

Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique par homogénéisation auto- cohérente pour les isolants fibreux : Application aux laines végétales



Lille 11 & 12 mars 2020

Clément Piégay (UMRAE)
Philippe Glé (UMRAE)
Emmanuel Gourdon (LTDS-ENTPE)
Etienne Gourlay (Cerema BPE)

- I. Contexte et utilisation des laines végétales du bâtiment
- II. Etat de l'art
- III. Matériaux et principaux résultats des caractérisations expérimentales
- IV. Présentation de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente
- V. Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique
- VI. Conclusions et perspectives

- I. Contexte et utilisation des laines végétales du bâtiment
- II. Etat de l'art
- III. Matériaux et principaux résultats des caractérisations expérimentales
- IV. Présentation de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente
- V. Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique
- VI. Conclusions et perspectives

De grands défis environnementaux et sanitaires



Parc bâti

- 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]

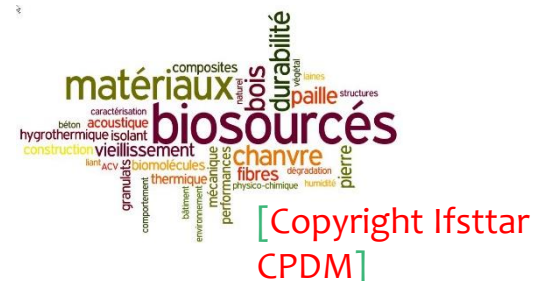
- Réduire drastiquement la demande en énergie du bâtiment



« 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

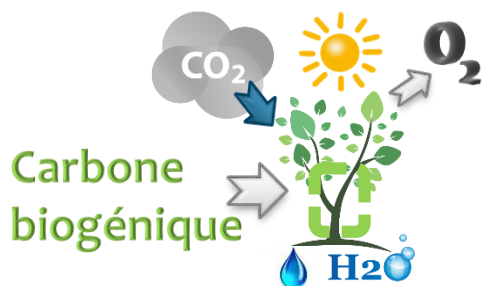


[Copyright Ifsttar CPDM]

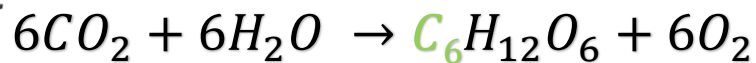
Les matériaux biosourcés sont, par définition, des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale

[Définition du MTES]

De la culture des plantes aux laines végétales



[Pittau et al. 2018]



15 t de CO₂ 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

- I. Contexte et utilisation des laines végétales du bâtiment
- II. Etat de l'art
- III. Matériaux et principaux résultats des caractérisations expérimentales
- IV. Présentation de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente
- V. Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique
- VI. Conclusions et perspectives

Des fibres aux laines végétales : une grande variabilité

Conditions de culture

[Pallesen 1996] [Tomsen et al. 2005]
[Placet et al. 2017]

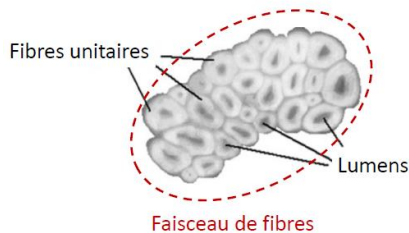
- Propriétés du sol
- Conditions météorologiques
- Période de semis et récolte
- Durée et type du rouissage
- Traitements mécaniques

Echelle des Fibres

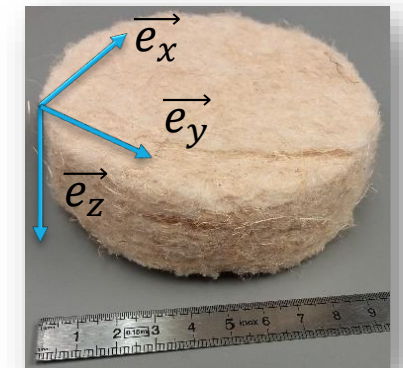
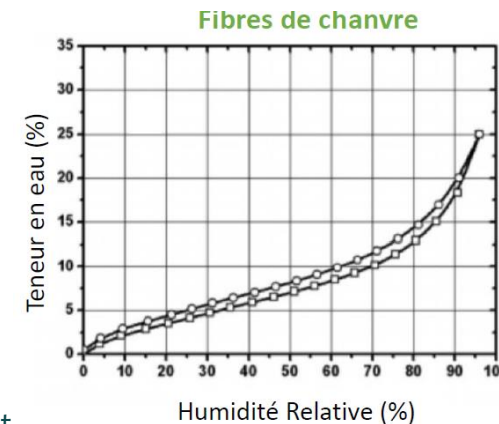
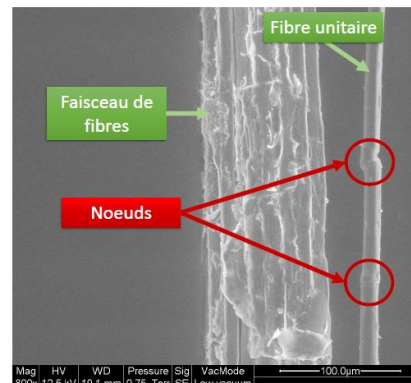
- Composition chimique
[Pereira et al. 2015] [Ramesh 2016]
- Morphologie / Dimensions
[Charlet et al. 2010] [Placet et al. 2010]

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]



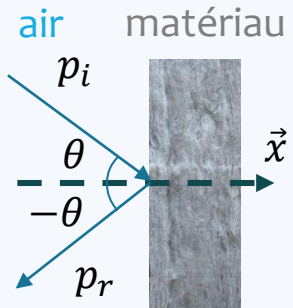
[Charlet et al. 2010]



Les propriétés acoustiques et thermiques des laines

Absorption acoustique

- 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]

HAC
[Hashin 1968]
Relations analytiques liant
les paramètres
microstructuraux aux
propriétés macroscopiques



Fibreux en statique
[Boutin 2000]



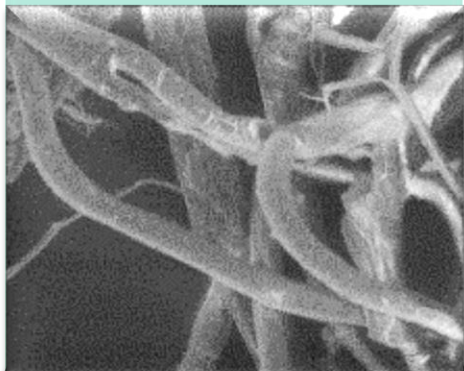
Granulaires
[Boutin 1996]
[Cerezo 2005]

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.

