

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 CO₂

- **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]

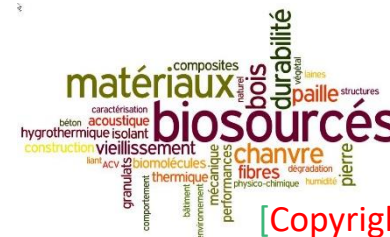
- Réduire drastiquement la demande en énergie du bâtiment



Jean Jouzel, ancien vice-président du GIEC

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

[Fibra Innovation 2018]



[Copyright Ifsttar CPDM]

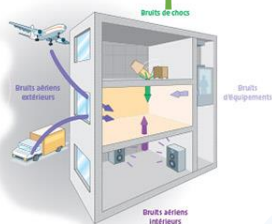
« Les matériaux biosourcés sont, par définition, des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale »

[Définition du MTES]

Les réponses réglementaires



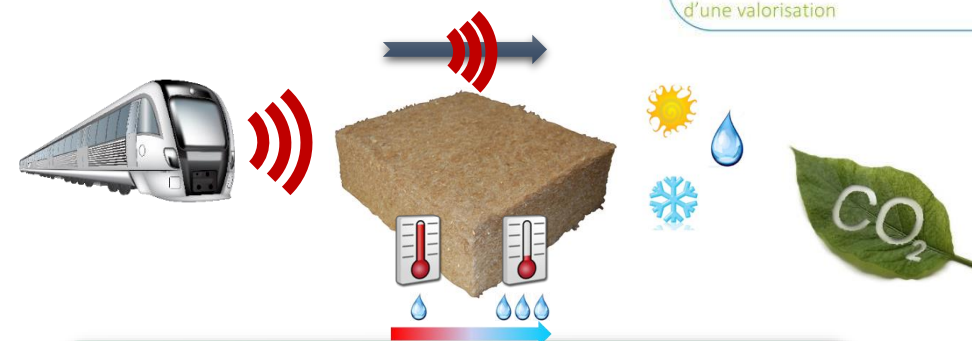
Réglementation Acoustique




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

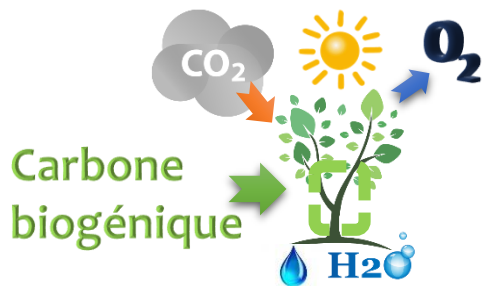


Titre II - Article 14
 VI.- L'utilisation des matériaux biosourcés concourt significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles...



- 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 CO₂ captées

1 ha de forêt = 1 ha de chanvre/lin

90 ans



1 an

[Eriksson *et al.* 2018]

Cultures performantes



Lin

Chanvre



Récolte des tiges



Fibres



végétales



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

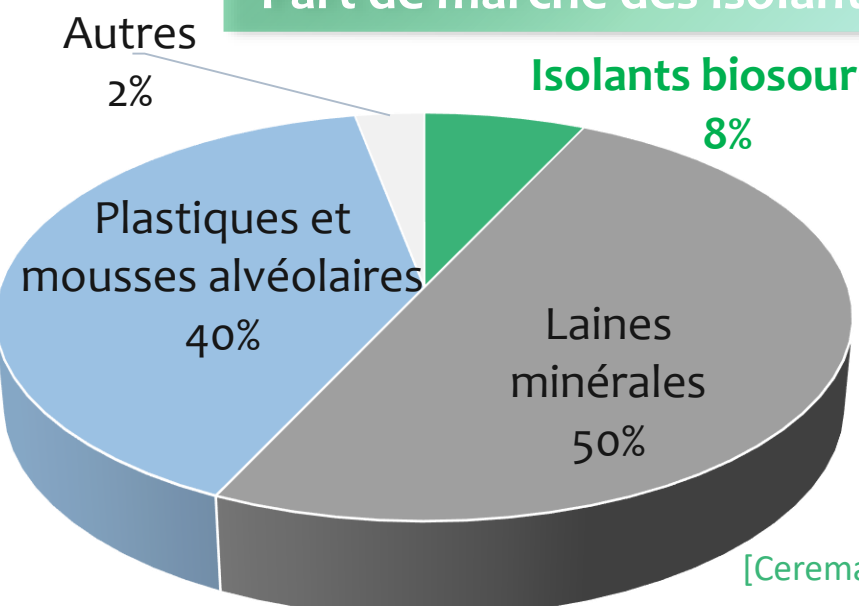
Structure interne constituée d'une partie solide discontinue composée de fibres et possédant un réseau de pores ouverts sur l'extérieur



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



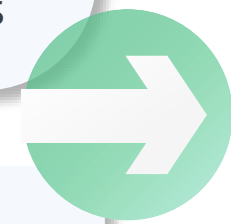
[Cerema 2017]



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



- Prix
- Méconnaissances / craintes

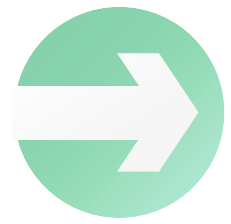
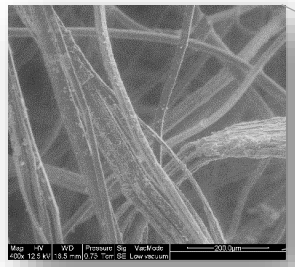


Préconisations [CESE 2015]

Investigations scientifiques et techniques

Identification des verrous scientifiques

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

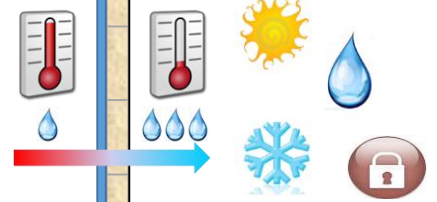


Spécificités des fibres végétales

Approche de modélisation conjointe acoustique \cap thermique



Influence de la compression



Influence de l'humidité

Isolation et/ou correction acoustique et isolation thermique

Corrélation phénomènes acoustique et thermique

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



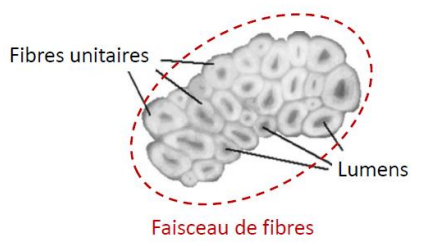
Echelle des Fibres

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

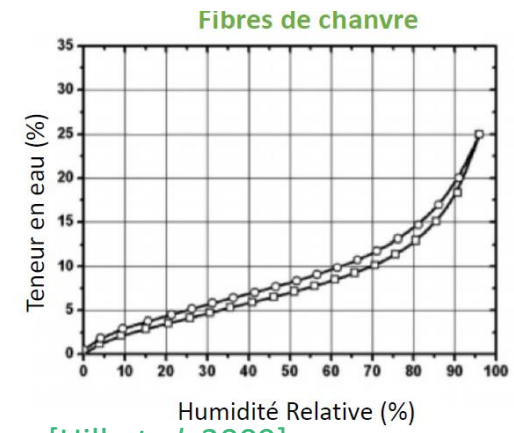
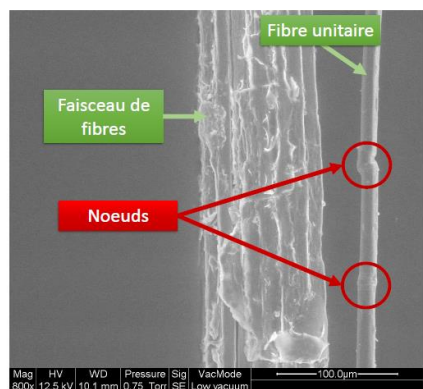


Echelle des Laines

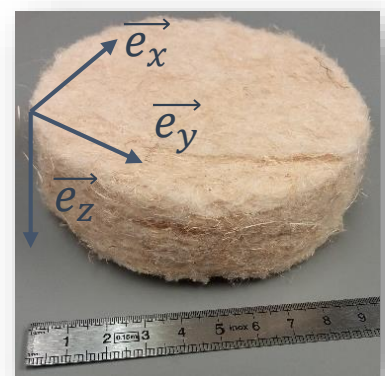
- Répartition / Orientation [Luu 2016]
- Distribution tailles de fibres [Luu *et al.* 2017a]
- Caractère hygroscopique [Collet 2004] [Hill *et al.* 2009]
- Anisotropie [Lei *et al.* 2018]



[Charlet *et al.* 2010]



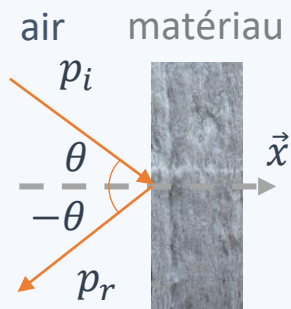
[Hill *et al.* 2009]



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 : α



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

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 : λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
- $\lambda_{eq} = \lambda_{cond} + \lambda_{conv} + \lambda_{rayt}$ [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

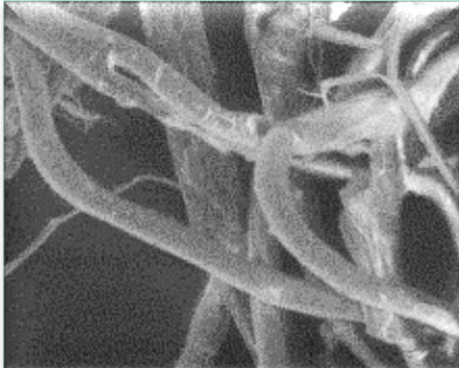
Techniques mathématiques s'appuyant sur la définition d'un milieu homogène équivalent au milieu hétérogène à l'échelle macroscopique. Ce milieu doit présenter le même comportement et répondre aux mêmes conditions aux limites.

