 98.3\%$  et  $93.2\%$  pour la laine de coco
- Lien entre  $\sigma$ ,  $\phi$ ,  $\rho_a$  et  $Rf$



# Le large panel d'absorption acoustique



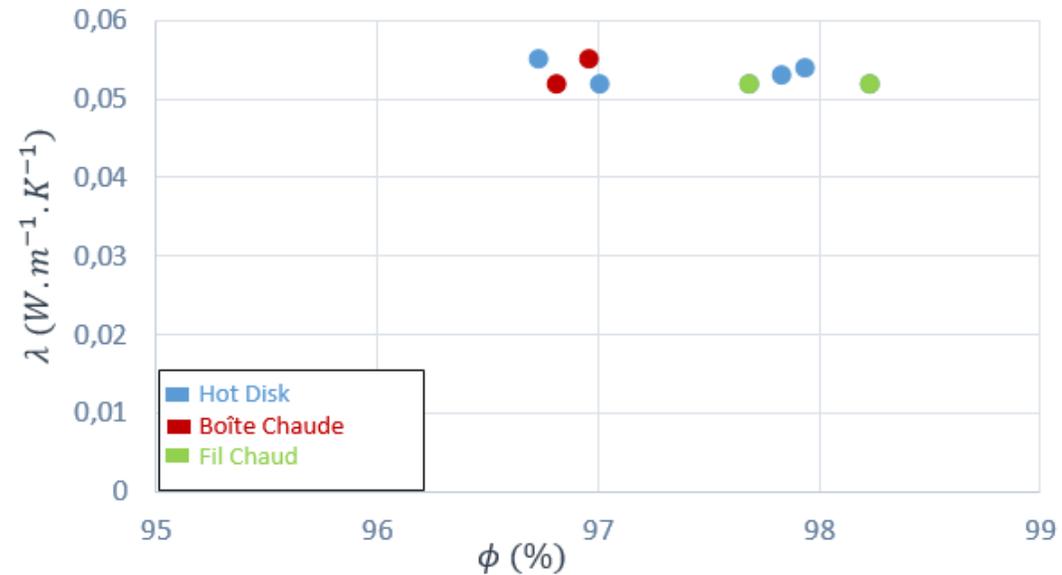
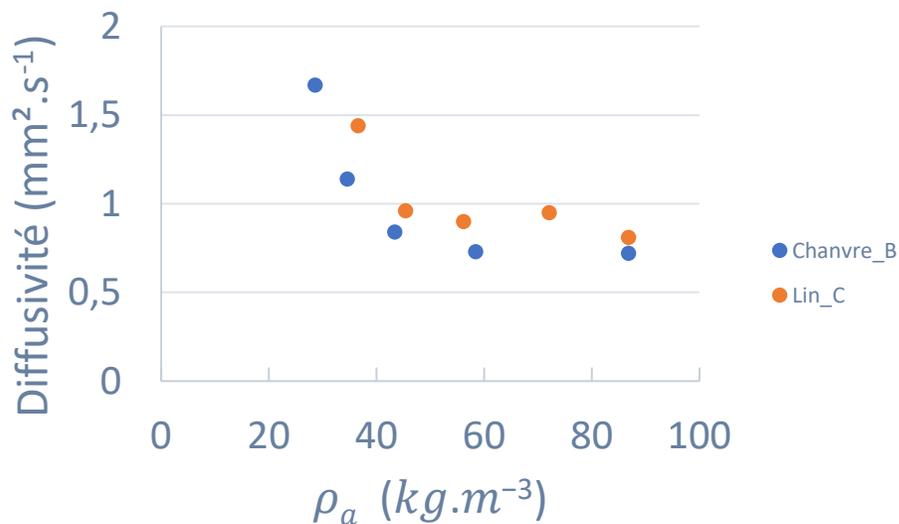
## Résultats

- Large panel d'absorption pour  $25 \leq e \leq 160 \text{ mm}$  et  $26 \leq \rho_a \leq 97 \text{ kg.m}^{-3}$
- Bon niveau de performances en absorption pour moyennes et hautes fréquences
- Apparition possible de phénomènes de résonances élastiques lorsque  $e$  augmente ○

# Caractérisation de la conductivité thermique

● Conditions de mesures du laboratoire :