Démarche et objectifs

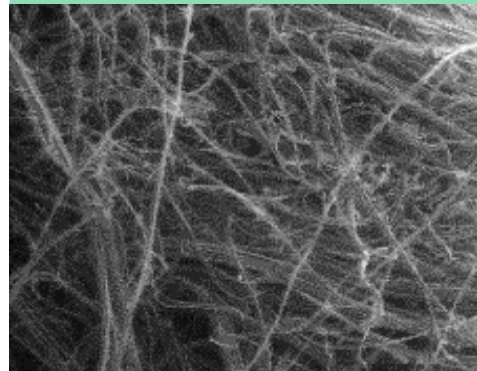
Echelle micro



Fibres

- Rayons de fibres
 R_{fveg}, R_{fpol}
- Cond th fibres λ_s
- Densité fibres ρ_s

Echelle méso



Réseau de fibres

- Porosité ϕ

Echelle macro



Panneaux de laines

- Absorption acoustique α
- Conductivité thermique λ

Influence eau / Influence masse volumique

Méthodes d'homogénéisation

Optimisation acoustique $\cap$ thermique

1 Caractérisations expérimentales

- Spécificités des laines végétales
- Enrichissement des BdD
- 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

Plan

- I. Contexte et utilisation des laines végétales du bâtiment
- II. Etat de l'art
- III. Matériaux et principaux résultats des caractérisations expérimentales
- IV. Présentation de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente
- V. Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique
- VI. Conclusions et perspectives

Présentation des matériaux d'étude

Panneaux de laines végétales semi-rigides

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

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

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



Echantillons

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



Types de fibres végétales

- Lin
- Chanvre
- Kénaf
- Bois
- Coton
- Coco

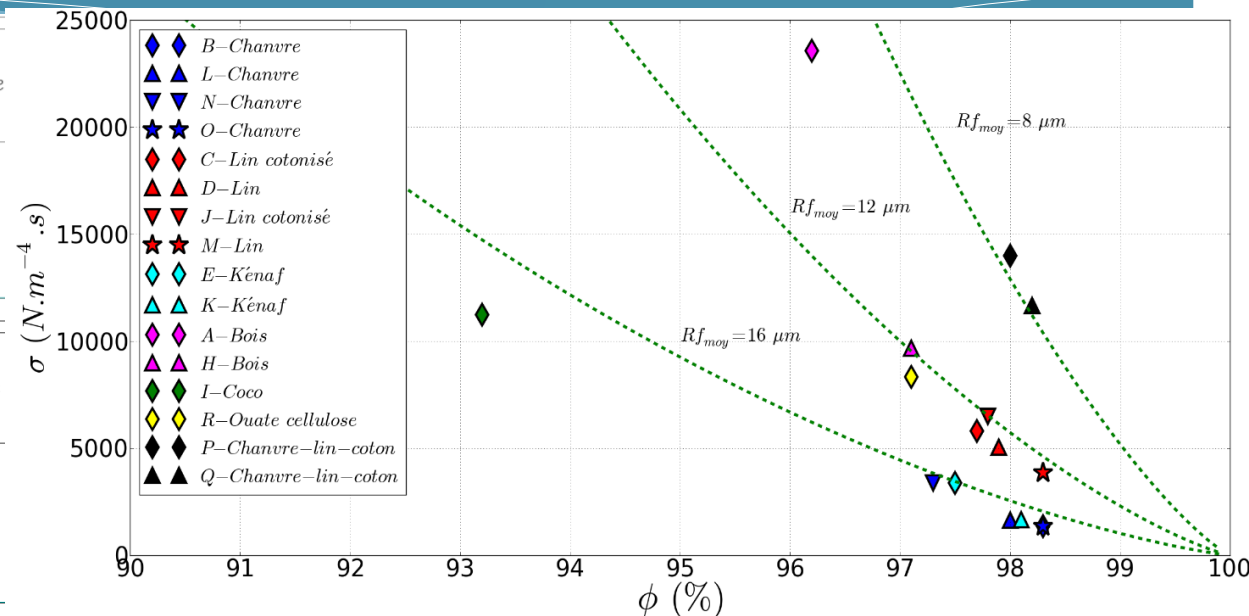
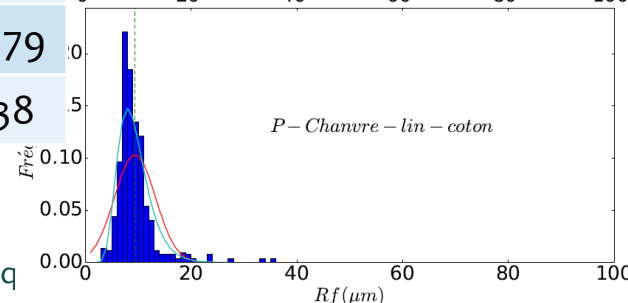
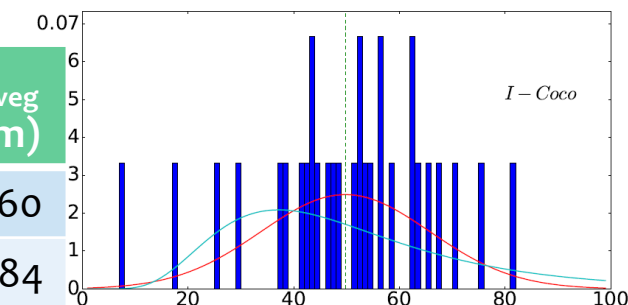
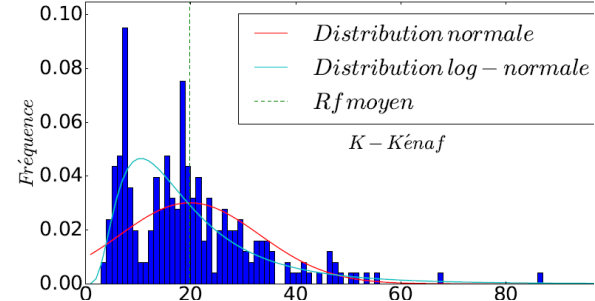
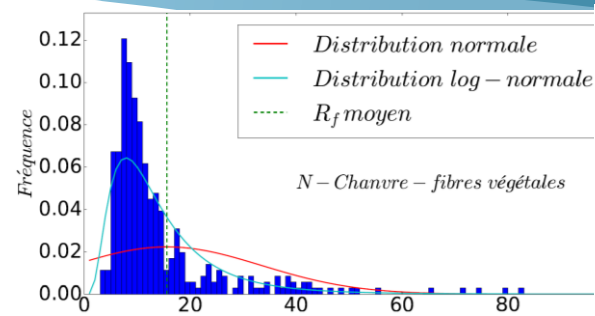
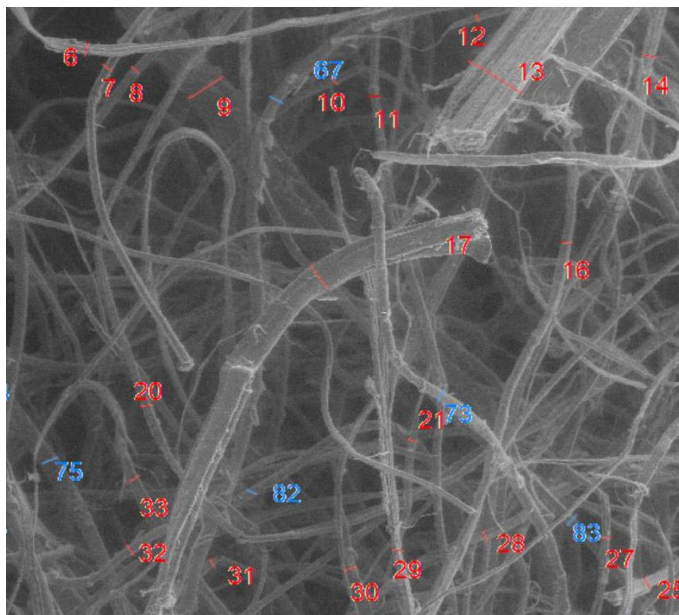


