

# Caractérisation et modélisation des performances acoustiques de laines de mouton pour des applications bâtiment



C. Piégay<sup>1</sup>, F. Kast<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Cerema – Univ. Eiffel, UMRAE – Strasbourg, France



Autun  
05-06 juin 2024



## I. Contexte



## II. Matériaux



## III. Caractérisations expérimentales et analyse des leviers mobilisables

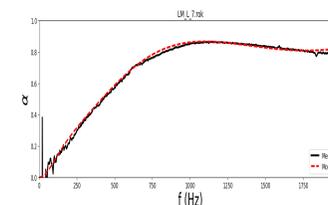
Masse volumique

Porosité

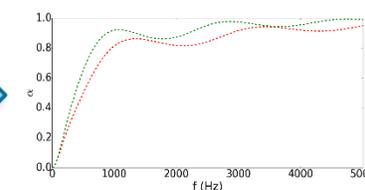
Resistance au passage à l'air

Absorption acoustique

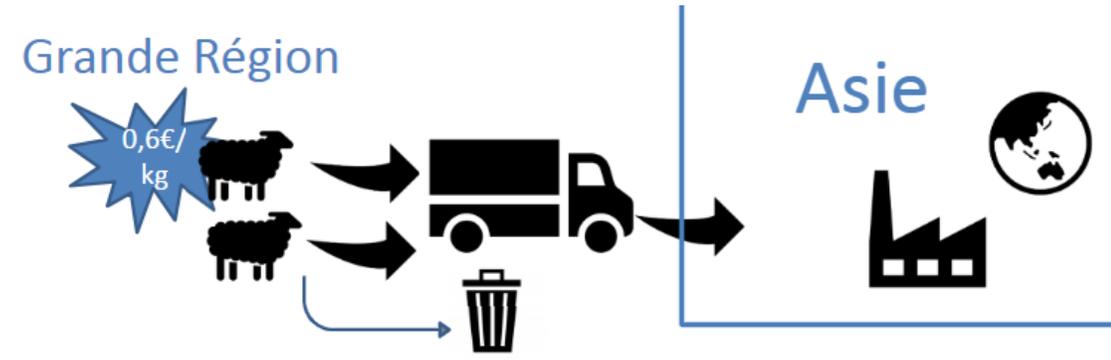
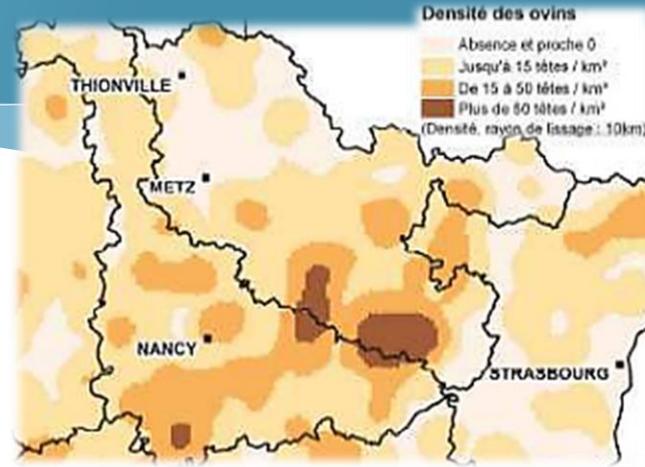
## IV. Modélisation



## V. Optimisation



- Activité forte au sein de la Région Grand Est (secteur du PNR Lorraine) concernant l'élevage d'ovins.
- Diminution constante de la valeur économique de la laine de mouton
- Aucune valorisation locale de la laine



- ➔
- Soutien du PNR Lorraine au développement d'une filière de valorisation de la laine de mouton sur le territoire de la Région Grand Est afin d'apporter des réponses durables aux défis agricole, économique, énergétique et écologique
  - Développement de nouveaux produits d'isolation thermique et acoustique à destination du bâtiment

# I. Contexte – Projet en étapes

## Etape 1 : Projet DEFI-Laine

Projet de coopération transfrontalier de 2017 à 2021

- Lavage de la laine en Belgique
- Fabrication de panneaux isolants par le CETELOR
- Mise en oeuvre dans 2 bâtiments municipaux du PNR



Utilisation de laine en vrac dans les combles et de panneaux pour les parois



Création de la société coopérative MOS-Laine avec unité de transformation de la laine locale pour la fabrication de feutres isolants