**$HR = 40 \pm 2\%$  et  $T = 25 \pm 0.8^\circ C$**



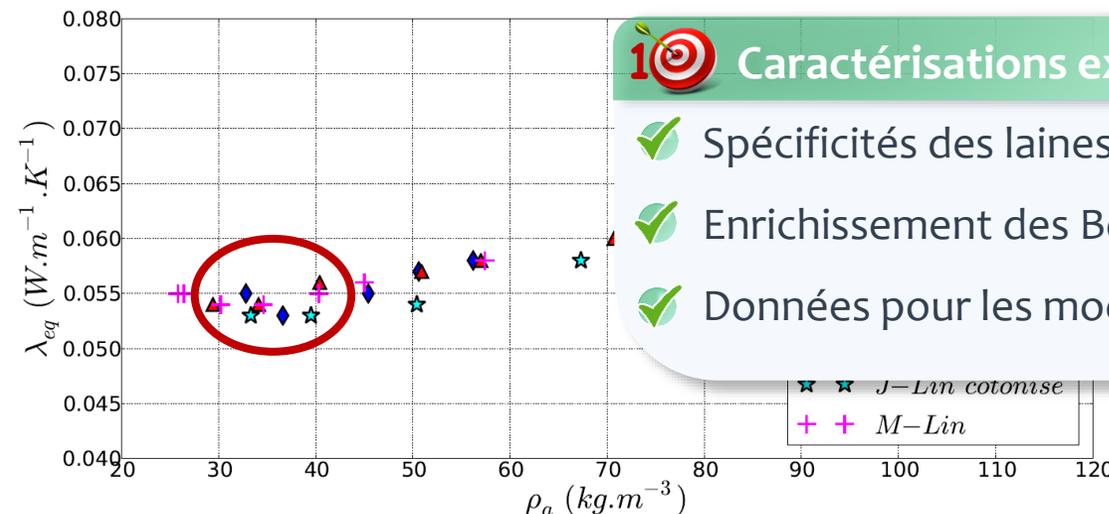
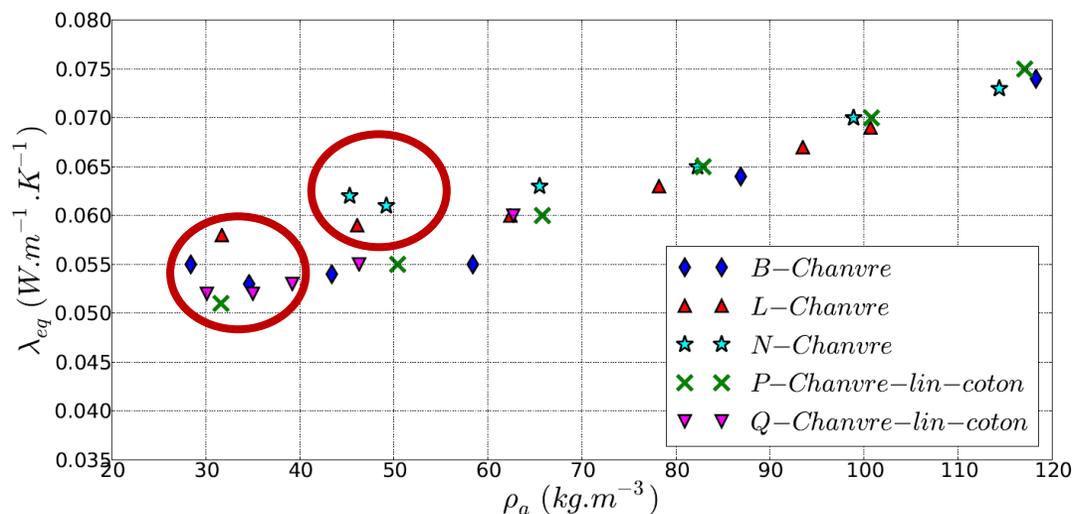
## Résultats

- Caractérisation possible de la diffusivité
- Concordance entre les résultats pour 3 types de dispositifs reposant sur les régimes transitoires et permanents

Type de laine	Réf.	$\lambda$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
Chanvre	B	0,054
Kénaf	K	0,053
Coco	I	0,061
Ouate de cellulose	R	0,052
Chanvre-lin-coton	P	0,051

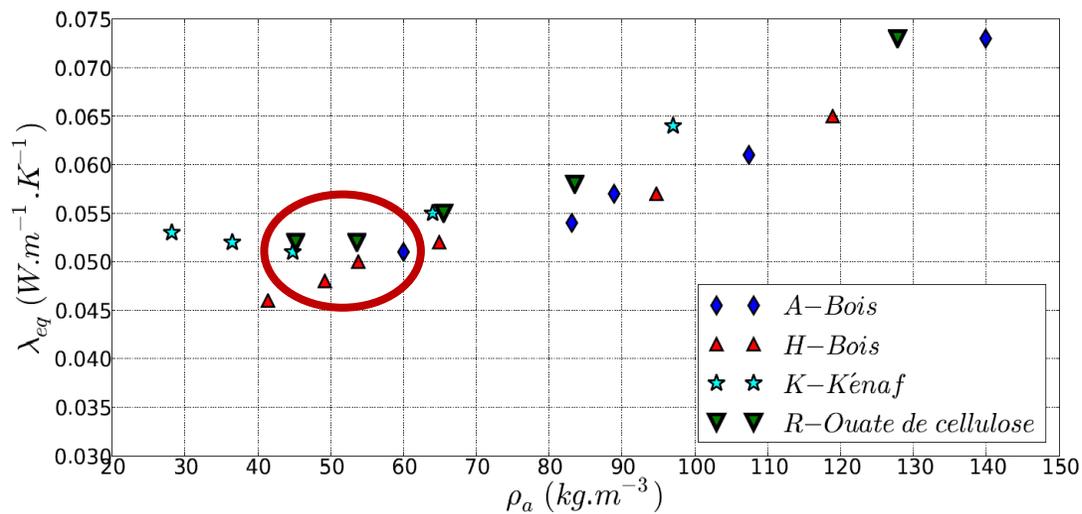
# Transferts thermiques par conduction et rayonnement

Mesures de conductivité thermique avec variation de la masse volumique des échantillons ( $HR = 40 \pm 2\%$  et  $T = 25 \pm 0.8^\circ C$ )



**1** **Caractérisations expérimentales**

- ✓ Spécificités des laines végétales
- ✓ Enrichissement des BdD
- ✓ Données pour les modèles

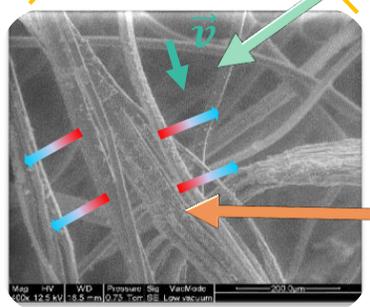
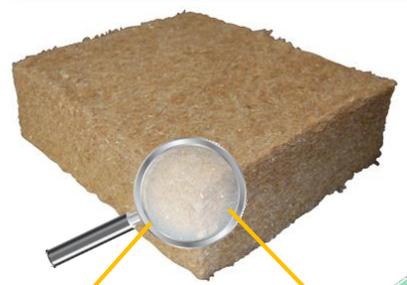


## Résultats

- Identification d'un optimum de transfert couplé conduction-rayonnement
- Pour  $\rho_a < 60 \text{ kg.m}^{-3}$  : influence des effets de rayonnement
- Pour  $\rho_a > 60 \text{ kg.m}^{-3}$  : prépondérance des effets de conduction

# Hypothèses de bases sur les laines végétales

- Milieu à simple porosité
- Porosité ouverte et pores interconnectés



**Phase fluide : air**  
 Fluide newtonien compressible de viscosité  $\mu$

**Phase solide : fibres**  
 Imperméables  
 Squelette rigide

**Dissipation acoustique**  
 Effets visqueux : frottement du fluide sur le squelette ( $\rho$ )  
 Effets thermiques : échanges de chaleur avec le squelette ( $K$ )