Fibres polymères

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



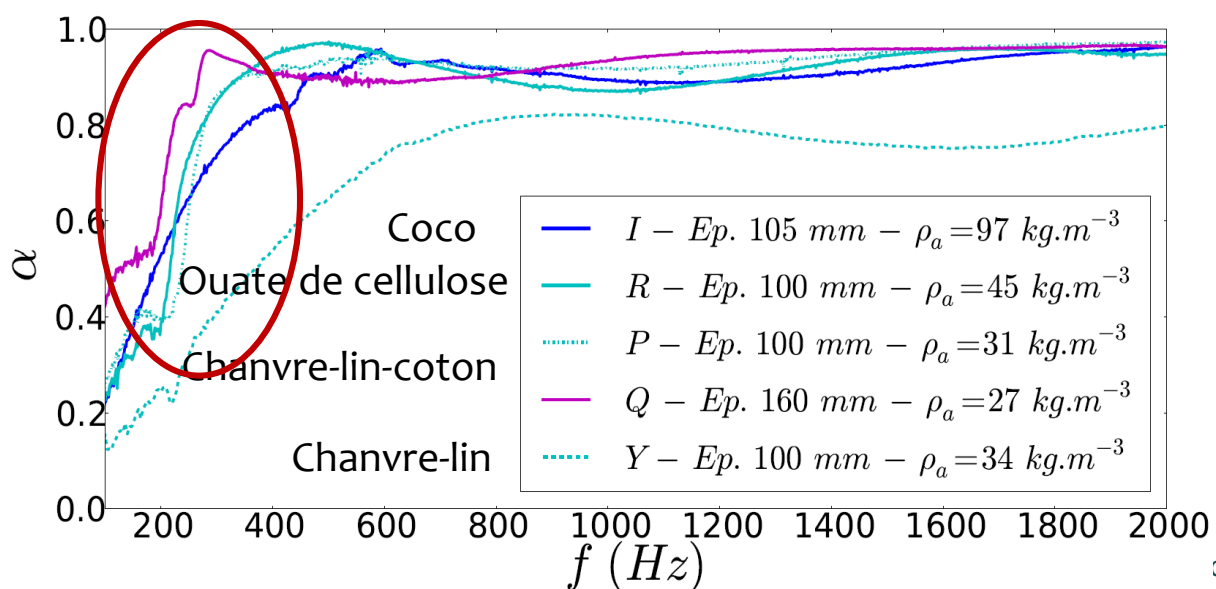
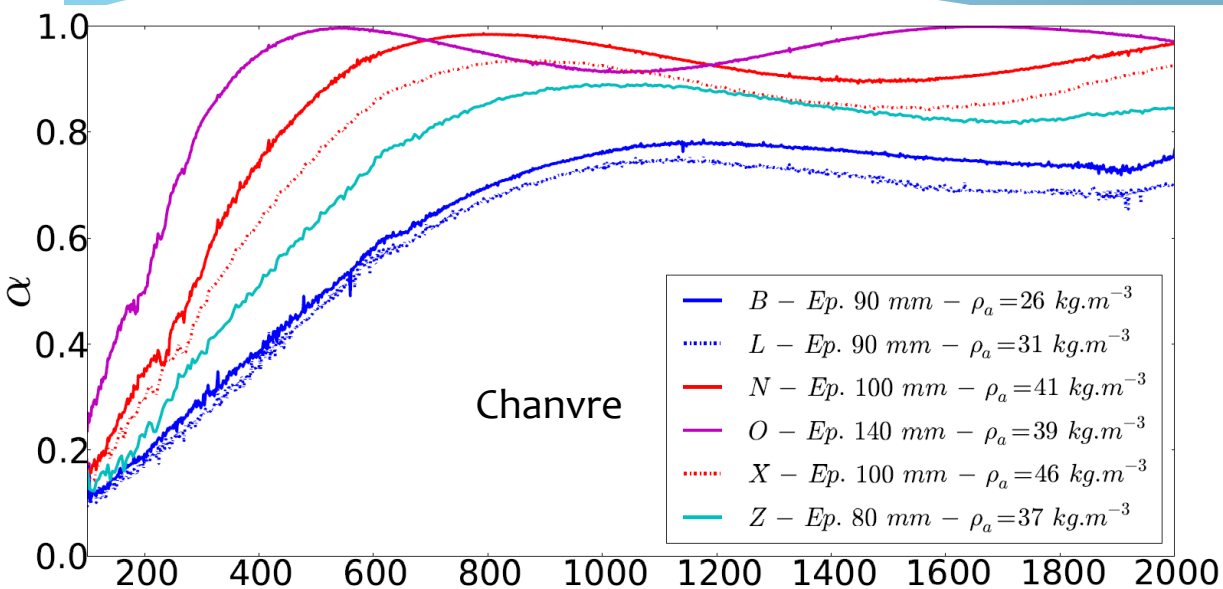
Lien entre rayons de fibres, résistivité et porosité