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

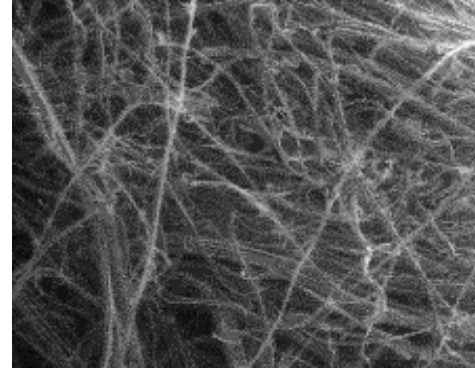
- Rayons de fibres

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

- Cond th fibres λ_s

- Densité fibres ρ_s

Echelle méso



Réseau de fibres

- Porosité ϕ

Influence eau / Influence masse volumique

Echelle macro



Panneaux de laines

- Absorption acoustique α
- Conductivité thermique λ

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 $\varnothing = 100 \pm 2 \text{ mm}$

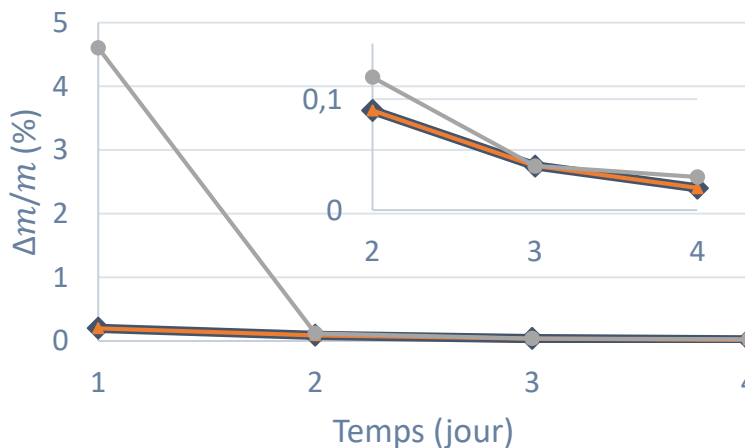


Présentation des conditions de mesures

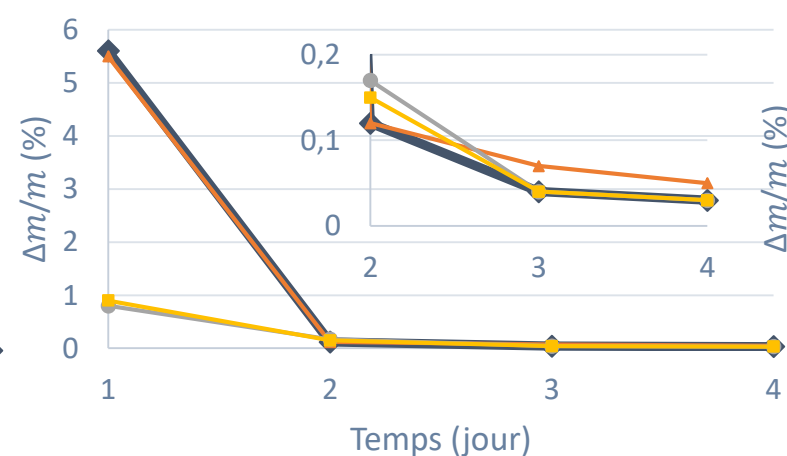
Etablissement de la masse de référence

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

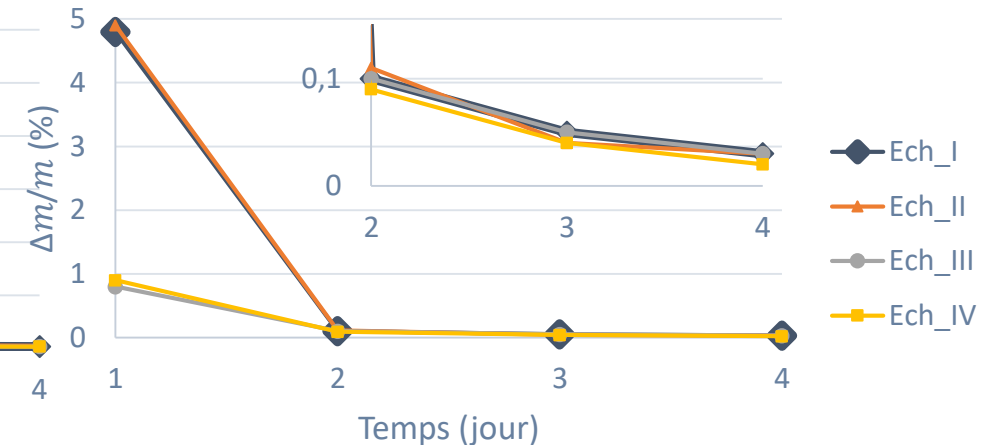
Laine de coco (I)



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 : $HR = 75\%$

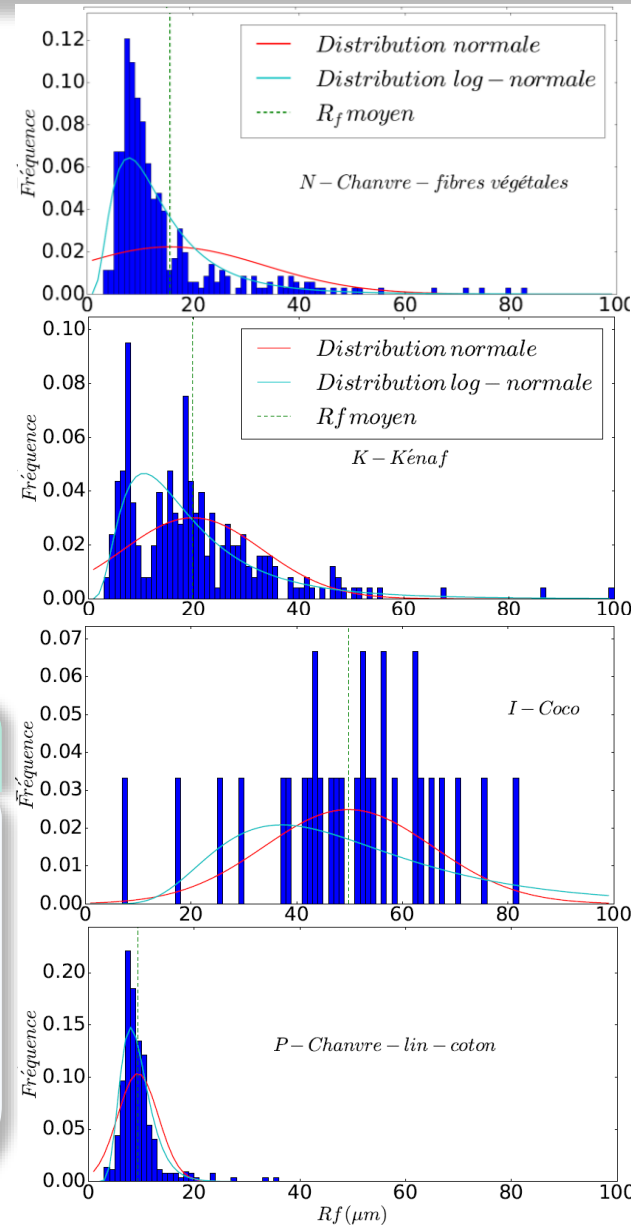
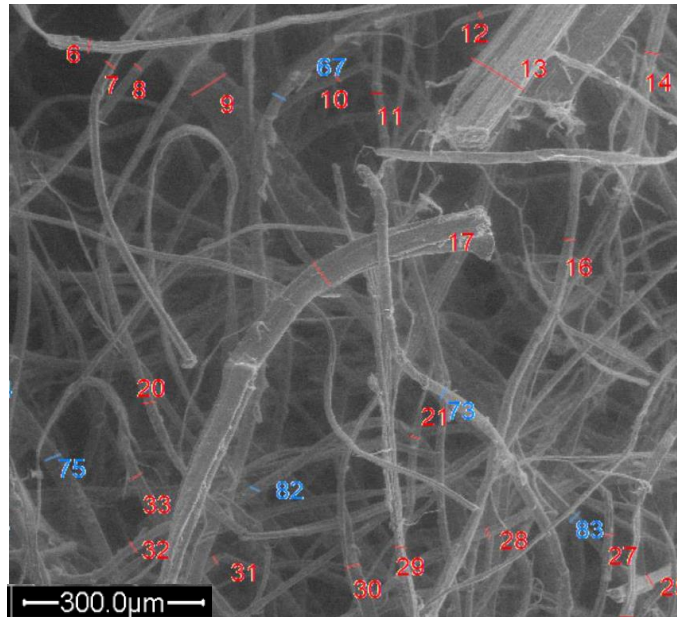
Caractérisations des paramètres micro et méso