## Etape 2 : meilleure définition du potentiel de développement d'isolants du bâtiment à base de laine de mouton

Lancement d'un appel d'offre comprenant deux lots



Réponse conjointe du Cerema (UMRAE – Pôle BioGéo) et du Centre d'Essais Textile LORrain (CETELOR)



### Lot 1 – Cerema

Caractérisation et modélisation des performances acoustiques des panneaux d'isolants à base de laine de mouton à l'échelle matériau en laboratoire



### Lot 2 – CETELOR

Développement et fabrication de différentes formulations de panneaux en laine de mouton 100% biosourcés

2 types de liants

PLA (Acide Polylactique)



PLA + PBS (polybutylène succinate)



Laine initiale DEFI-Laine



Laine de verre I



Laine de verre II



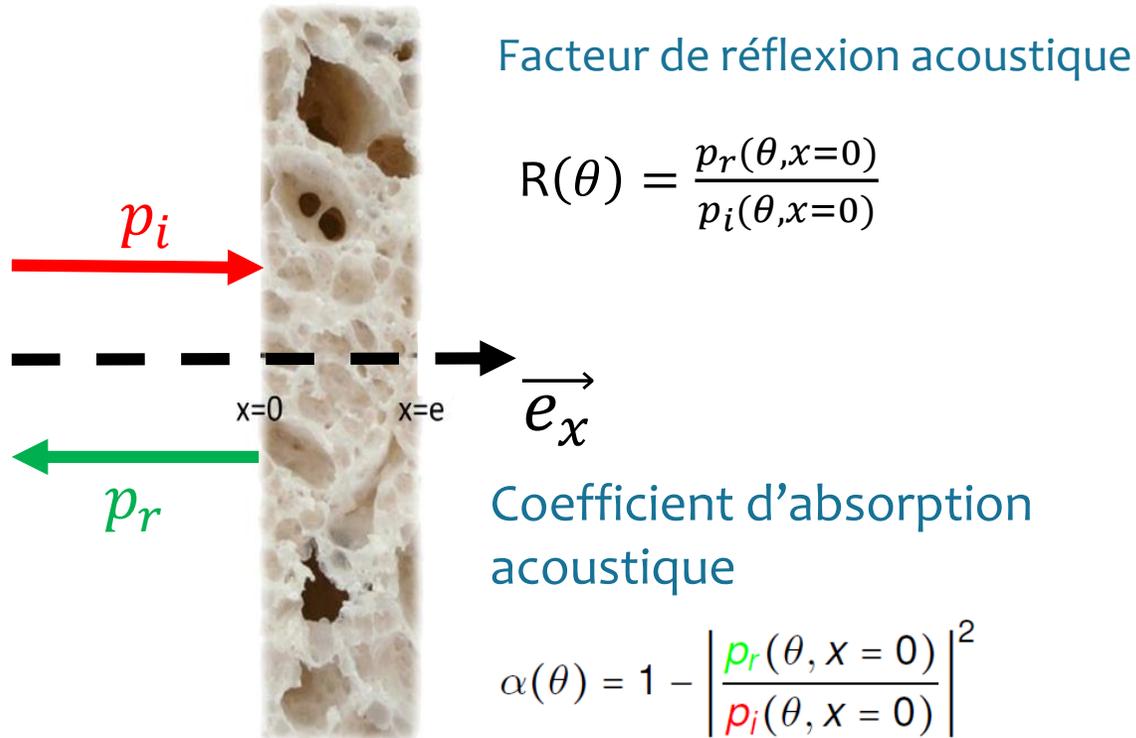
Matériau	Plage d'épaisseur moyenne (mm)	Masse volumique moyenne (kg.m <sup>-3</sup> )
PLA-1 à PLA-6	74 - 93	14 à 24
PBS-1 à PBS-6	70 - 90	11 à 20
Laine mouton DEFI-Laine	98 - 106	20
Laine verre I	60	16
Laine verre II	75	12