**Coefficient d'absorption acoustique**  
 $\alpha = f(\rho, K, e)$

**Transferts de chaleur**  
 Conduction ( $\lambda_{cond}$ )  
 Rayonnement ( $\lambda_{rayt}$ )  
 Convection négligée

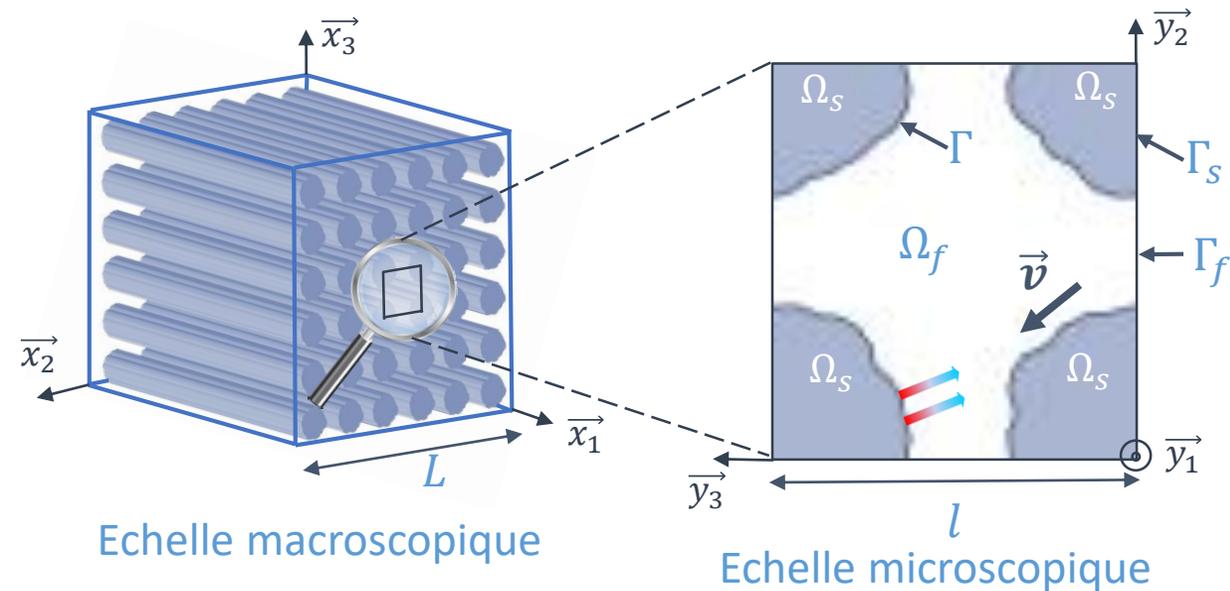
**Conductivité thermique équivalente**  
 $\lambda_{eq} = \lambda_{cond} + \lambda_{rayt}$

Si dissipation mécanique → **Biot** [Biot 1956]  
**Limp** [Panneton 2007]

# Homogénéisation des structures périodiques (HSP) 1/2

## Hypothèses liées aux méthodes d'homogénéisation

- Existence d'une volume élémentaire représentatif [Auriault 1980]
- Séparation entre les échelles microscopiques et macroscopiques



- $\frac{l}{L} = \varepsilon \ll 1$

- $\vec{x} = \varepsilon \vec{y}$

## Développements asymptotiques

$$f(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon^i f^i(\vec{x}, \vec{y})$$

avec  $f^i(\vec{x}, \vec{y}) \Omega$  - périodique en  $\vec{y}$

## Effets visco-inertiels

- Pression uniforme au premier ordre dans les pores

$$\vec{\nabla}_y p^0 = \vec{0} \rightarrow p^0(\vec{x}) = P$$

- Fluide localement incompressible

$$\vec{\nabla}_y \cdot \vec{v}^0 = 0$$

- Equation de Navier-Stokes

$$\mu \Delta_y \vec{v}^0 - \vec{\nabla}_y p^1 - \vec{\nabla}_x p^0 = j\omega \rho_0 \vec{v}^0$$

## Effets thermiques

- Equation de la chaleur

$$\lambda \Delta_y T^0 - j\omega \rho_0 C_p T^0 = -j\omega p^0$$

# Homogénéisation des structures périodiques (HSP) 2/2

## Formulation variationnelle

- Produit scalaire des équations de Navier-Stokes et de la chaleur par  $\vec{w}$   
 $\vec{w} \in W = \{ \vec{w}, \Omega - \text{périodique } \nabla_y \cdot \vec{w} = 0, \overline{w}_{/\Gamma} = \vec{0} \}$
- Intégration sur  $\Omega$  + Théorème de flux divergence

[Auriault 1980]

[Olny 1999]

[Boutin & Geindreau 2008]

## Effets visco-inertiels

- Loi de Darcy

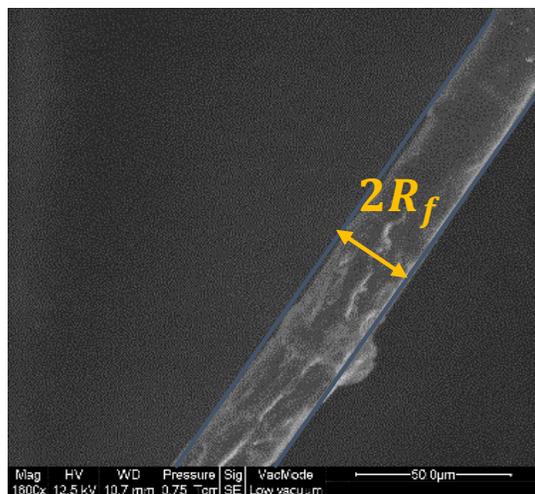
$$\langle \vec{v}^0 \rangle_{\Omega} = -\frac{[\Pi(\omega)]}{\mu} \nabla_x p^0(\vec{x}, \omega)$$

## Effets thermiques

- Equivalent loi de Darcy thermique

$$\langle T^0 \rangle_{\Omega} = -\frac{\Xi(\omega)}{\lambda_0} j\omega p^0(\vec{x}, \omega)$$