Résultats

- Grande variabilité et hétérogénéité des distributions de rayons de fibres végétales
- 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

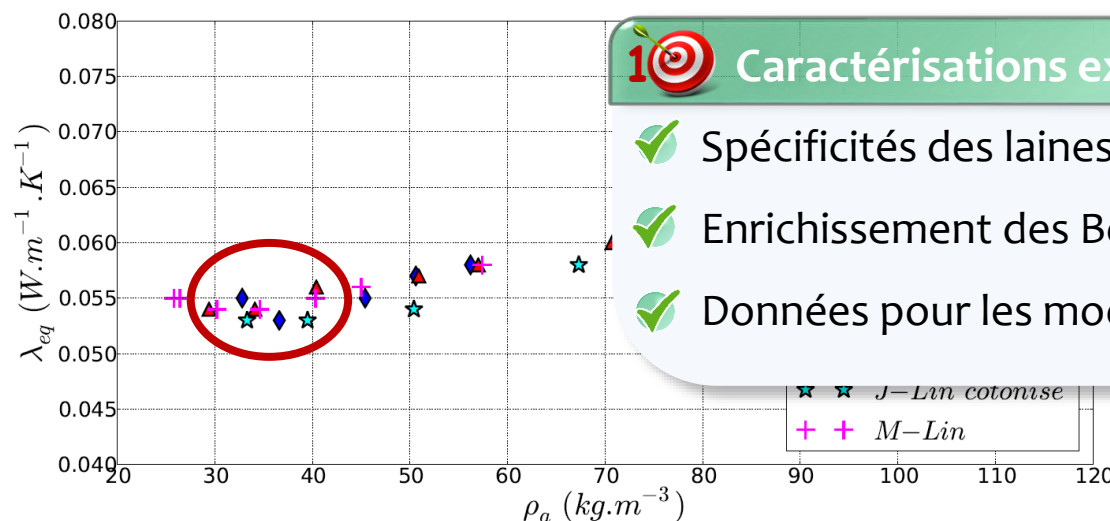
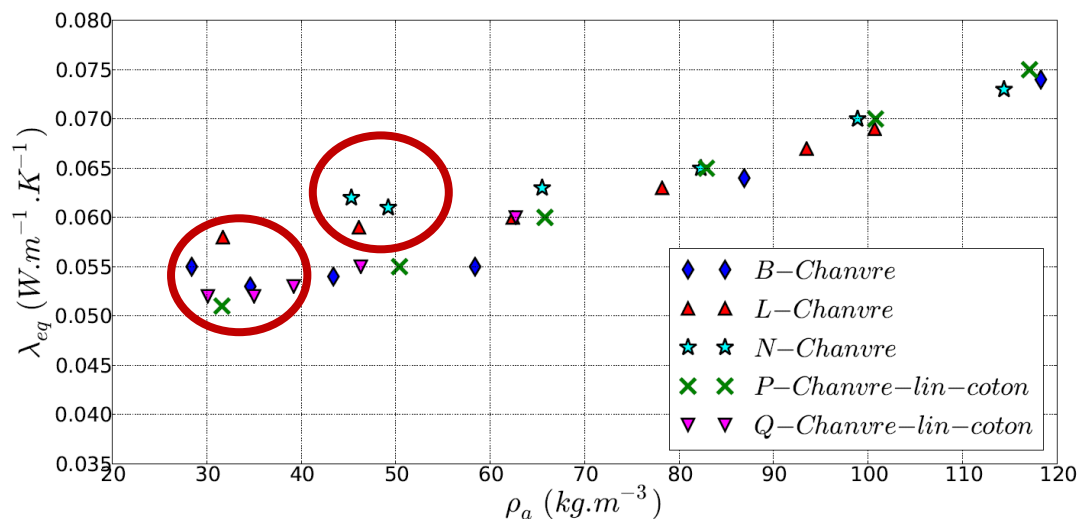


Résultats

- 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 ○

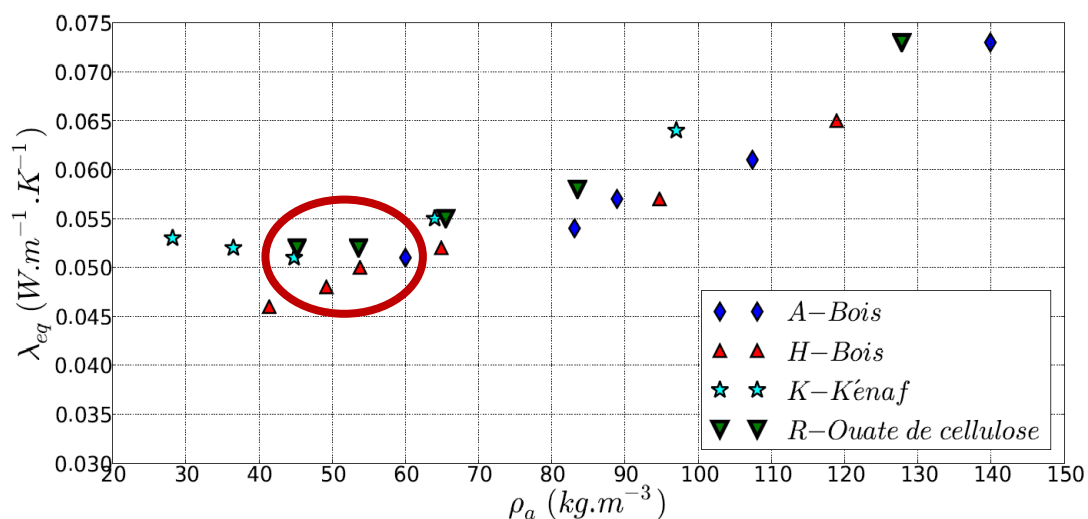
Transferts thermiques par conduction et rayonnement