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	α, ρ, K	X	X	X		X
	ρ_{imp}		X			
	E, ν		X			
Conductivimètre Fil Chaud	λ	X	X			
Conductivimètre Hot Disk	λ	X	X	X		X
Conductivimètre Boîte Chaude	λ		X			X
DVS	w_m		X			X
Résistivimètre	σ		X			X

Distributions de rayons de fibres



Type de laine	Réf.	$R_{f\text{ pol}}$ (μm)	$R_{f\text{ veg}}$ (μm)	$R_{f\text{ moy}}$ (μm)	$\sigma_{\text{ moy}}$ (μm)
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

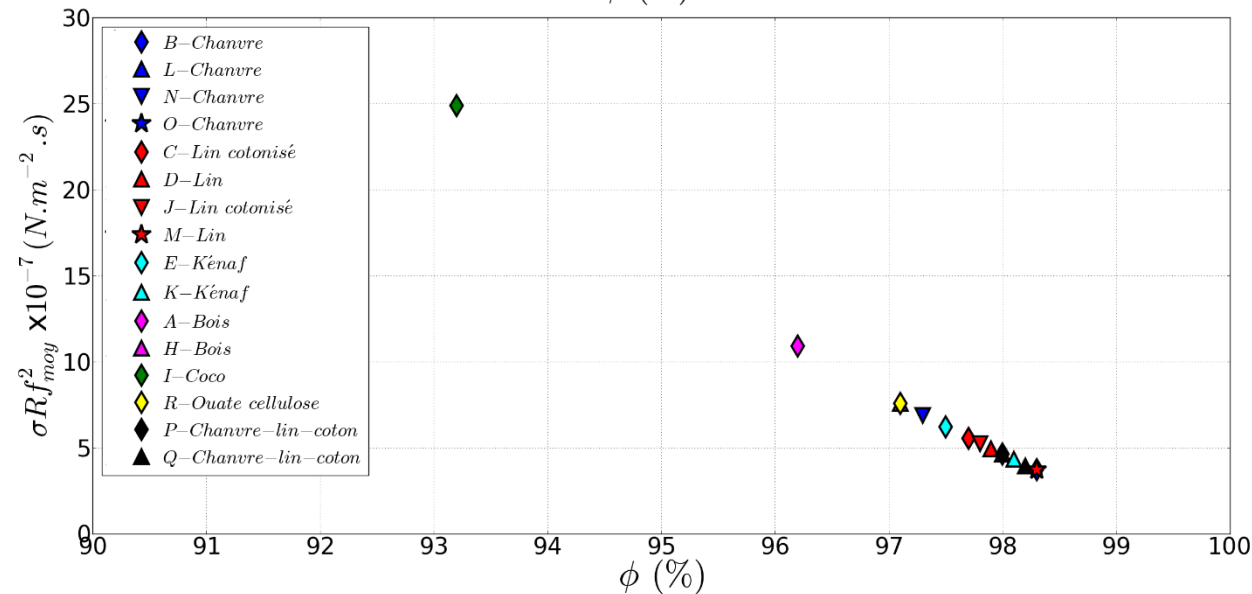
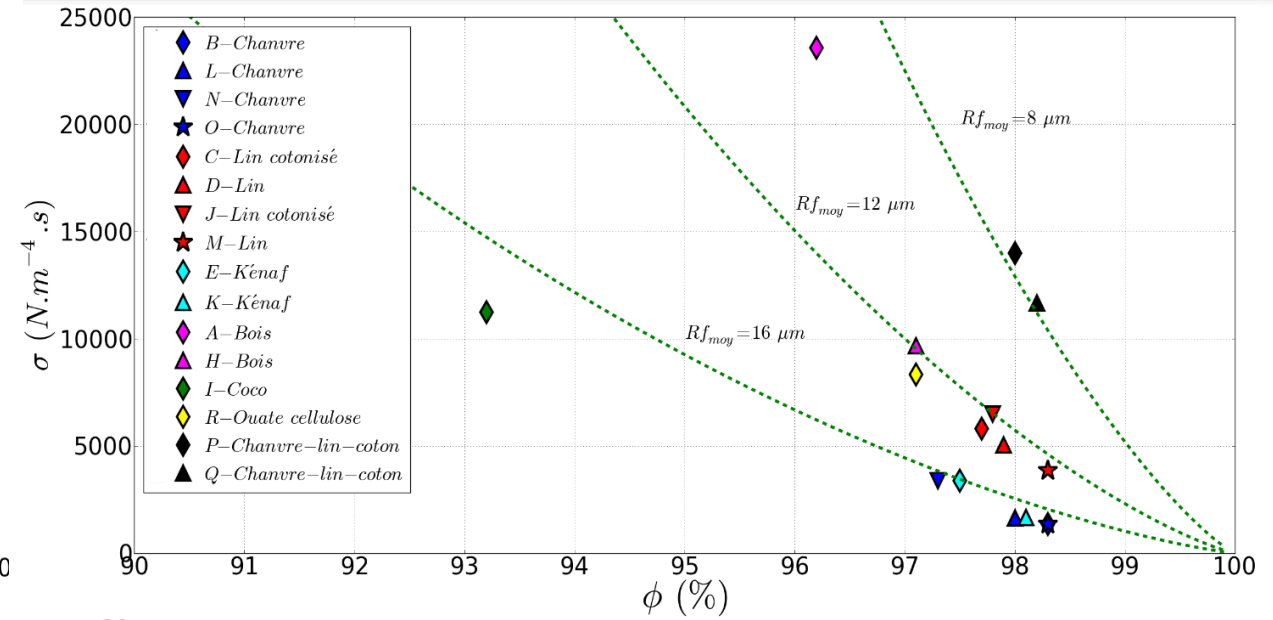
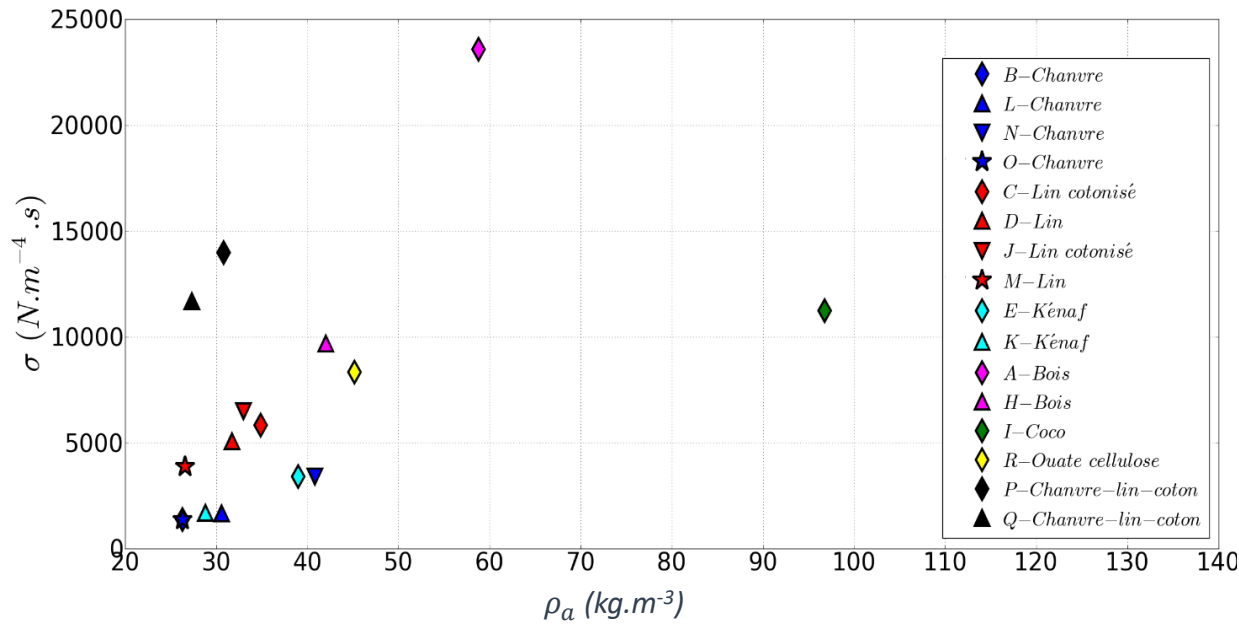
Hypothèses