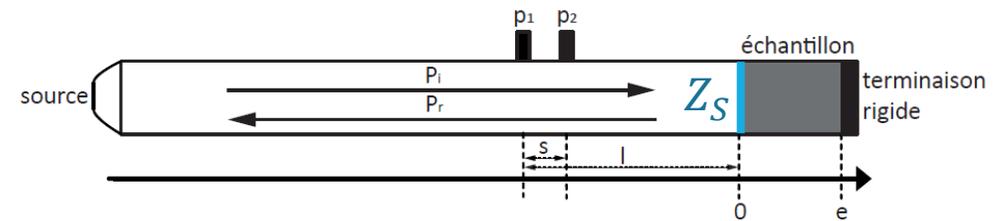
Principal levier

# III. Caractérisations expérimentales : absorption acoustique

- Le coefficient d'absorption acoustique,  $\alpha$



- $\alpha$  déterminé à partir de mesures de pression en deux positions par des microphones, selon la norme ISO 10534-2

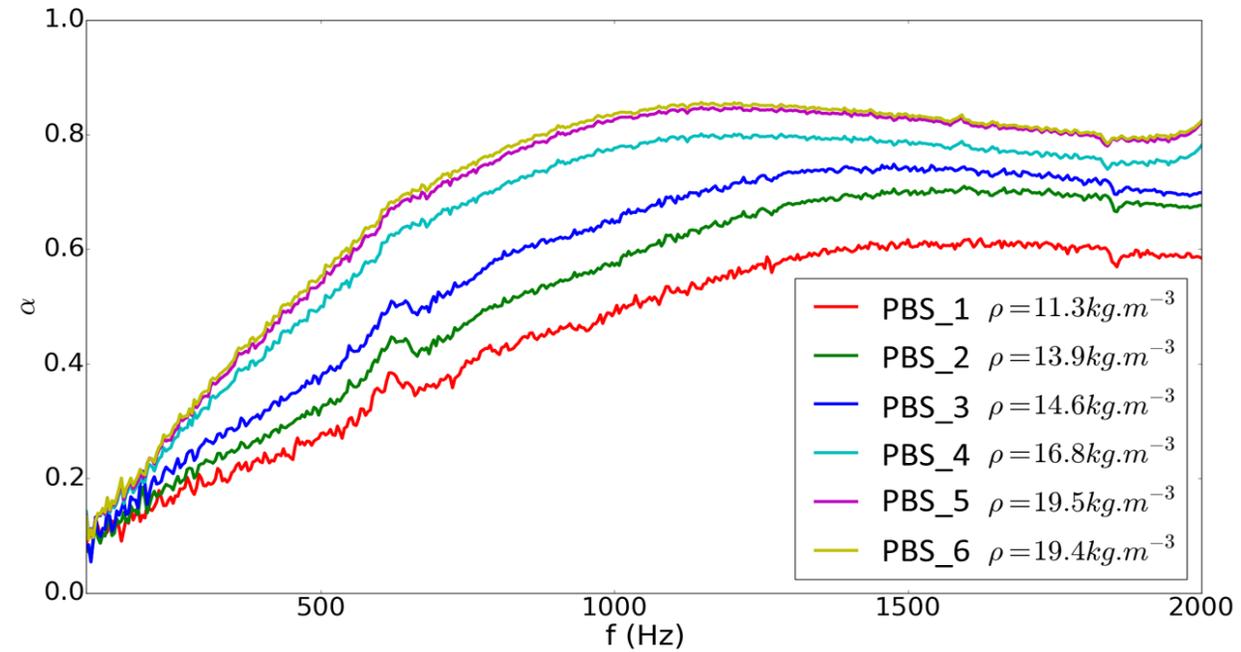
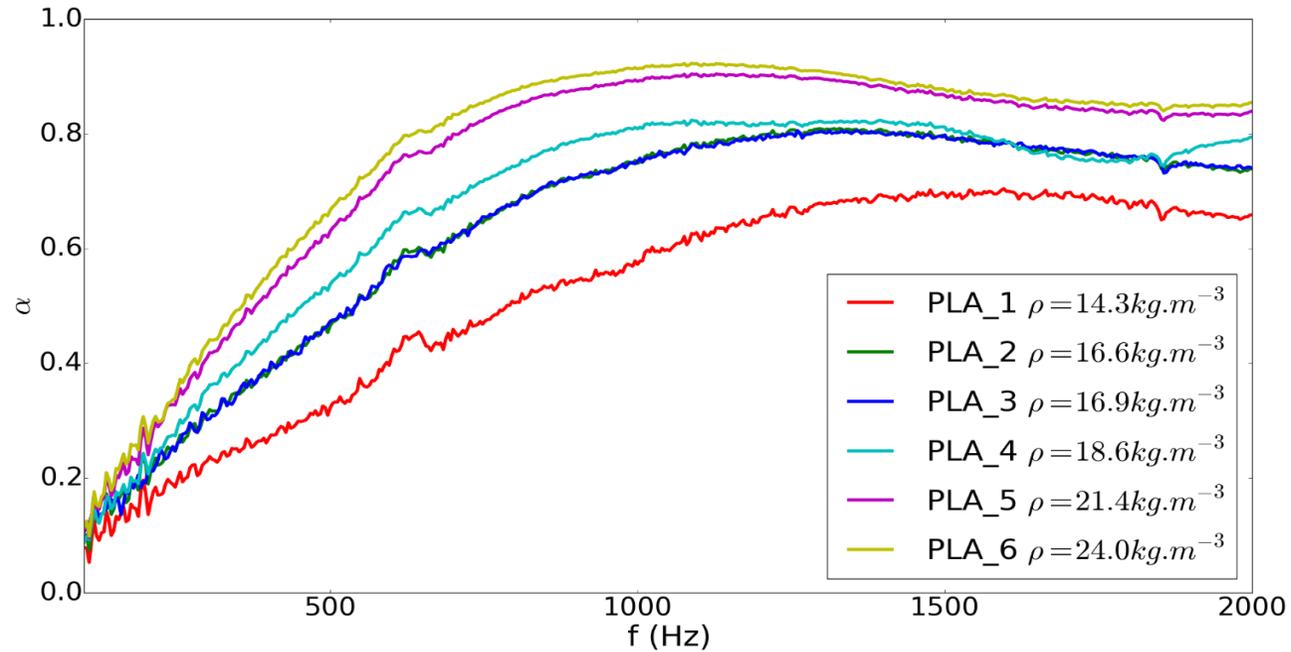