- 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

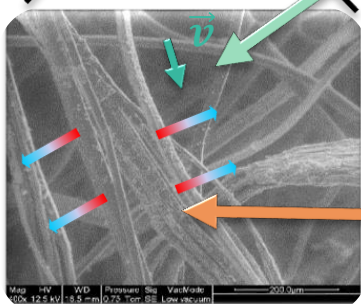
- I. Contexte et utilisation des laines végétales du bâtiment
- II. Etat de l'art
- III. Matériaux et principaux résultats des caractérisations expérimentales
- IV. Présentation de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente**
- V. Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique
- VI. Conclusions et perspectives

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

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

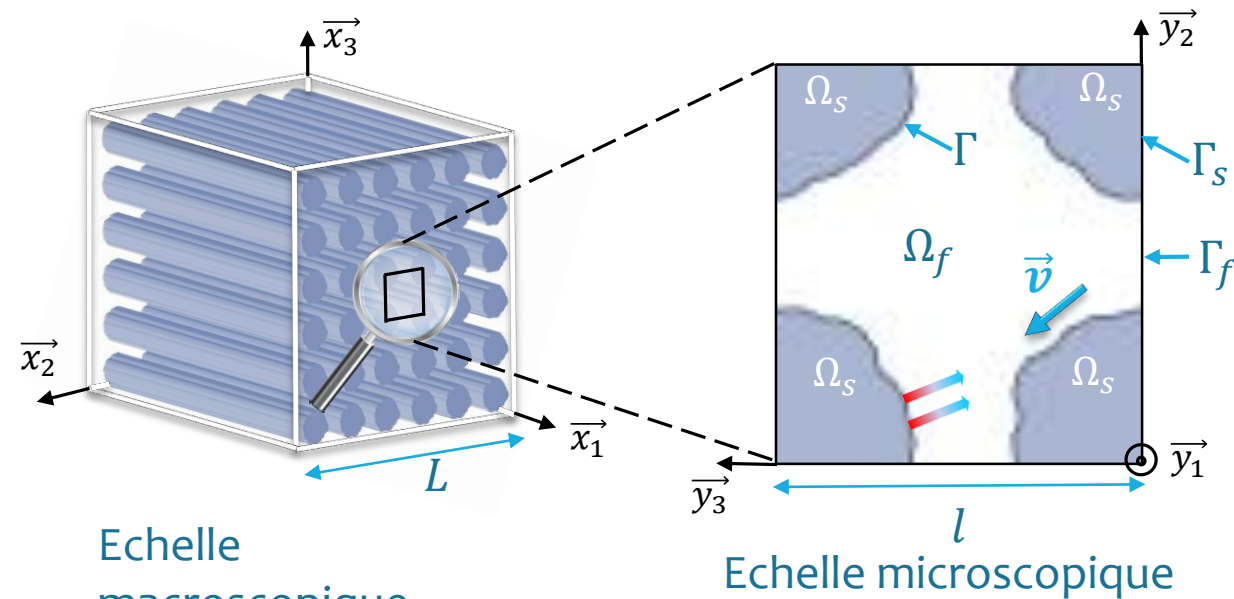
Si dissipation
mécanique

Biot [Biot 1956]
Limp [Panneton 2007]

Hypothèses liées aux méthodes d'homogénéisation

Hypothèses liées aux méthodes d'homogénéisation

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



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

HSP

- Développements asymptotiques $f(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon^i f^i(\vec{x}, \vec{y})$ avec $f^i(\vec{x}, \vec{y})$ Ω - périodique en $\vec{y}$



- Fluide localement incompressible $\vec{\nabla}_y \cdot \vec{v}^0 = 0$
- Equation de Navier-Stokes