- 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

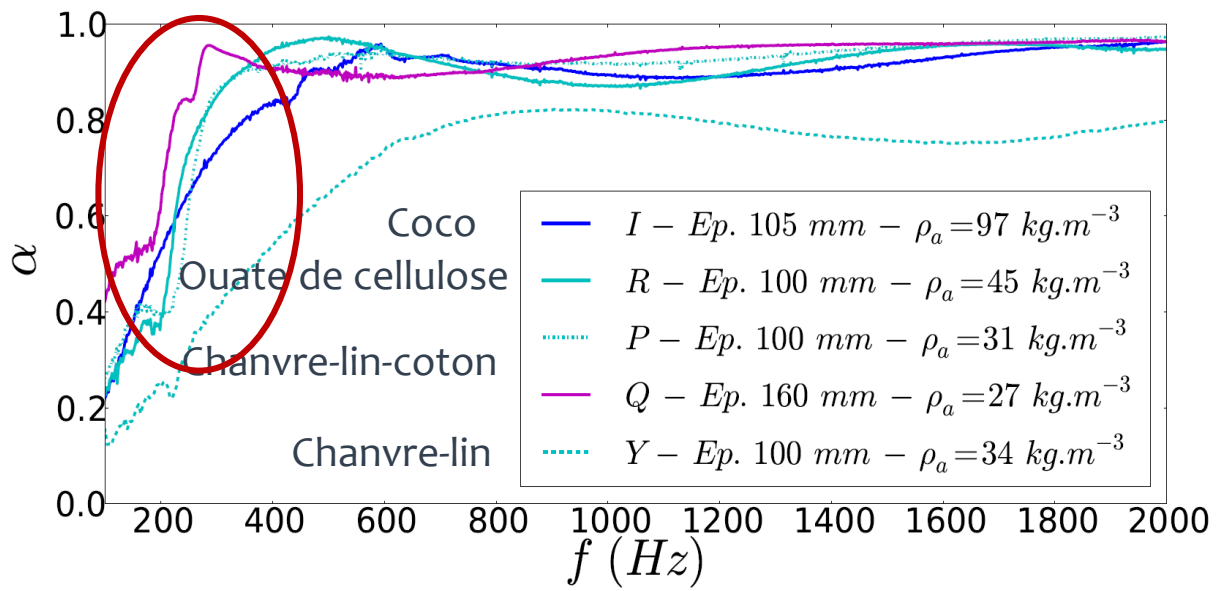
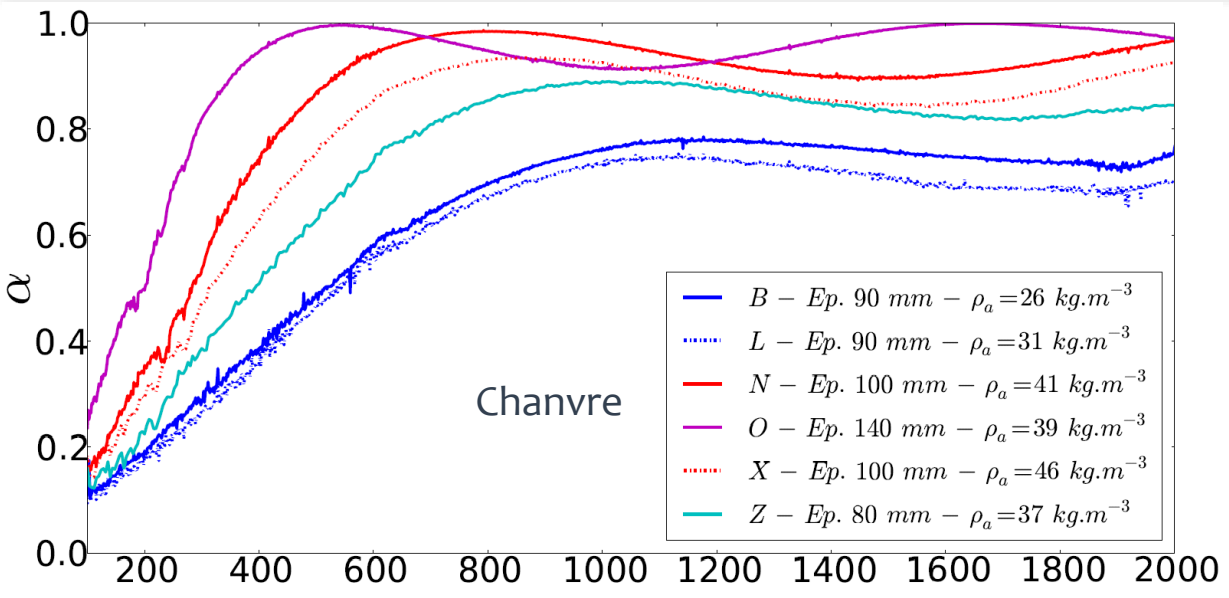
Résistivité et porosité ouverte des laines végétales



Résultats

- $1000 \text{ N.m}^{-4}.\text{s} < \sigma < 25\,000 \text{ N.m}^{-4}.\text{s}$
- Porosité élevée : $96.2\% < \phi < 98.3\%$ et 93.2% pour la laine de coco
- Lien entre σ , ϕ , ρ_a et R_f

Le large panel d'absorption acoustique



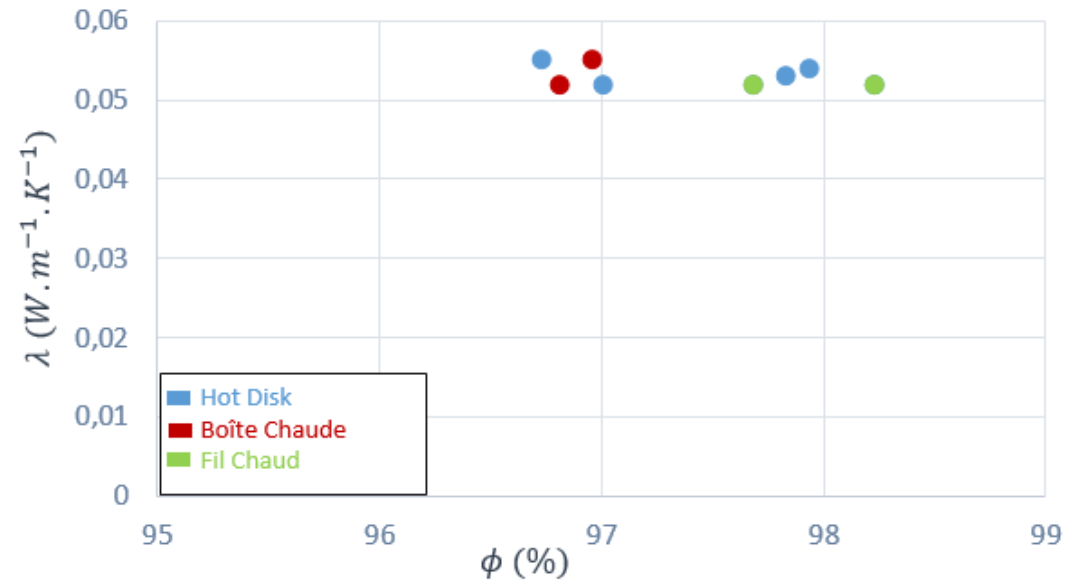
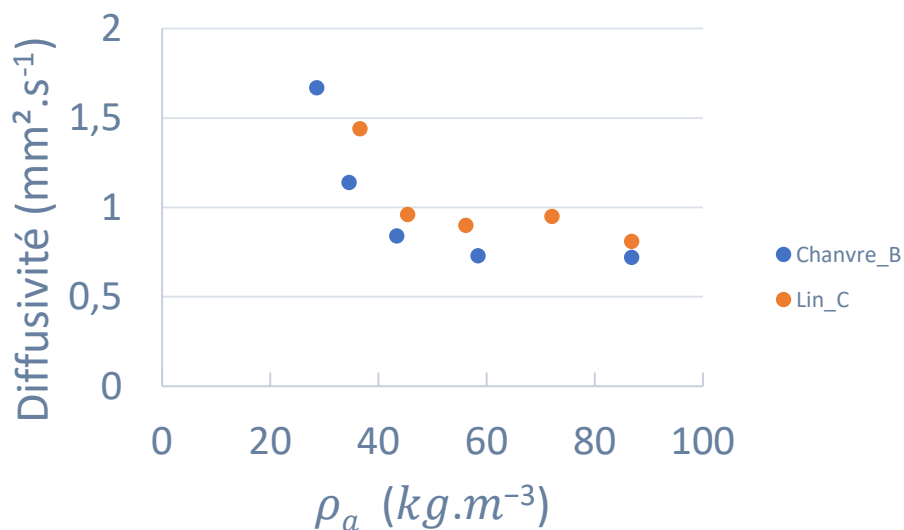
Résultats