Fonction de transfert :  $H_{12} = \frac{p_2}{p_1}$

$$R = f(H_{12}, k_0, s, l)$$

$$Z_s = \frac{P}{\vec{v} \cdot \vec{n}} = Z_0 \frac{1 + R}{1 - R} \quad \alpha = 1 - |R|^2$$

# III. Caractérisations expérimentales : résultats absorption acoustique



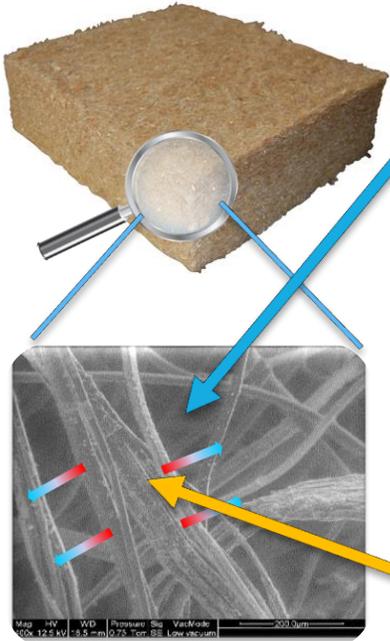
Influence significative de la masse volumique

# III. Caractérisations expérimentales : dissipation au sein des matériaux

Cas général : [Biot 1956]

2 ondes dans la phase solide (compression et cisaillement)

1 onde dans la phase fluide (compression)



## Fluid phase: air

Newtonian viscous and compressible fluid of viscosity  $\mu$

## Solid phase:

- Impermeable
- Skeleton assumption:
  - Elastic skeleton : mechanical dissipation – skeleton elastic deformation [Biot 1956]
  - Rigid skeleton [Zwikker & Kosten, 1949]