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

- Equation de la chaleur

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



- Formulation variationnelle

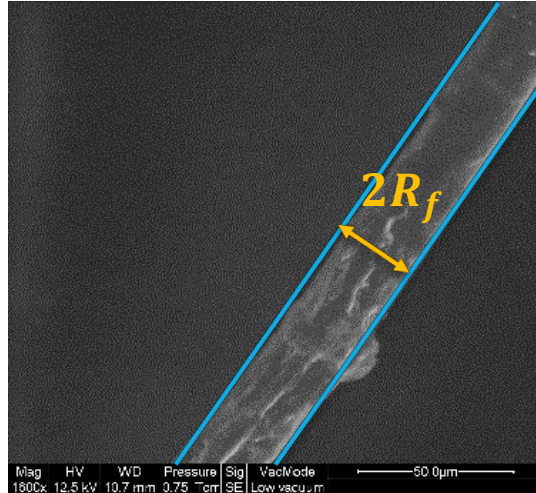


- Lois de comportement macroscopique

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

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

Elaboration du motif générique pour l'HAC



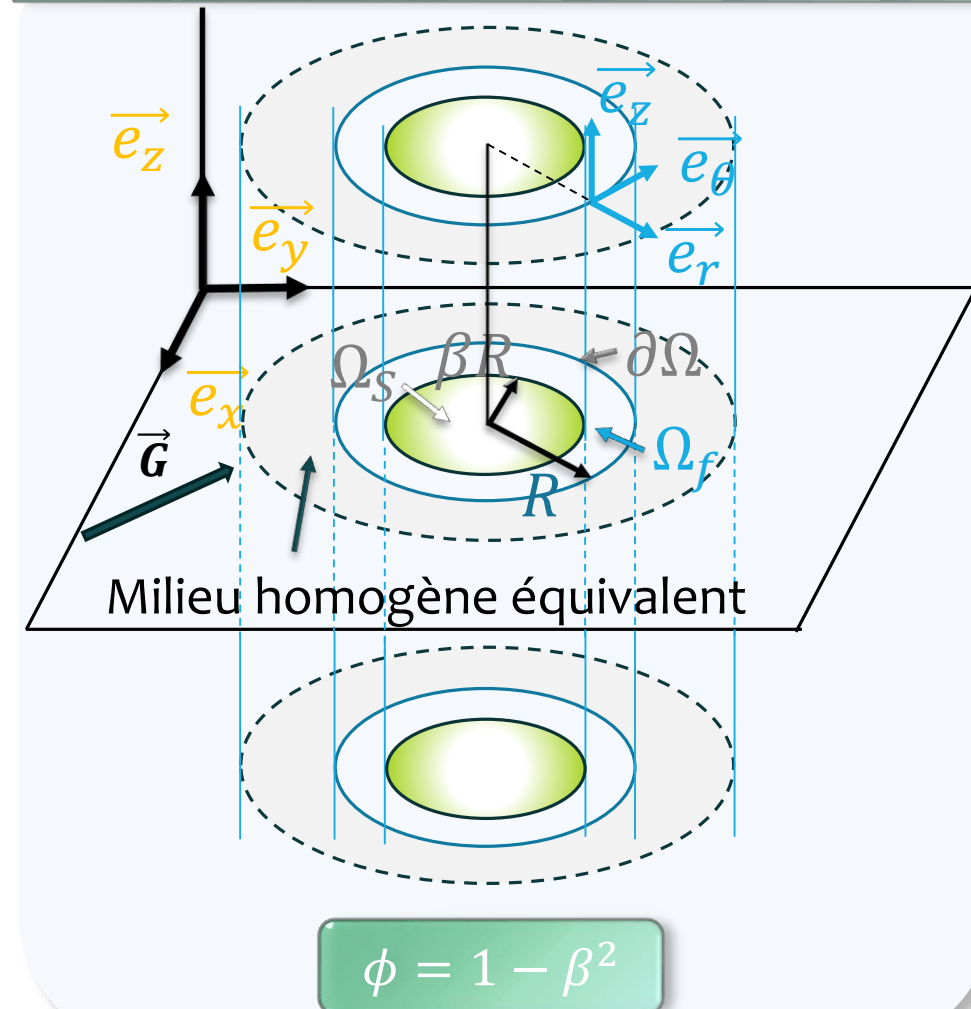
Hypothèses

- 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



HAC statique pour la conductivité thermique de conduction

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

[Piégay et al. – A cylindrical self-consistent modelling of vegetal wools thermal conductivity– Construction & Building Materials 2020]

Effets visco-inertiels

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

↓

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

Effets thermiques

$$\lambda \Delta T - j\omega \rho_0 C_\eta T = -j\omega p$$

↓

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

Solutions

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

[Boutin & Geindreau 2008]

[Boutin & Geindreau 2010]

Modèle à deux tailles de fibres

Modèle (Rf_{veg} , Rf_{pol})

● Modèle acoustique

● (Π_{veg}, K_{veg})

● (Π_{pol}, K_{pol})

+

● Modèle composite [Gourdon & Seppi 2010]

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

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

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

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



Modélisation

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

- I. Contexte et utilisation des laines végétales du bâtiment
- II. Etat de l'art
- III. Matériaux et principaux résultats des caractérisations expérimentales
- IV. Présentation de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente
- V. Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique**
- VI. Conclusions et perspectives

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
 ρ_v ou ρ_p ou ρ_z squelette rigide/limp K

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

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

Thermique

Transferts par conduction

Transferts par rayonnement

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

Rosseland-Deissler Bankvall

HAC statique
 λ_s
 λ_{cond}

β_{moy}
 β'
 $\lambda_{rayt-RD}$
 $\lambda_{rayt-Bk}$

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

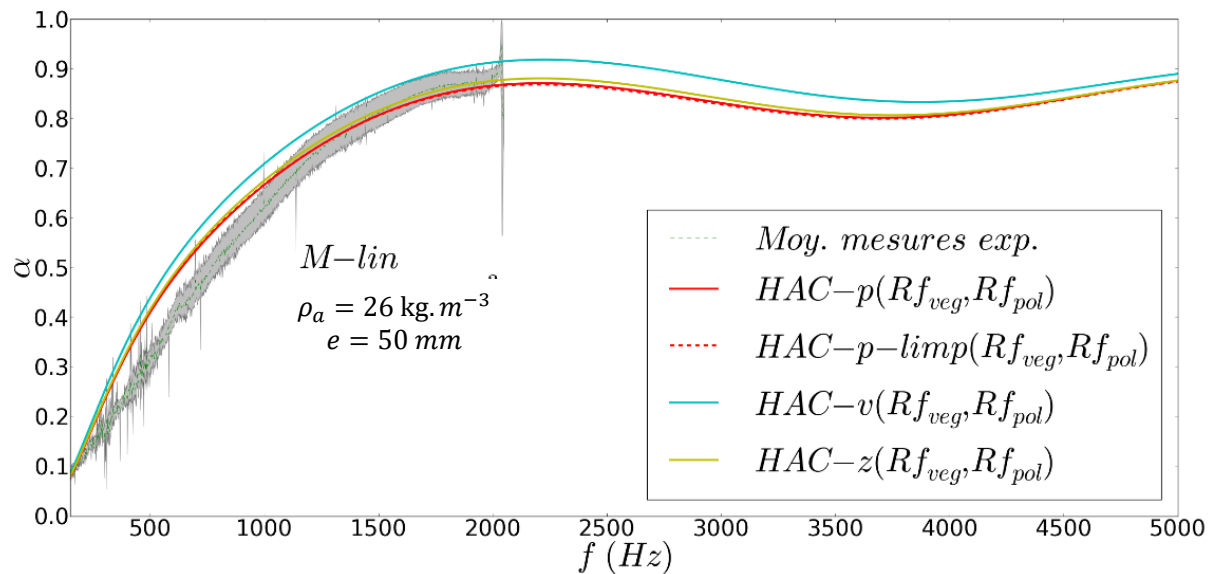
Epaisseur matériau (e)