- 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 :

$$HR = 40 \pm 2\% \text{ et } T = 25 \pm 0.8^\circ C$$



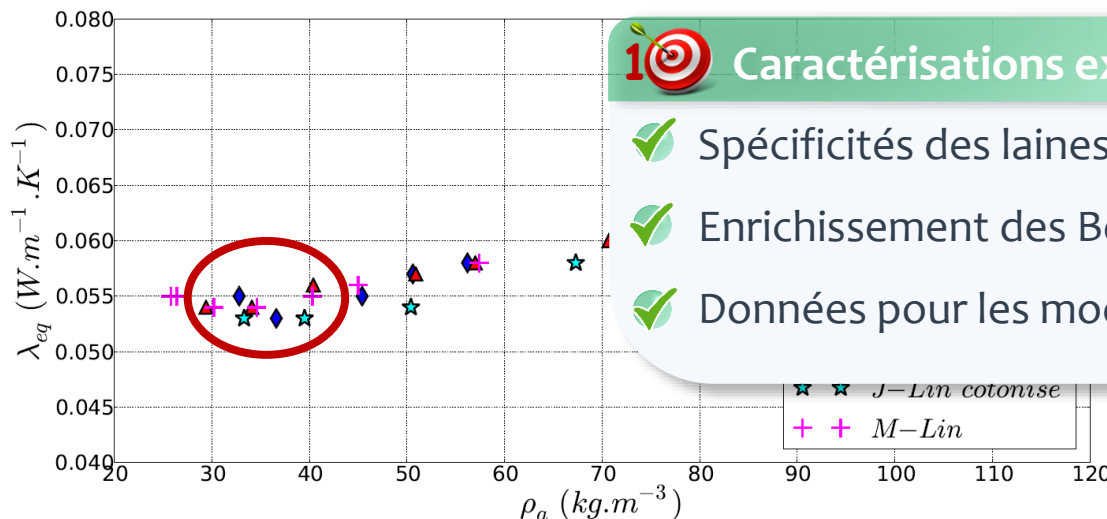
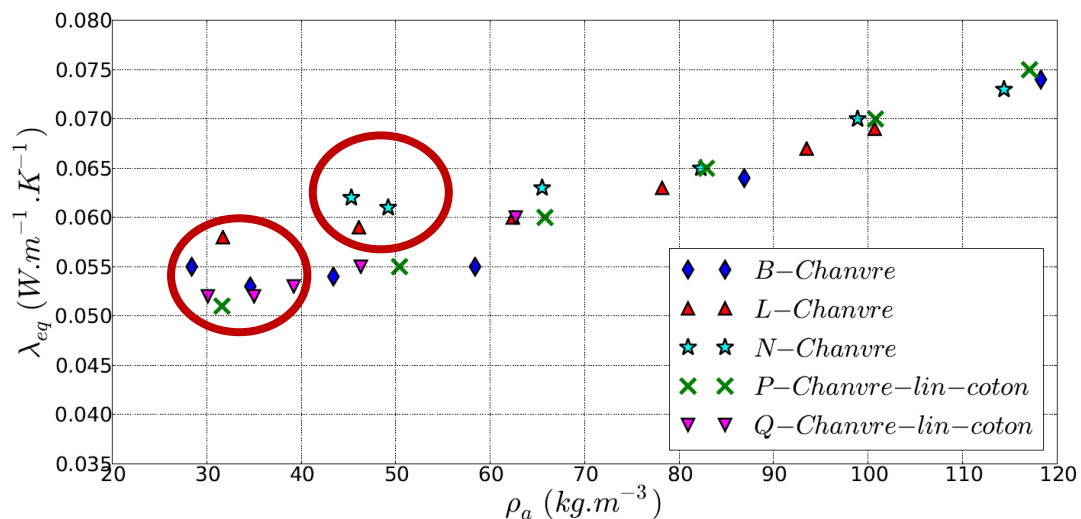
Résultats

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

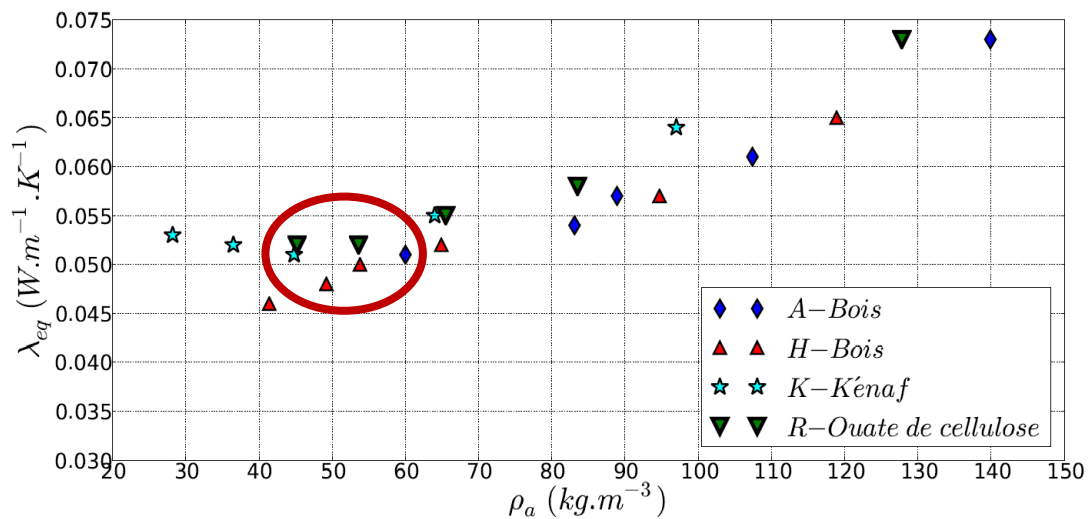
Transferts thermiques par conduction et rayonnement

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

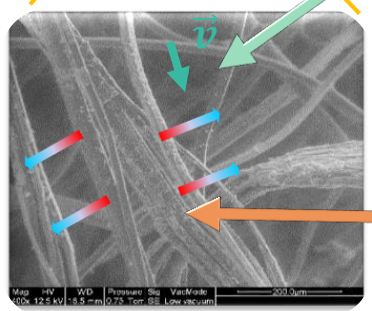
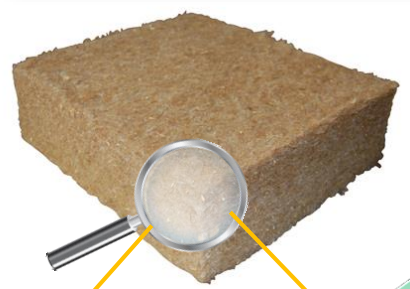


Résultats

- 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 μ

Phase solide : fibres
 Imperméables
 Squelette rigide

Dissipation acoustique
 Effets visqueux : frottement du fluide sur le squelette (ρ)
 Effets thermiques : échanges de chaleur avec le squelette (K)

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

Transferts de chaleur
 Conduction (λ_{cond})
 Rayonnement (λ_{rayt})
 Convection négligée