$$f > f_{dec} = \frac{\sigma \phi^2}{2\pi\rho_a}$$

## Dissipation

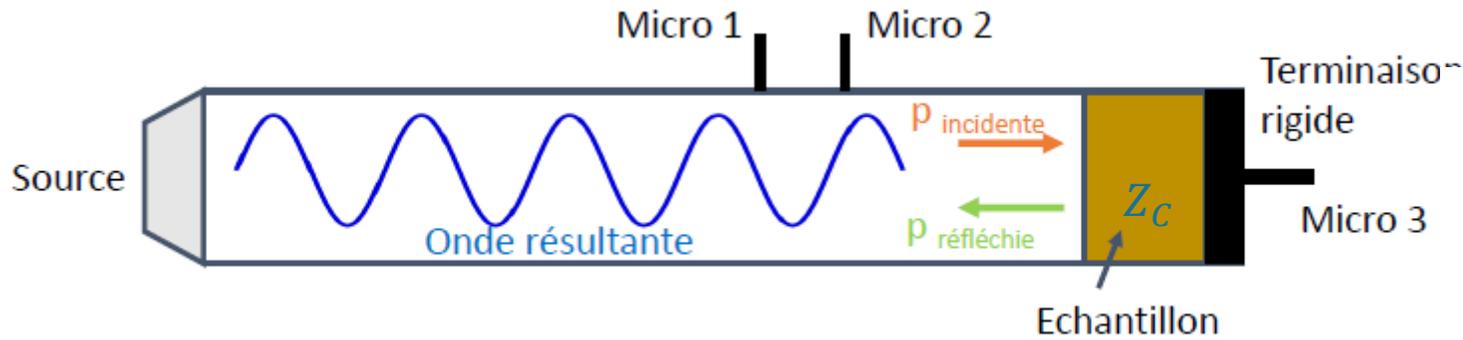
**Viscous effect :** fluid friction on the skeleton  
Dynamic density ( $\rho$ )

**Thermal effect :** heat transfert with the skeleton  
Bulk modulus ( $K$ )

## Sound absorption coefficient

$$\alpha = f(\rho, K, e)$$

# III. Caractérisations expérimentales : paramètres intrinsèques



$$p = p_0 e^{j(\omega t - k_0 x)} + R p_0 e^{j(\omega t + k_0 x)}, x \leq 0$$

$$p = A e^{j(\omega t - k x')} + B e^{j(\omega t + k x')}, 0 \leq x \leq e$$

Fonction de transfert :  $H_{32} = \frac{p_2}{p_3}$

$$k = f(H_{32}, k_0, s, l, R, e)$$

$$Z_c = f(Z_s, k, e)$$

Paramètres intrinsèques

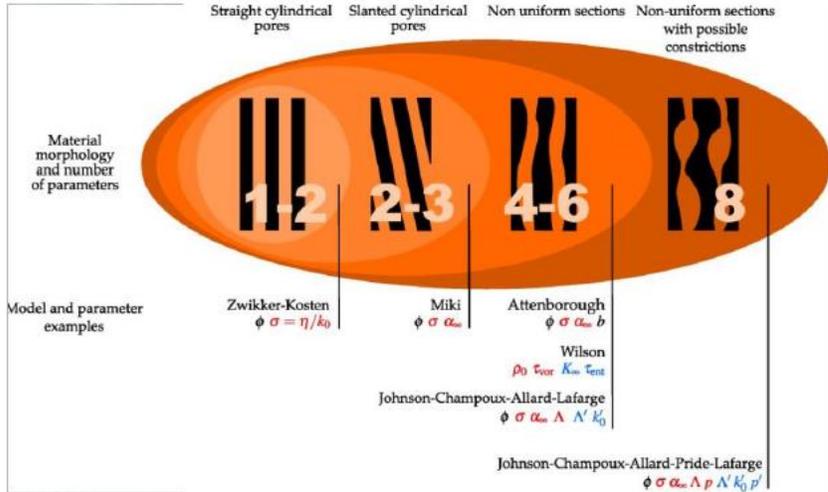
$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K}}$$

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

$$\alpha = f(\rho, K, e)$$

# III. Caractérisations expérimentales : paramètres de la structure poreuse

[Johnson et al. 1987] [Champoux & Allard 1991] [Lafarge et al. 1997]



## Caractérisation indirecte

A partir des mesures au tube de Kundt, on remonte aux paramètres grâce à des relations analytiques