$$\alpha, TL, R_{th}$$

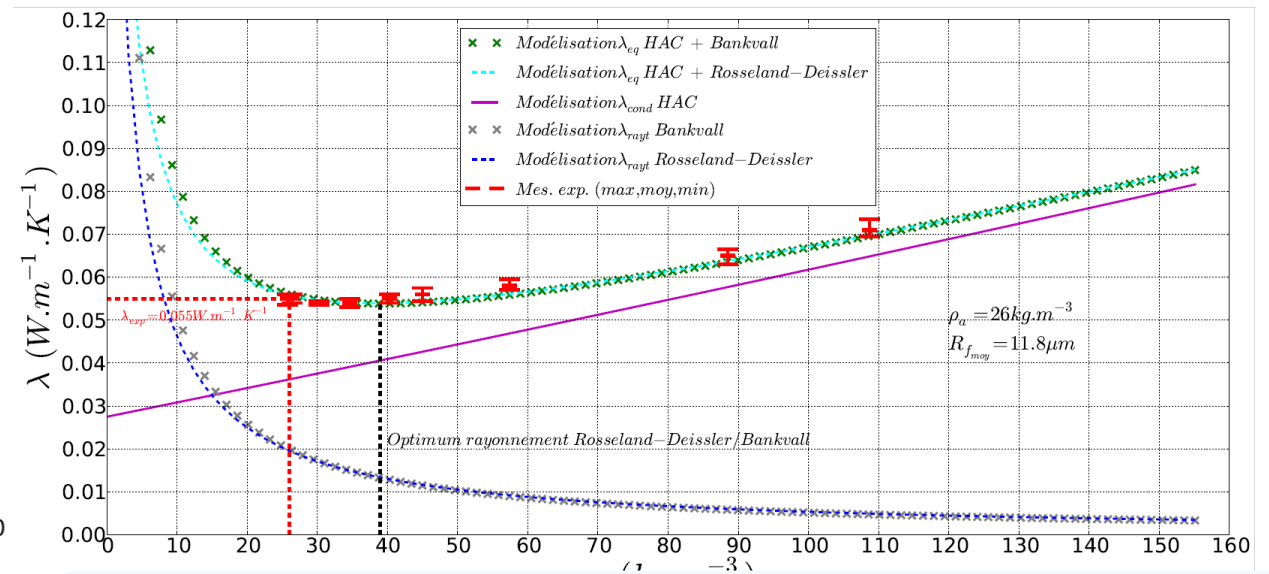
Détermination des performances acoustiques et thermiques

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



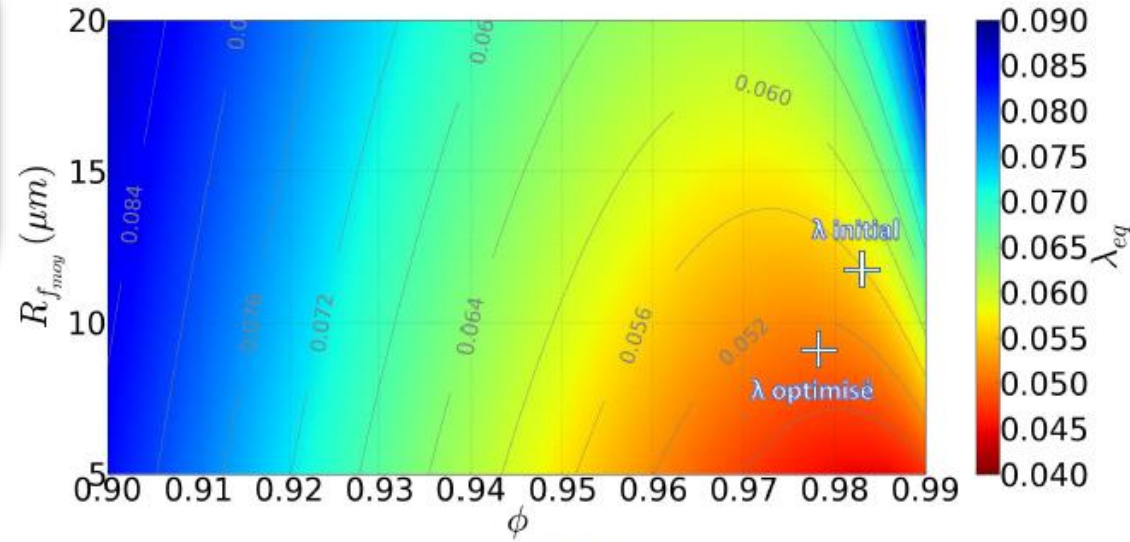
- Approches HAC couplées avec les modèles de rayonnement
- Identification de l'optimum de transfert couplé conduction-rayonnement

Exemple d'optimisation

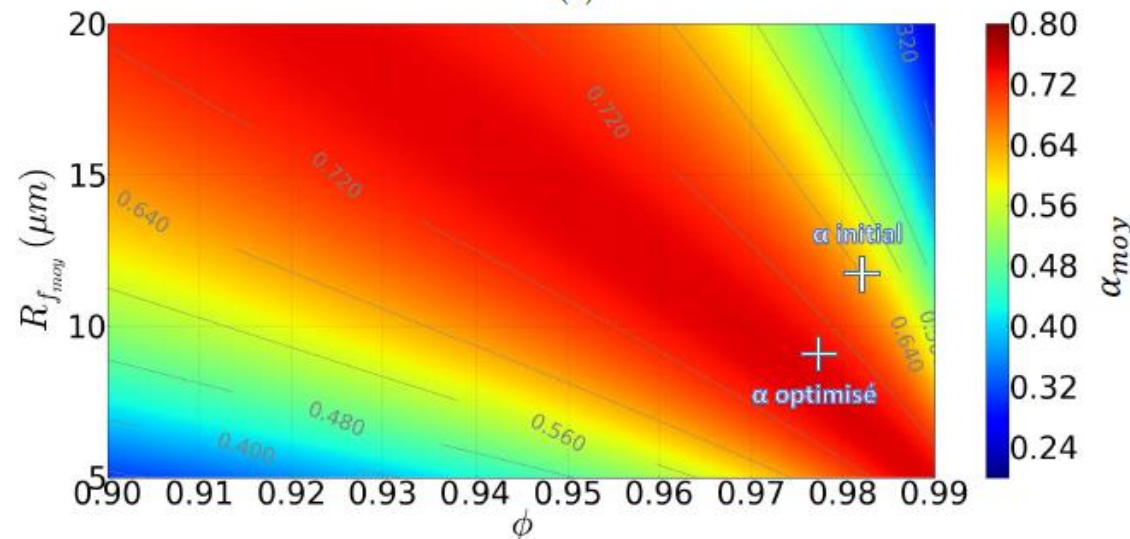
Analyse paramétrique:

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

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



(a)