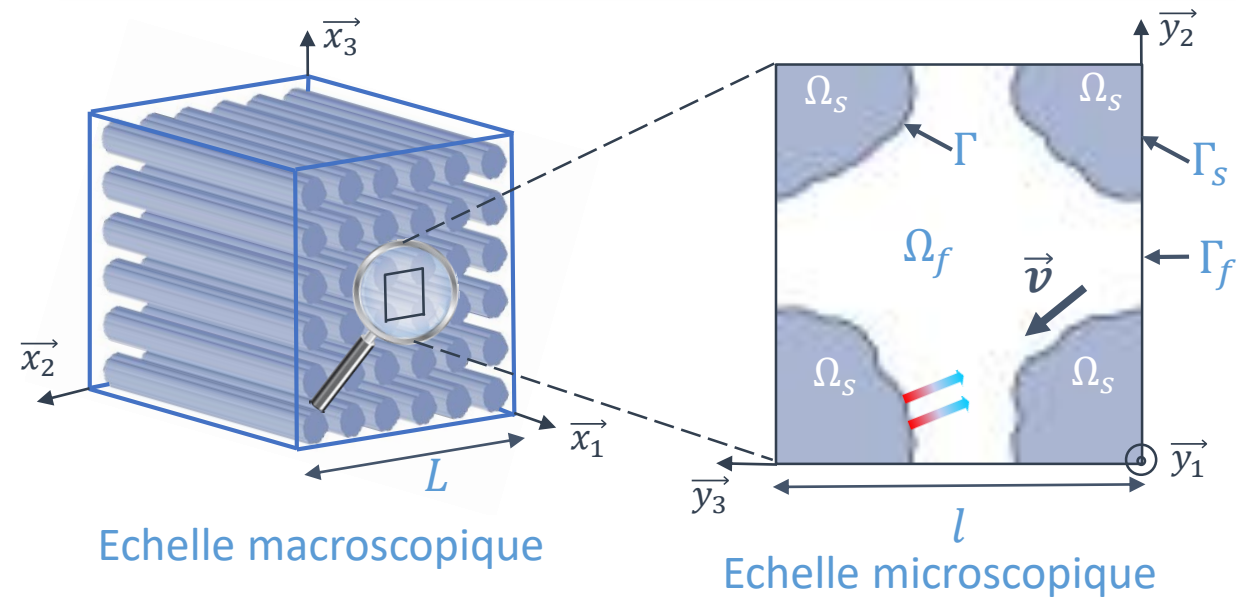
Conductivité thermique équivalente
 $\lambda_{eq} = \lambda_{cond} + \lambda_{rayt}$

Si dissipation mécanique \rightarrow 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 Ω + Théorème de flux divergence

[Auriault 1980]

[Olny 1999]

[Boutin & Geindreau 2008]

Effets visco-inertiels

- Loi de Darcy

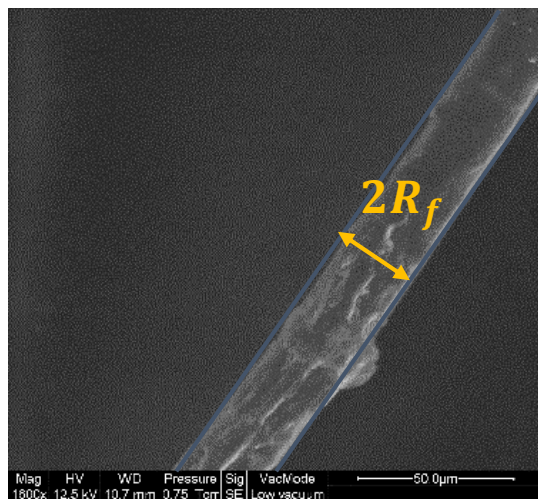
$$\langle \vec{v}^0 \rangle_{\Omega} = -\frac{[\Pi(\omega)]}{\mu} \nabla_x p^0(\vec{x}, \omega)$$

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

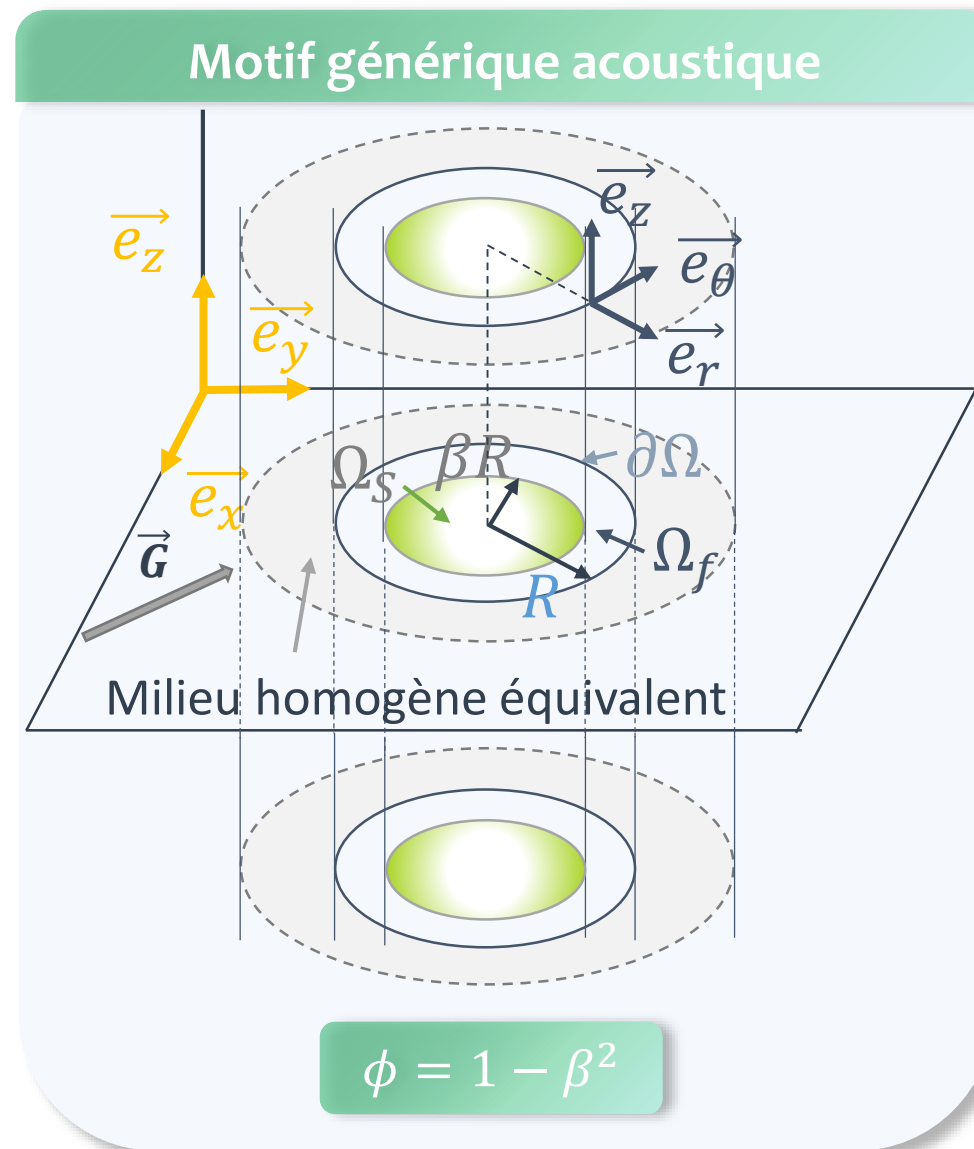


Hypothèses

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

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

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



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 β_{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 β' le coefficient de rayonnement

Couplage avec λ_{cond} obtenue par modélisation HAC

λ_{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]

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



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



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

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

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

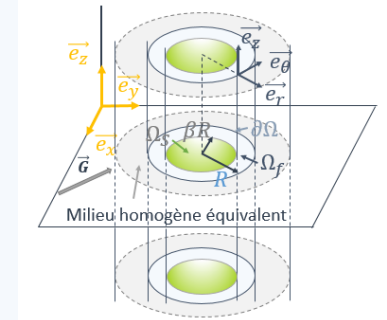
HAC dynamique pour l'absorption acoustique 2/3

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 Π

7 équations

HAC dynamique pour l'absorption acoustique 3/3

3^{ème} approche

- 3^{ème} 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} : (ρ_v, K)
- Approche en pression – notée \mathbf{p} : (ρ_p, K)

Approche alternative

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

Modèle à deux tailles de fibres

Modèle (Rf_{veg} , Rf_{pol})

● Modèle acoustique

+

● Modèle composite [Gourdon & Seppi 2010]

- (Π_{veg}, K_{veg})

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

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

- (Π_{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

ϕ, Rf_{moy}

Acoustique

Effets visco-inertiels

Effets thermiques



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



HAC dynamique



ρ_v ou ρ_p ou ρ_z squelette rigide/limp K

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

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



Epaisseur matériau (e)

α, TL, R_{th}

Thermique

Transferts par conduction

Transferts par rayonnement



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

Rosseland-Deissler

Bankvall



HAC

statique



β_{moy}



β'