- Porosité  $\phi$
  - Resistivité  $\sigma$
- ➔ Caractérisation expérimentale

- Tortuosité  $\alpha_\infty$
- Longueur caractéristique visqueuse  $\Lambda$
- Longueur caractéristique thermique  $\Lambda'$
- Perméabilité thermique statique  $k'_0$

$$\tilde{\rho}_{eq} = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[ 1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_\infty} \left( 1 + \frac{4 j \alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2} \right)^{1/2} \right]$$

$$\alpha_\infty = \frac{\phi}{\rho_0} \left( \text{Re}(\tilde{\rho}_{eq}) - \sqrt{(\text{Im}(\tilde{\rho}_{eq}))^2 - \frac{\sigma^2}{\omega^2}} \right)$$

$$\Lambda = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \sqrt{\frac{2 \eta \rho_0}{\omega \text{Im}(\tilde{\rho}_{eq}) (\alpha_\infty \rho_0 / \phi - \text{Re}(\tilde{\rho}_{eq}))}}$$

$$\tilde{K}_{eq} = \frac{\gamma P_0 / \phi}{\gamma - (\gamma - 1) \left( 1 - j \frac{\phi \kappa}{k'_0 C_p \rho_0 \omega} \left( 1 + j \frac{4 k_0^2 C_p \rho_0 \omega}{\kappa \Lambda'^2 \phi^2} \right)^{1/2} \right)^{-1}}$$

$$\Lambda' = 2 \sqrt{\frac{\kappa}{\rho_0 C_p \omega} \left( -\text{Im} \left( \left( \frac{\gamma P_0 - \phi \tilde{K}_{eq}}{\gamma P_0 - \gamma \phi \tilde{K}_{eq}} \right)^2 \right) \right)^{-1}}$$

$$k'_0 = \frac{\phi \kappa}{C_p \rho_0 \omega} / \sqrt{-\text{Re} \left( \left( \frac{\gamma P_0 - \phi \tilde{K}_{eq}}{\gamma P_0 - \gamma \phi \tilde{K}_{eq}} \right)^2 \right)}$$

[Olny et al., 2004]

$$\phi = \frac{V_{air}}{V_{tot}} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

→ Masse volumique apparente  
→ Masse volumique de la phase solide

[Leclaire et al. 2013]

## ● Masse volumique de la phase solide et porosité

Matériau	Masse volumique apparente moyenne ( $\rho_a$ ) (kg.m <sup>-3</sup> )	Masse volumique phase solide moyenne ( $\rho_s$ ) (kg.m <sup>-3</sup> )	Porosité (%)
PLA-1 à PLA-6	14 à 24	1 290	98,4 – 98,5
PBS-1 à PBS-6	11 à 20	1285	98,4 – 98,5
Laine mouton DEFI-Laine	20	1300	98,5
Laine verre I	16	2 315	99,4
Laine verre II	12	2 200	99,6

[Müssig 2010]

- $\rho_s$  valeurs proches de la littérature : 1 300 kg.m<sup>-3</sup>
- $\rho_s$  plus faibles que pour les fibres végétales (cellulose, lignin, pectin, etc.) de l'ordre de 1450 kg.m<sup>-3</sup> et que pour les fibres de verre
- Porosité élevée