Résultats

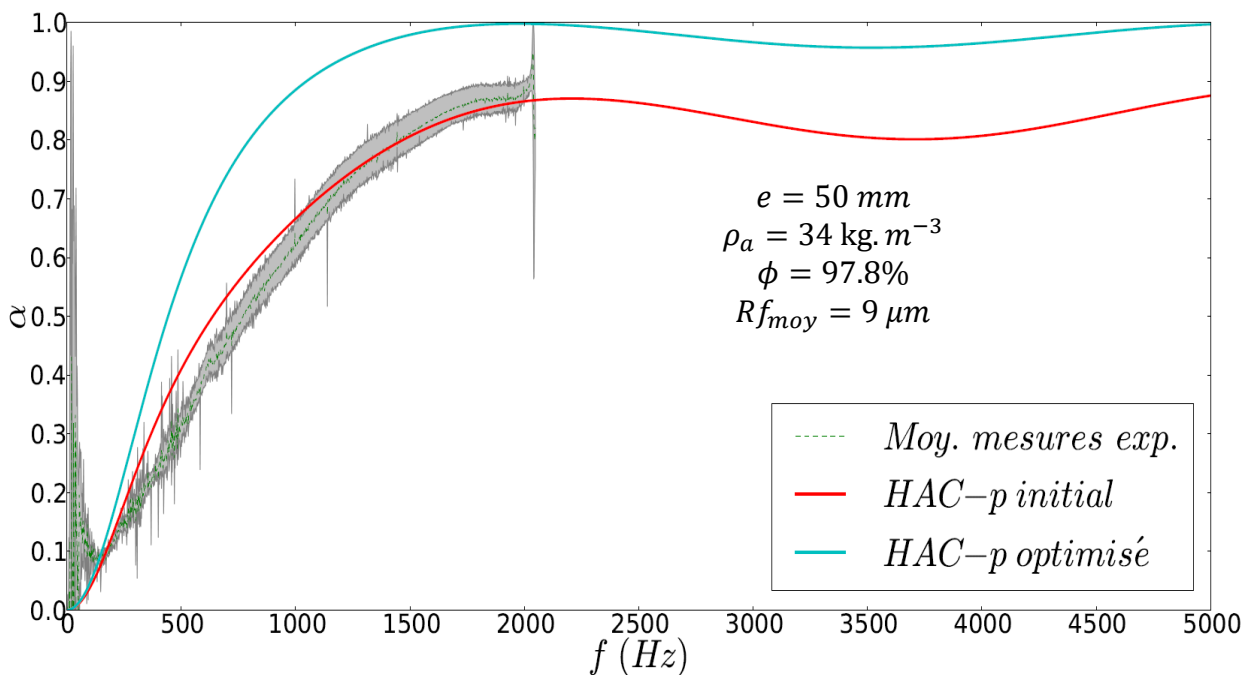
Optimisation conjointe
possible des performances
acoustiques et thermiques
pour :

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

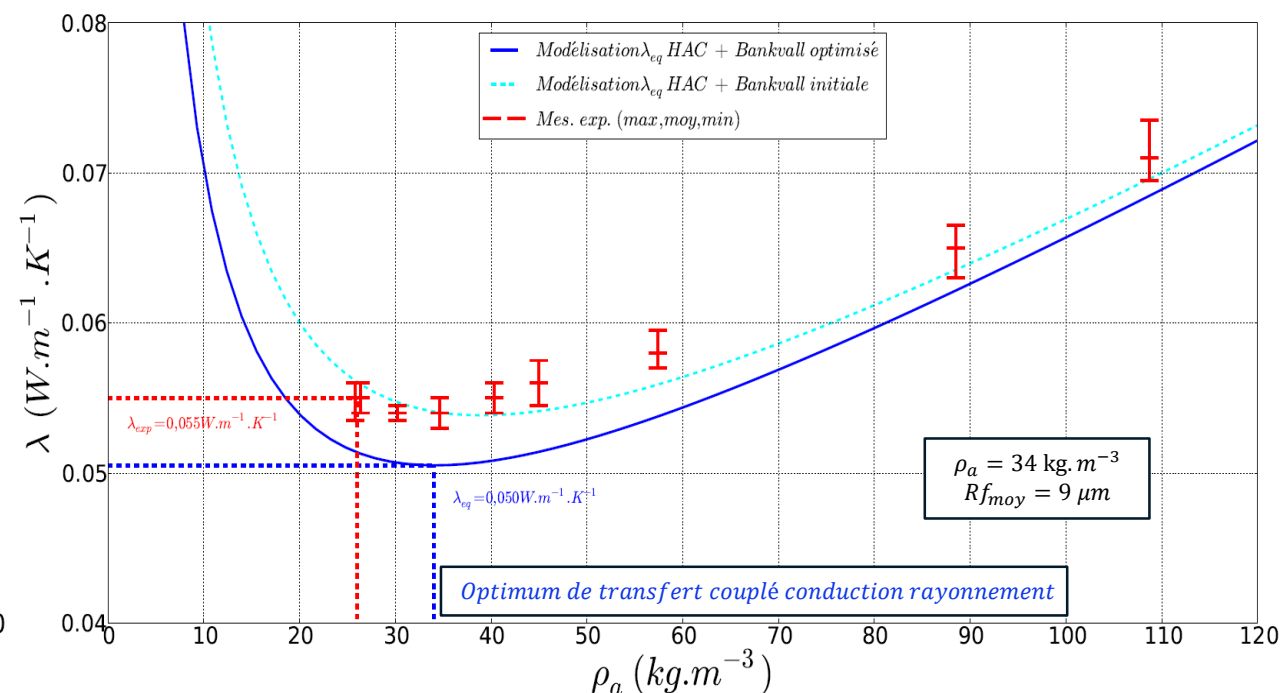
$$\phi = 0.978$$

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

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

- I. Contexte et utilisation des laines végétales du bâtiment
- II. Etat de l'art
- III. Matériaux et principaux résultats des caractérisations expérimentales
- IV. Présentation de la méthode d'homogénéisation auto-cohérente
- V. Procédure de modélisation conjointe acoustique et thermique
- VI. Conclusions et perspectives**

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 $\mathbf{Rf}_{\text{moy}}$
- Optimisation possible des performances

Caractérisation expérimentale

- Capitalisation des données
- Orientation des fibres
- Diffusivité

Modélisation HAC cylindrique

- Distributions log-normales
- 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

Merci de votre attention

Contact:

Clement.piegay@cerema.fr

Liens:

[Piégay et al. – *A cylindrical self-consistent modelling of vegetal wools thermal conductivity*– Construction & Building Materials 2020]

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819325656>

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

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X17303274>