# Elaboration du motif générique pour l'HAC



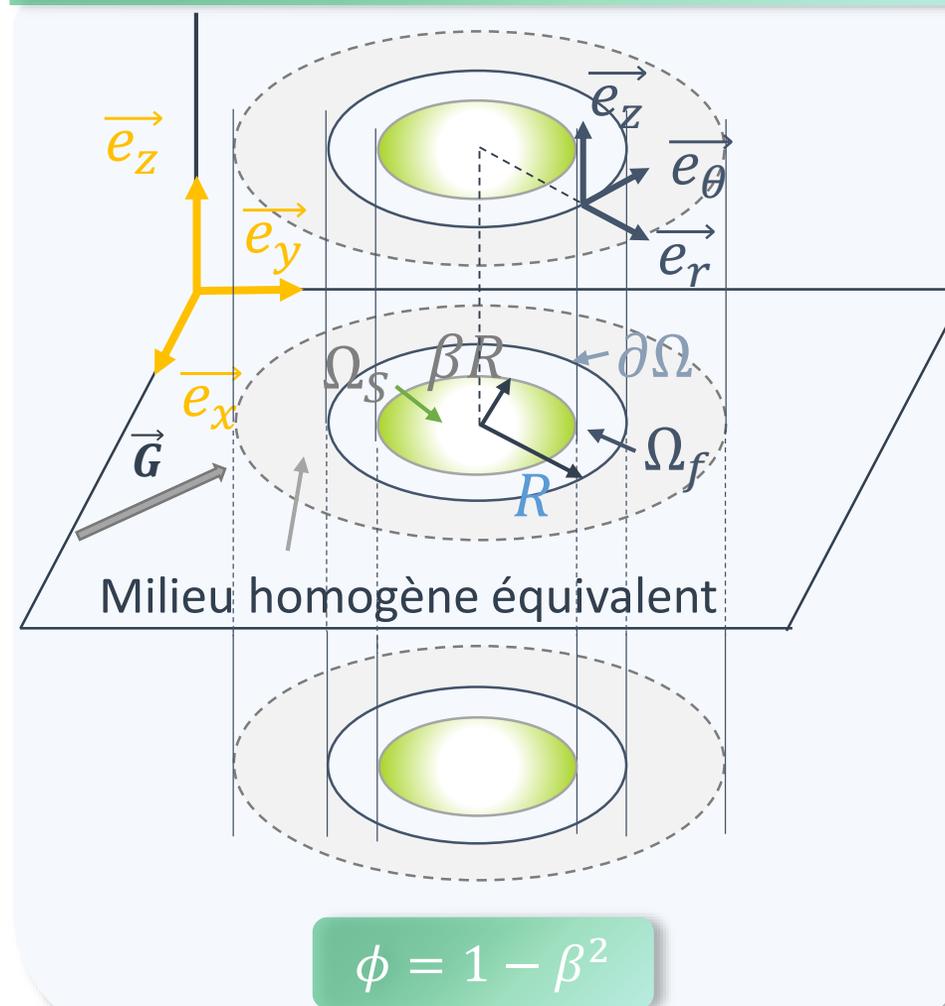
## Hypothèses

- Fibres = cylindre de rayon constant et de longueur infinie
- Flux perpendiculaire aux fibres

Acoustique :  $\vec{G} = \vec{\nabla}P$

Thermique :  $\vec{G} = \vec{\nabla}T$

## Motif générique acoustique



# Modélisation HAC statique de la conductivité thermique

## Equation de la chaleur en statique

$$\frac{\partial^2 T_i(r, \theta)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i(r, \theta)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i(r, \theta)}{\partial \theta^2} = 0$$

Avec  $i$  = phases solide, fluide ou milieu équivalent



## Solution

$$T_i(r, \theta) = G(c1_i \cdot r + \frac{1}{r} c2_i) \sin \theta$$

Avec  $c1_i$  et  $c2_i$  des constantes

## Conditions aux limites

- Continuité de la température et du flux à l'interface fluide/solide et à l'interface inclusion/milieu homogène équivalent
- Hypothèse de consistance énergétique entre l'inclusion générique et le milieu homogène équivalent



## Conductivité thermique de conduction

$$\lambda_{cond} = \lambda_s \left[ 1 + \frac{\phi}{\frac{1-\phi}{2} + \frac{1}{\lambda_f/\lambda_s - 1}} \right]$$

Pour  $\lambda_s \neq \lambda_f$

$$\lambda_{cond} = \lambda_s \frac{(\lambda_s + \lambda_f) - \phi(\lambda_s - \lambda_f)}{(\lambda_s + \lambda_f) + \phi(\lambda_s - \lambda_f)}$$

# Modélisation du rayonnement

## Rosseland-Deissler

$$\lambda_{rayt} = \frac{4\sigma_{sb}\langle T_{moy} \rangle^3 e}{\left(\frac{2}{\phi} - 1\right) + \beta_{moy}\rho_a e} \quad [\text{Deissler1964}]$$

Avec  $\beta_{moy}$  le coefficient d'extinction moyen

## Bankvall

$$\lambda_{rayt} = 4\sigma_{sb}\langle T_{moy} \rangle^3 \beta' L_0 \quad [\text{Bankvall1973}]$$
$$L_0 = \frac{\pi R f_{moy}}{4(1 - \phi)}$$

Avec  $\beta'$  le coefficient de rayonnement

Couplage avec  $\lambda_{cond}$  obtenue par modélisation HAC

$\lambda_{eq}$

# HAC dynamique pour l'absorption acoustique 1/3

## Effets visco-inertiels

[Boutin & Geindreau 2008]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad \mu \Delta \vec{v} - \vec{\nabla} p = j\omega \rho_0 \vec{v}$$



$$p(\vec{G}, h(r)) \quad \vec{v}(\vec{G}, f(r), h(r))$$

## Effets thermiques

[Boutin & Geindreau 2010]

$$\lambda \Delta T - j\omega \rho_0 c_p T = -j\omega p$$



$$T(\vec{G}, \xi(r))$$



- $$h(r) = c_0 \ln(r) + \frac{c_1 \cdot r^2}{4}$$

- $$f(r) = \delta_v^2 \left( -c_0 \ln(r) + \frac{c_1 \cdot r^2}{4} - c_1 \delta_v^2 \right) + c_2 I_0 \left( \frac{r}{\delta_v} \right) + c_3 K_0 \left( \frac{r}{\delta_v} \right)$$