# III. Caractérisations expérimentales : résistance au passage à l'air

La résistance à l'écoulement de l'air

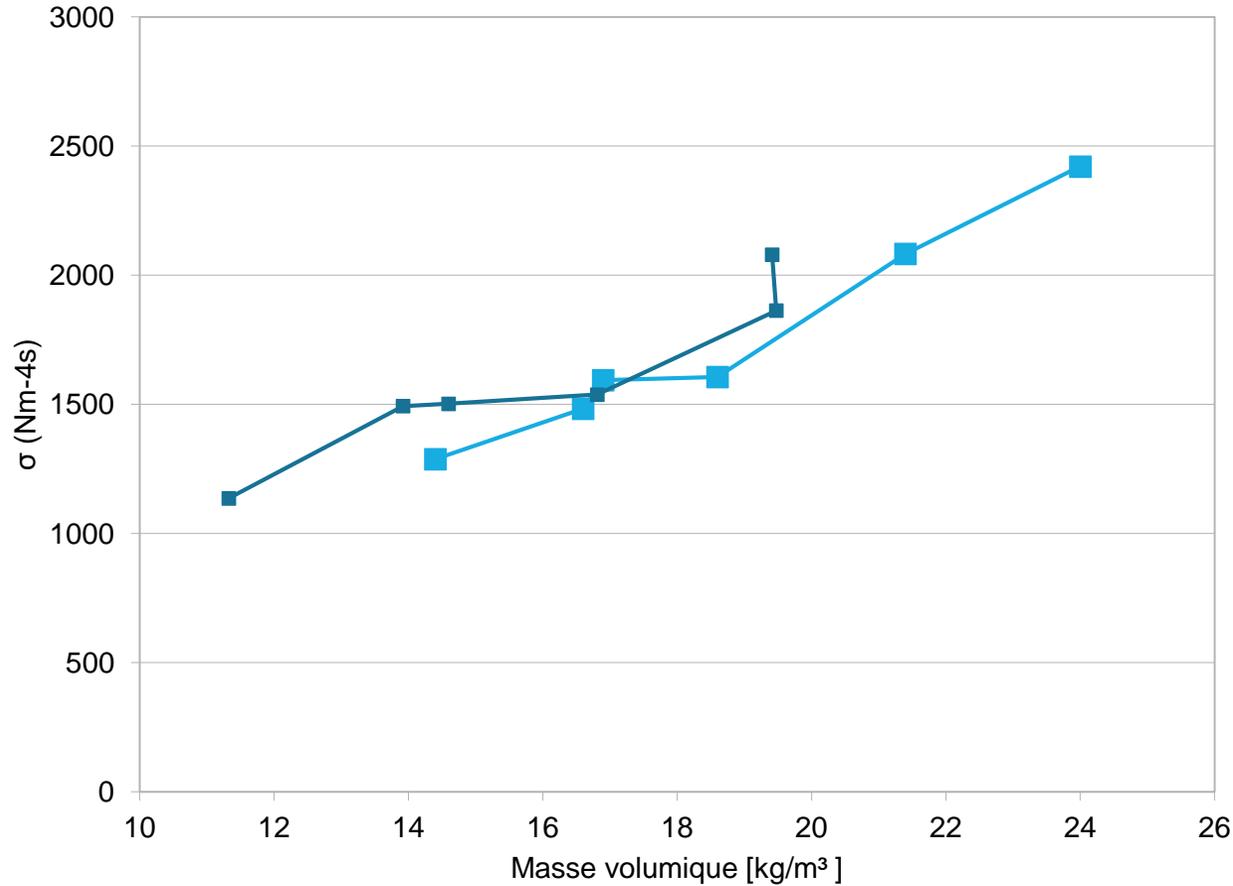
(également appelée résistivité) d'un matériau,  $\sigma$ , caractérise la capacité d'un matériau à s'opposer à l'écoulement d'un fluide à travers sa structure. Norme ISO 9053-1 :2018

Matériau	Masse volumique apparente moyenne ( $\rho_a$ ) (kg.m <sup>-3</sup> )	Résistivité expérimentale directe moyenne ( $\sigma$ ) (N.m <sup>-4</sup> .s)
PLA-1 à PLA-6	14 à 24	1 288 – 2 421
PBS-1 à PBS-6	11 à 20	1 258 - 2079
Laine mouton DEFI-Laine	20	1 957± 144
Laine verre I	16	6 137 ± 146
Laine verre II	12	4 731 ± 320

- Valeurs très modestes pour les laines de mouton
- Laines de verre plus résistantes
- Corrélation entre résistivité et masse volumique apparente

# III. Caractérisations expérimentales : résistance au passage à l'air

● Corrélation entre masse volumique et résistivité



[Tarnow 1996a]