λ_{cond}

$\lambda_{rayt-RD}$

$\lambda_{rayt-Bk}$



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

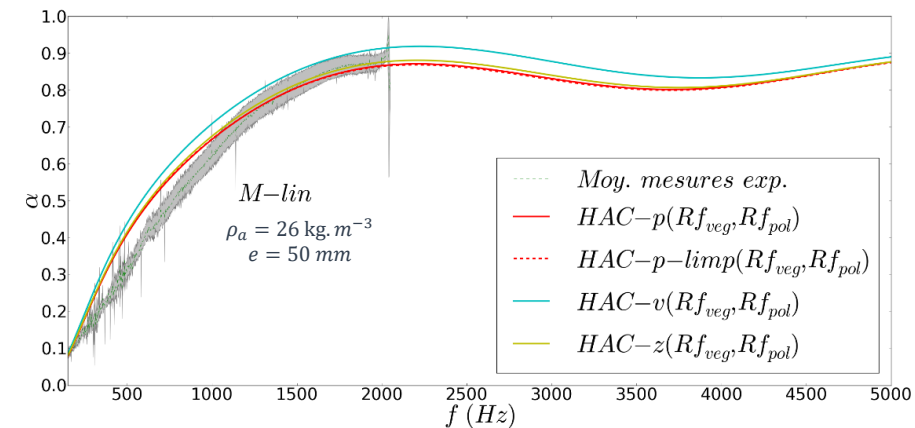
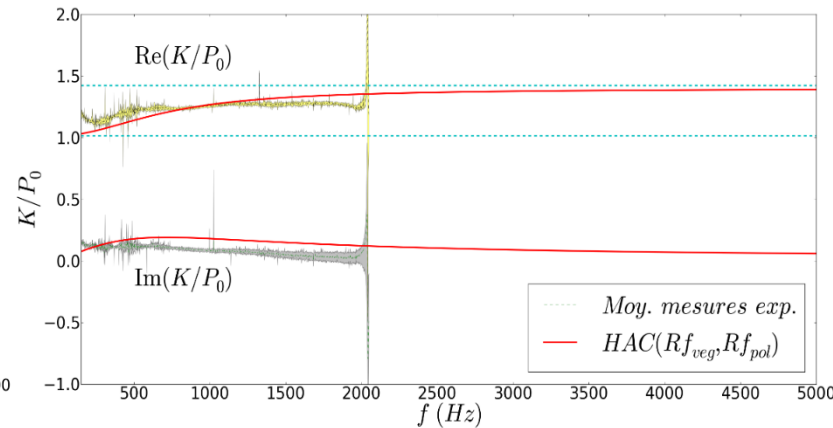
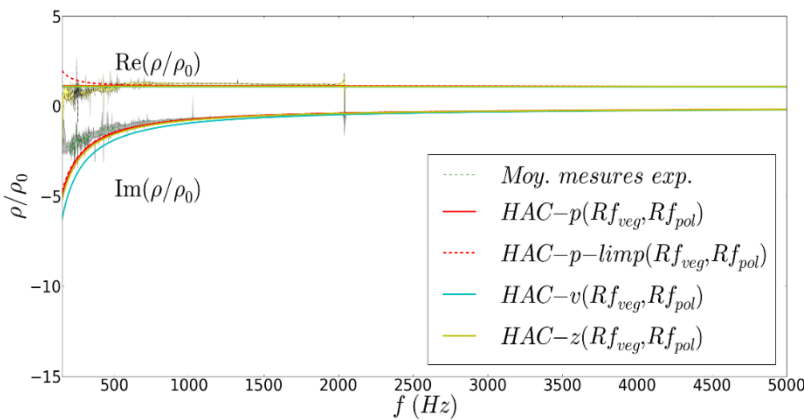


Détermination des performances acoustiques

Laine de lin (M)

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

● $\phi = 98.3\%$

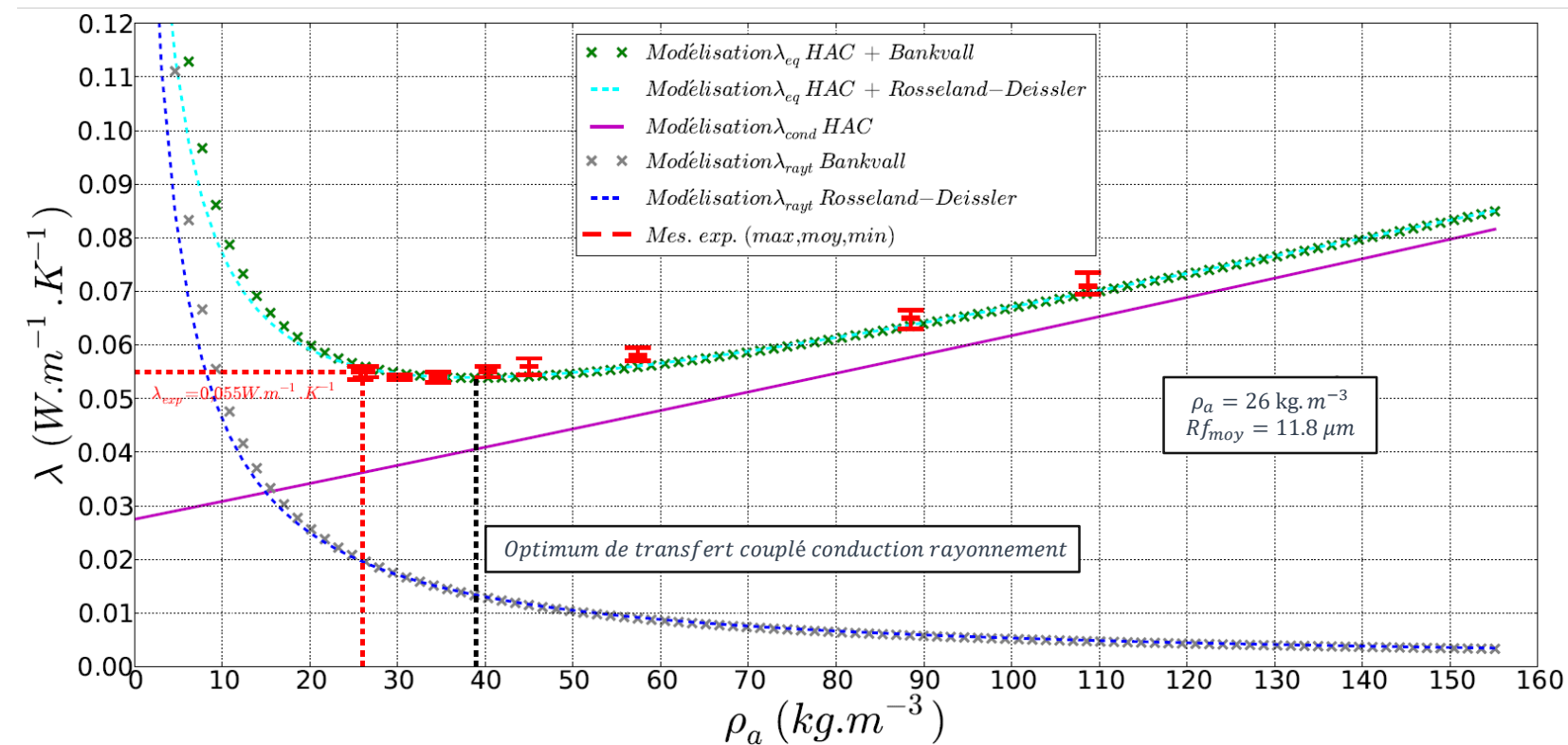


- Approches HAC couplées avec le modèle à 2 tailles de fibres
- Hypothèse squelette rigide à comportement limp

Détermination des performances thermiques

Laine de lin (M)

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



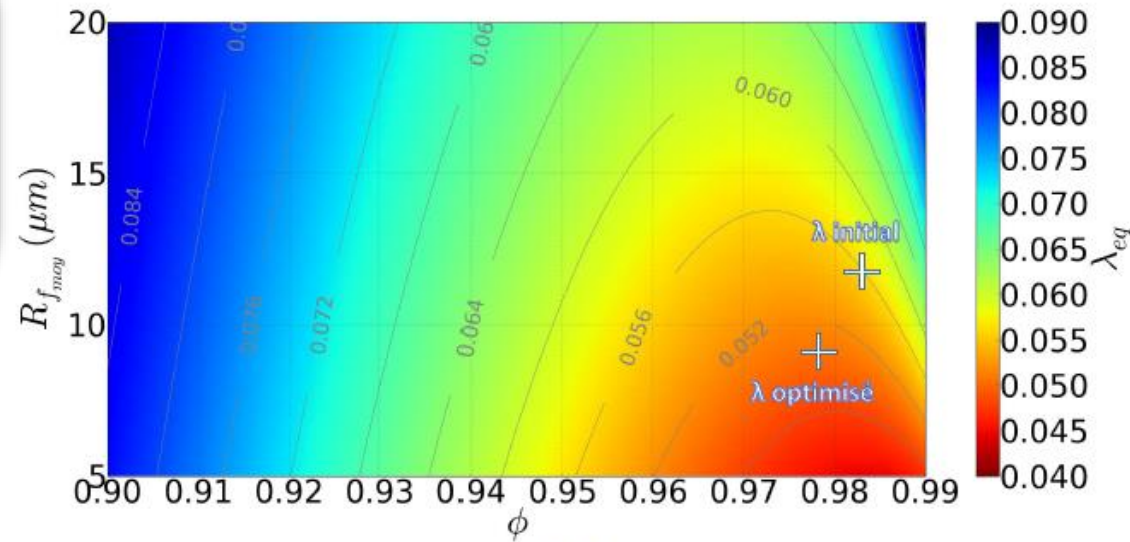
- Approches HAC couplées avec les modèles de rayonnement
- Identification de l'optimum de transfert couplé conduction-rayonnement