- $$\xi(r) = \delta_t^2 + c_4 I_0 \left( \frac{r}{\delta_t} \right) + c_5 K_0 \left( \frac{r}{\delta_t} \right)$$

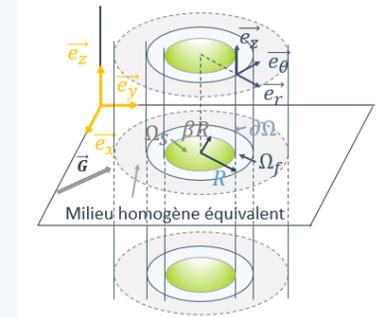
# HAC dynamique pour l'absorption acoustique 2/3

## Conditions aux limites

- Vitesse nulle et variation nulle de température à l'interface solide/fluide en  $r = \beta R$

$$\bullet -\frac{1}{\beta R} \frac{\partial f(\beta R)}{\partial r} = 0 \quad \bullet \xi(\beta R) = 0$$

$$\bullet -\Delta f(\beta R) = 0$$



- Vitesse à la frontière entre l'inclusion et le milieu homogène équivalent, en  $r = R$ :  $\vec{V}(r) = \frac{1}{\Omega_f} \iiint_{\Omega_f} \vec{v}(r) d\Omega$

$$\bullet v_r(R) = V_r(R)$$

- Contraintes à la frontière de l'inclusion, en  $r = R$ :  $\oint_{\partial\Omega} [-(p - P)\vec{I} + 2\mu\mathbf{D}(\vec{v}(r))] \cdot \vec{dS} = 0$

$$\bullet R \frac{\partial h(R)}{\partial r} - \frac{\partial f(\Delta f(R))}{\partial r} = 0$$

- Consistance énergétique

$$-\frac{1}{2} \Delta(f(R)) + \Pi = 0 \text{ (approche en flux) ou } \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f(R)}{\partial^2 r} = 0 \text{ (approche en pression) et } \frac{\partial \xi(R)}{\partial r} = 0$$

7 inconnues :  $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  et  $\Pi$

7 équations

# HAC dynamique pour l'absorption acoustique 3/3

## 3<sup>ème</sup> approche

- 3<sup>ème</sup> cas de figure possible pour les effets visco-inertiels en remplaçant la consistance énergétique par une **condition de vorticité nulle** :

$$\frac{\partial(\Delta(f(R)))}{\partial r} = 0$$

## Solutions

- Approche en flux – notée  $\mathbf{v}$  :  $(\rho_v, K)$
- Approche en pression – notée  $\mathbf{p}$  :  $(\rho_p, K)$

## Approche alternative

- Condition de vorticité nulle – notée  $\mathbf{z}$  :  $(\rho_z, K)$

# Modèle à deux tailles de fibres

## Modèle ( $Rf_{veg}$ , $Rf_{pol}$ )

### ● Modèle acoustique

+

### ● Modèle composite [Gourdon & Seppi 2010]

- $(\Pi_{veg}, K_{veg})$

- $\Pi_h = (1 - \tau)\Pi_{veg} + \tau\Pi_{pol}$

$\tau$  : ratio volumique des fibres polymères dans le milieu fibreux avec couplage total  $F_d = 1$

- $(\Pi_{pol}, K_{pol})$

- $K_h = \left[ \frac{\tau}{K_{pol}} + (1 - \tau) \frac{F_d}{K_{veg}} \right]^{-1}$

[Piégay *et al.* - Acoustical model of vegetal wools including two types of fibers – Applied Acoustics 2018]

● Validation avec modèle de Tarnow [Tarnow 1996a] [Tarnow 1996b] [Tarnow 1997]



## Modélisation

- ✓ Spécificités des laines végétales
- ✓ Relations analytiques
- ✓ Approches communes

# Procédure conjointe

## Matériau fibreux

$\phi, Rf_{moy}$

### Acoustique

Effets visco-inertiels

Effets thermiques



Si  $Rf_{veg} \neq Rf_{pol}$  couplage modèle composite possible



**HAC dynamique**



$\rho_v$  ou  $\rho_p$  ou  $\rho_z$  squelette rigide/limp  $K$



$$Z_c = \sqrt{\rho K}$$

$$k = \omega \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$



Epaisseur matériau ( $e$ )



$\alpha, TL, R_{th}$

### Thermique

Transferts par conduction

Transferts par rayonnement



$\lambda_f = 0,0275 W.m^{-1}.K^{-1}$

Rosseland-Deissler

Bankvall



**HAC**

**statique**



$\beta_{moy}$



$\beta'$

$\lambda_{cond}$

$\lambda_{rayt-RD}$

$\lambda_{rayt-Bk}$



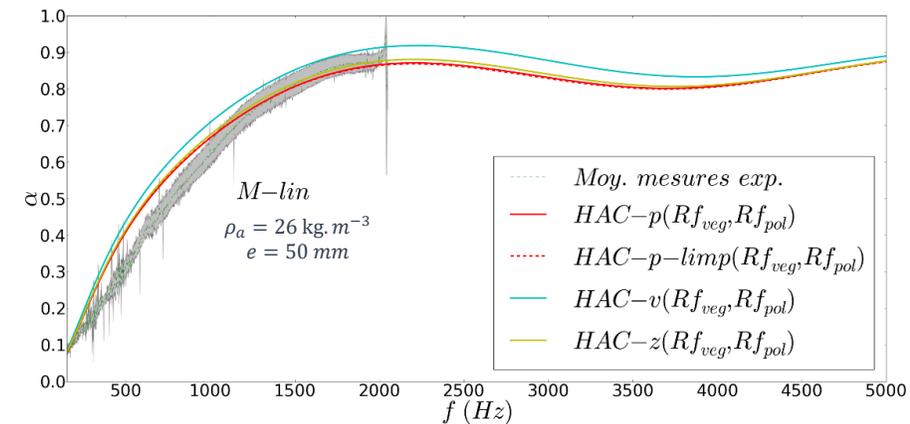
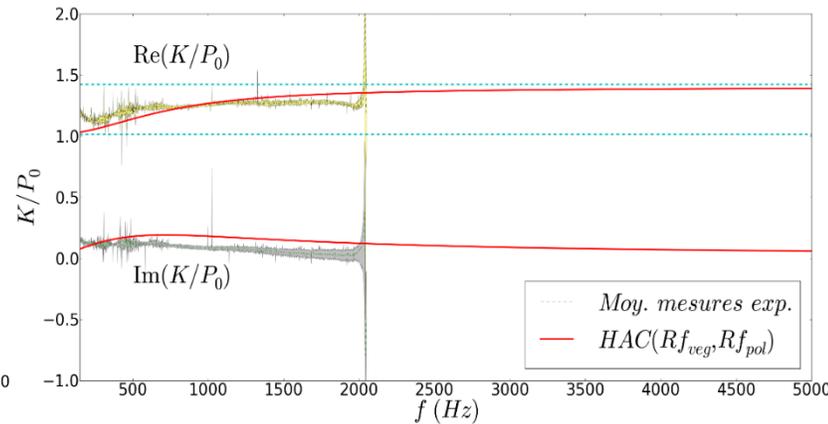
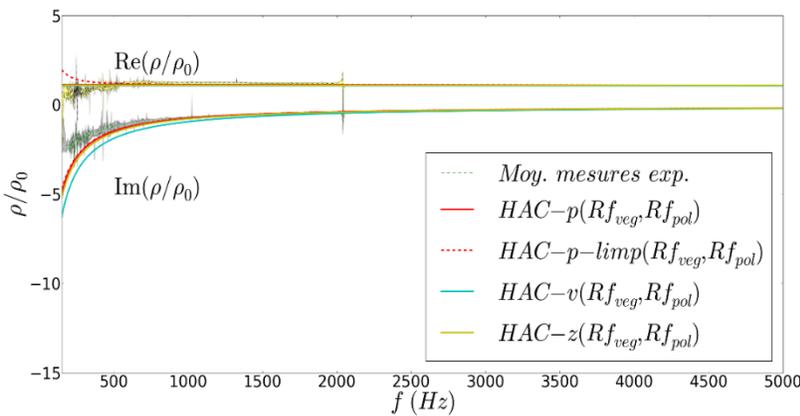
$$\lambda_{eq} = \lambda_{cond} + \lambda_{rayt}$$

# Détermination des performances acoustiques

## Laine de lin (M)

●  $Rf_{veg} = 11.83 \mu m$  /  $Rf_{pol} = 11.54 \mu m$  /  $\tau = 0.17$

●  $\phi = 98.3\%$

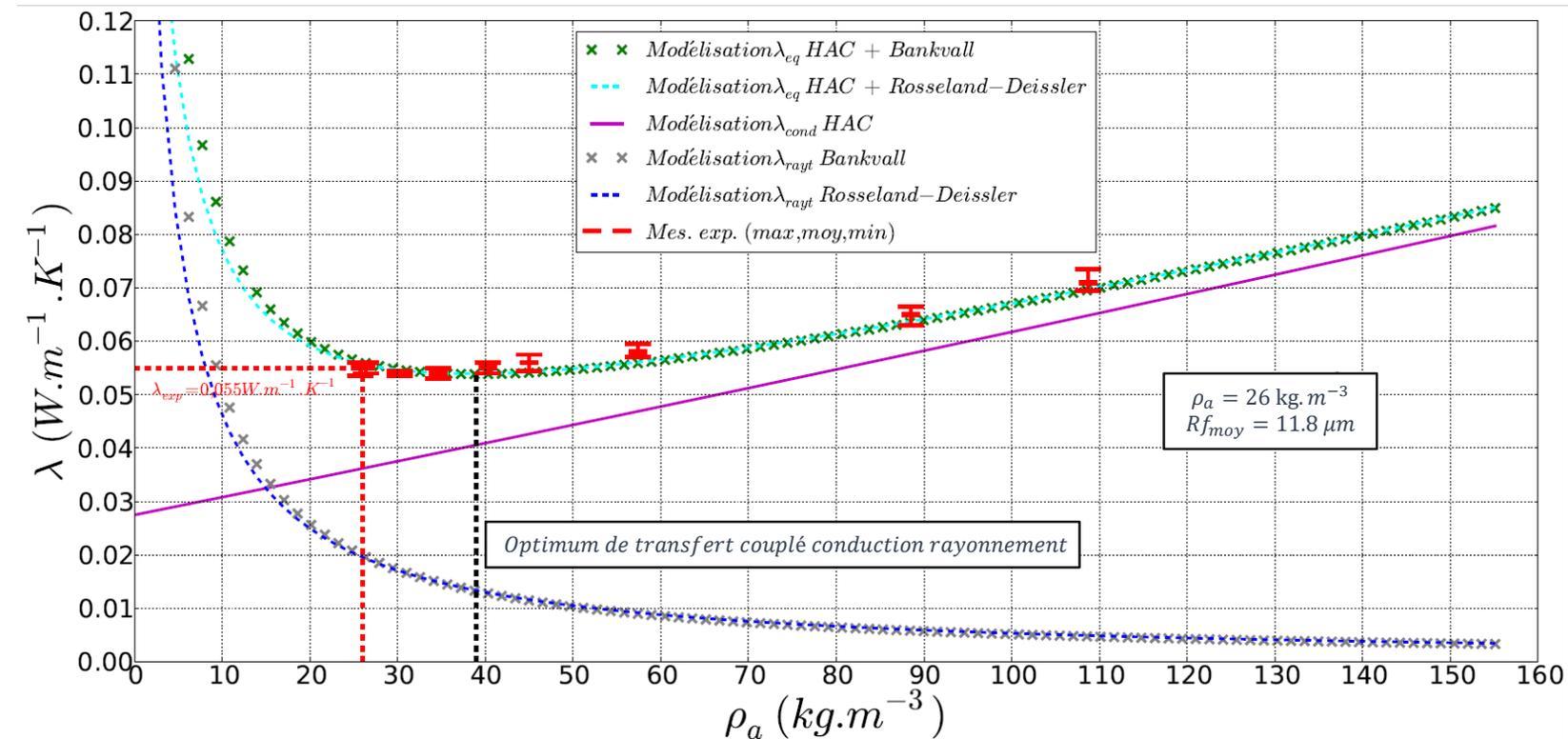


- Approches HAC couplées avec le modèle à 2 tailles de fibres
- Hypothèse squelette rigide à comportement limp