Exemple d'optimisation

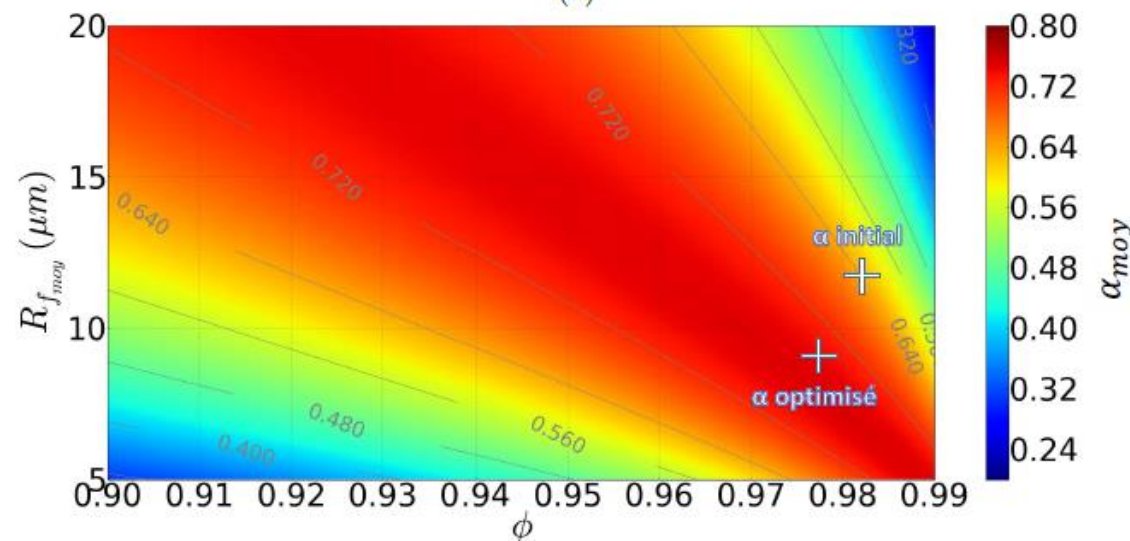
Analyse paramétrique:

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

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



(a)



Résultats

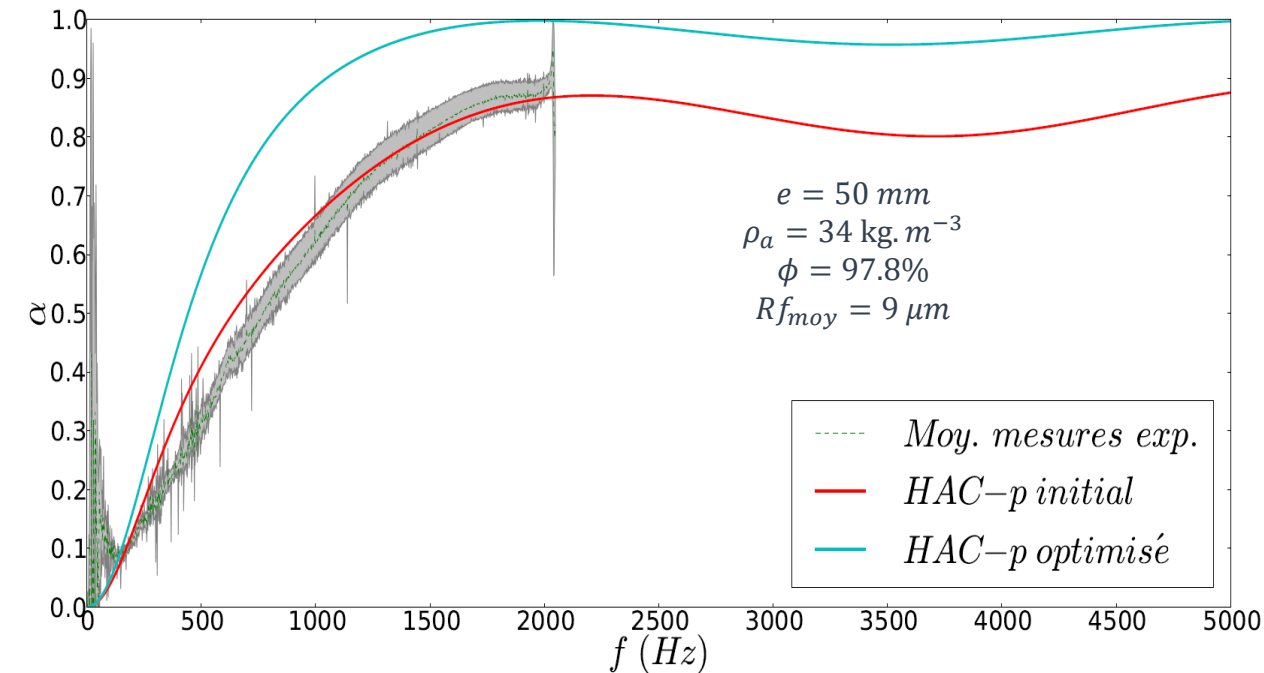
Optimisation conjointe possible des performances acoustiques et thermiques pour :

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

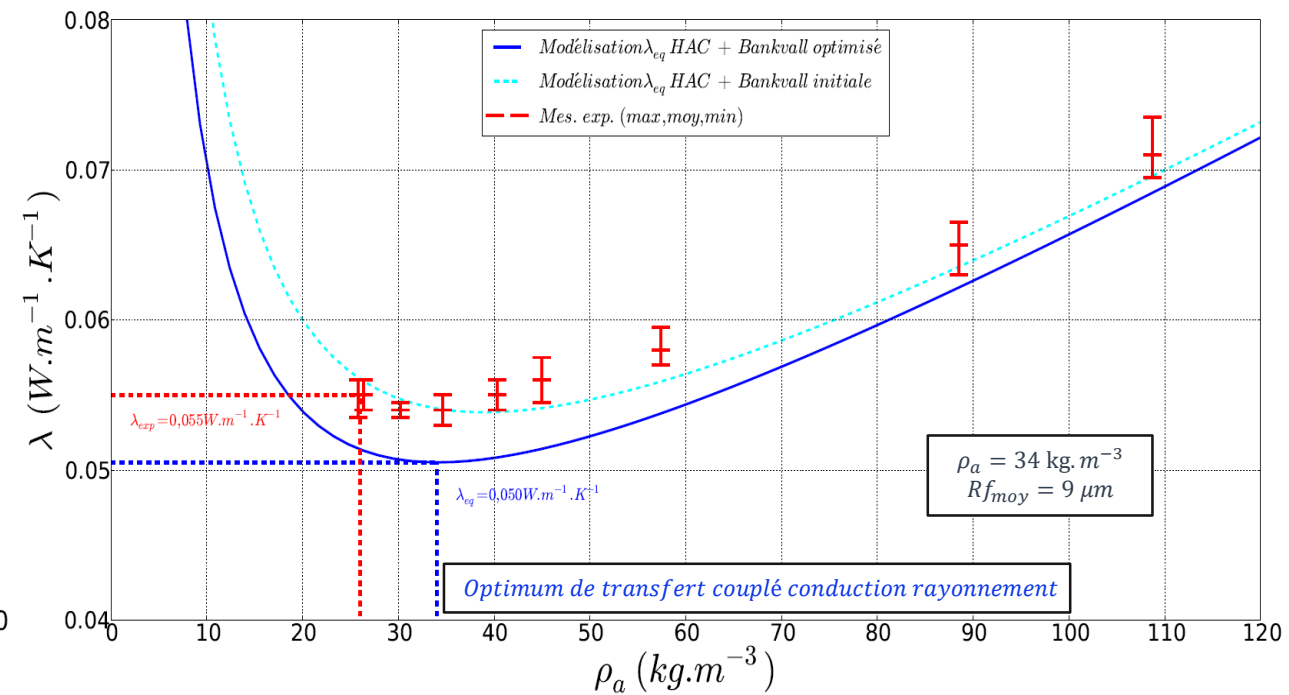
$$\phi = 0.978$$

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

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 , ϕ et σ
- Données paramètres micro / méso / macro (λ et α)

Modélisation HAC cylindrique

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

Procédure d'approche conjointe

- 2 paramètres: ϕ et Rf_{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 ρ 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