# Détermination des performances thermiques

## Laine de lin (M)

●  $\lambda_s = 1.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



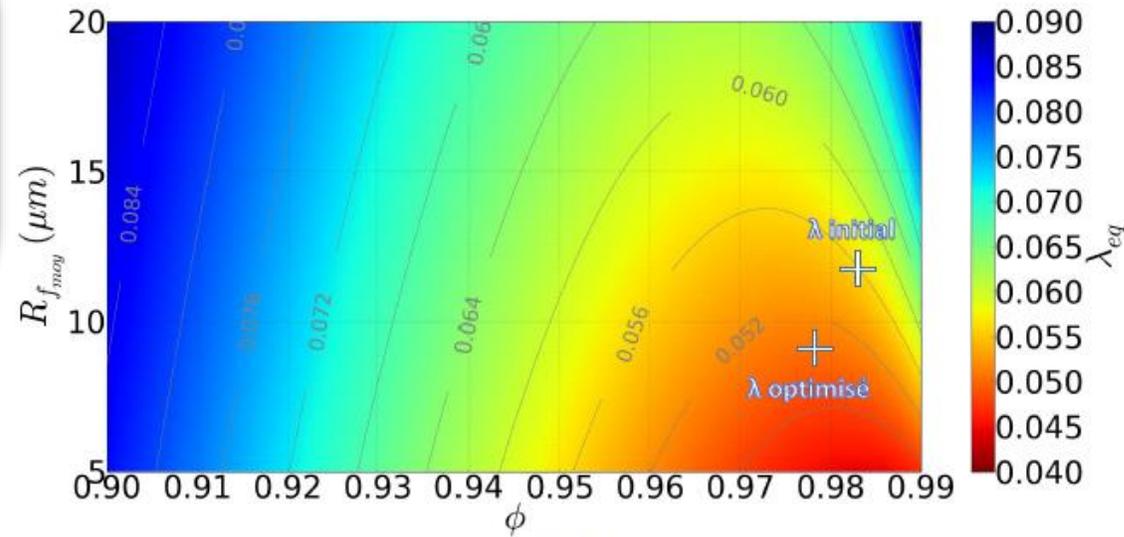
- Approches HAC couplées avec les modèles de rayonnement
- Identification de l'optimum de transfert couplé conduction-rayonnement

# Exemple d'optimisation

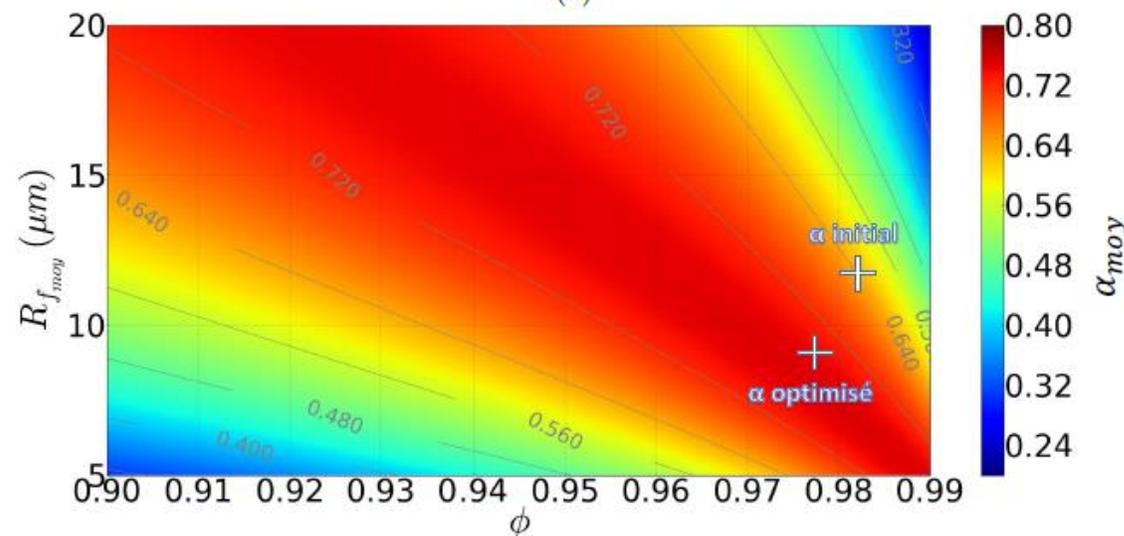
Analyse paramétrique:

$$\phi \in [0.90 - 0.99\%]$$

$$Rf_{moy} \in [5 - 20\mu m]$$



(a)



## Résultats

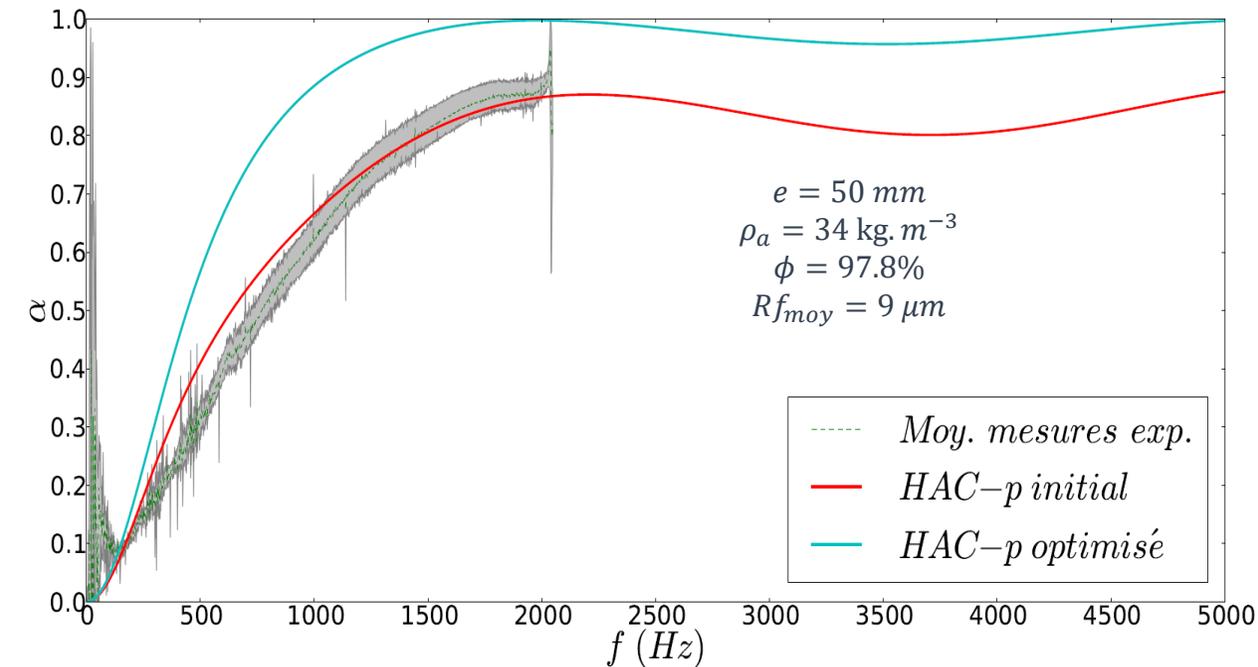
- Optimisation conjointe possible des performances acoustiques et thermiques pour :

$$Rf_{moy} = 9 \mu m$$

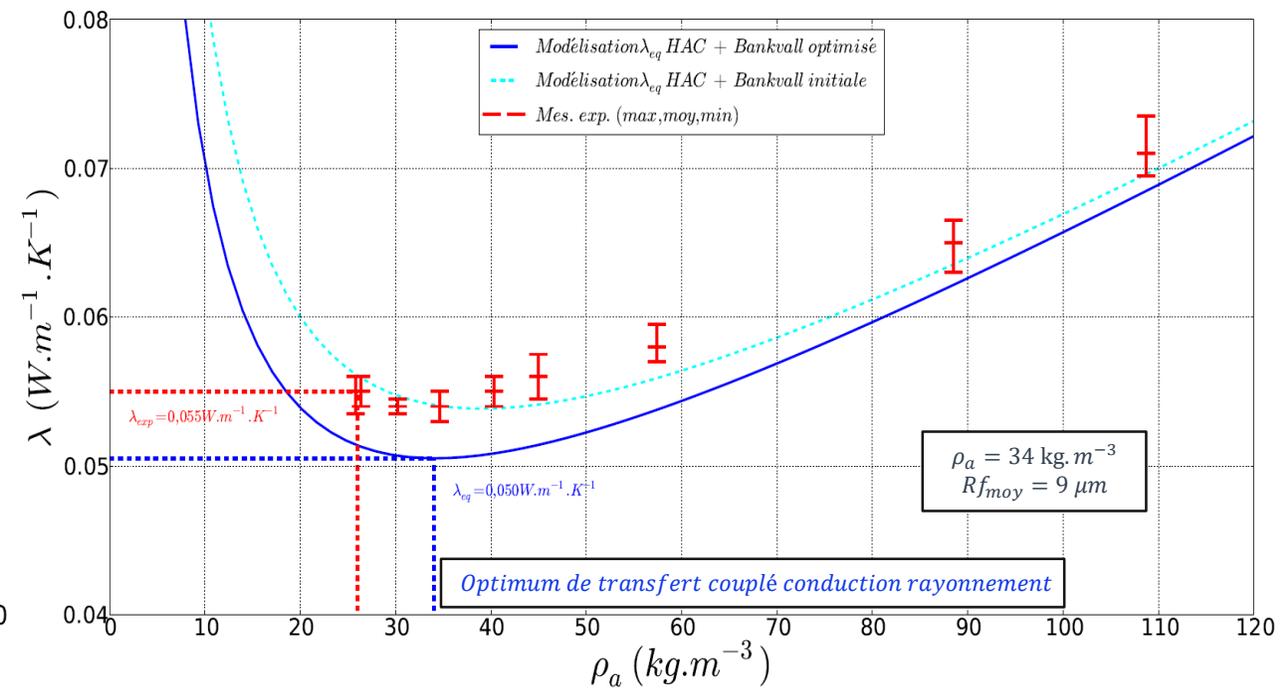
$$\phi = 0.978$$

$$\rho_a = 34 \text{ kg.m}^{-3}$$

# Performances acoustiques et thermiques optimisées



- Gain du niveau d'absorption pour toutes les gammes de fréquences



- Gain de 10% de la conductivité thermique pour l'optimum de transfert couplé conduction-rayonnement

# Conclusions

## Caractérisation expérimentale

- Spécificité des distributions
- Liens  $Rf$ ,  $\phi$  et  $\sigma$
- Données paramètres micro / méso / macro ( $\lambda$  et  $\alpha$ )

## Modélisation HAC cylindrique

- Thermique : statique
- Acoustique : dynamique
- Couplage modèle composite : 2 tailles de fibres

## Procédure d'approche conjointe

- 2 paramètres:  $\phi$  et  $Rf_{\text{moy}}$
- Optimisation possible des performances

# Perspectives

## Caractérisation expérimentale

- Capitalisation des données
- Orientation des fibres
- Diffusivité

## Modélisation HAC cylindrique

- Distributions log-normales
- Evaluation influence autres harmoniques
- HAC cylindrique pour rayonnement thermique
- Limites analytiques basses et hautes fréquences de  $\rho$  et  $K$

## Procédure d'approche conjointe

- Validation pour autres matériaux fibreux
- Adaptation aux matériaux granulaires
- Potentiel élevé d'évolution

# Soutenance de thèse

Approche Conjointe Acoustique et Thermique pour  
l'Optimisation des Laines Végétales du Bâtiment

Clément PIÉGAY

**Merci de votre attention**