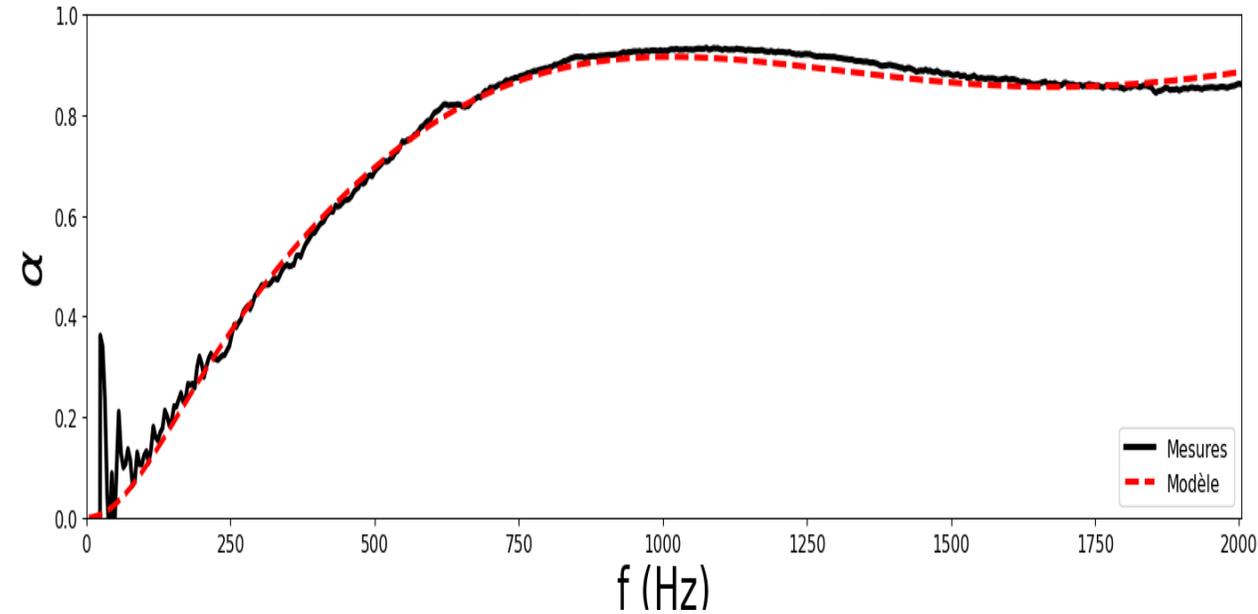
$$\sigma = 4\mu \frac{1 - \phi}{R_f^2 \left[ 0,640 \ln \left( \frac{1}{1 - \phi} \right) - 0,737 + (1 - \phi) \right]}$$

$$\phi = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

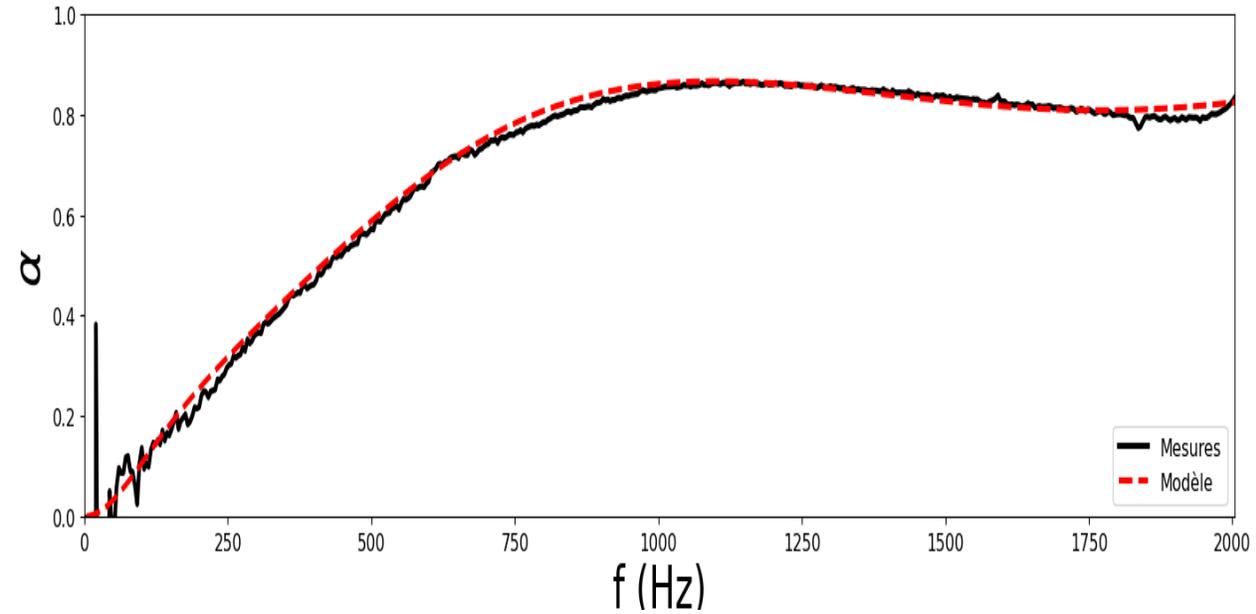
■ Laines PLA  
■ Laines PBS

# IV. Modélisation de l'absorption acoustique : validation du modèle JCAL

Laine PLA



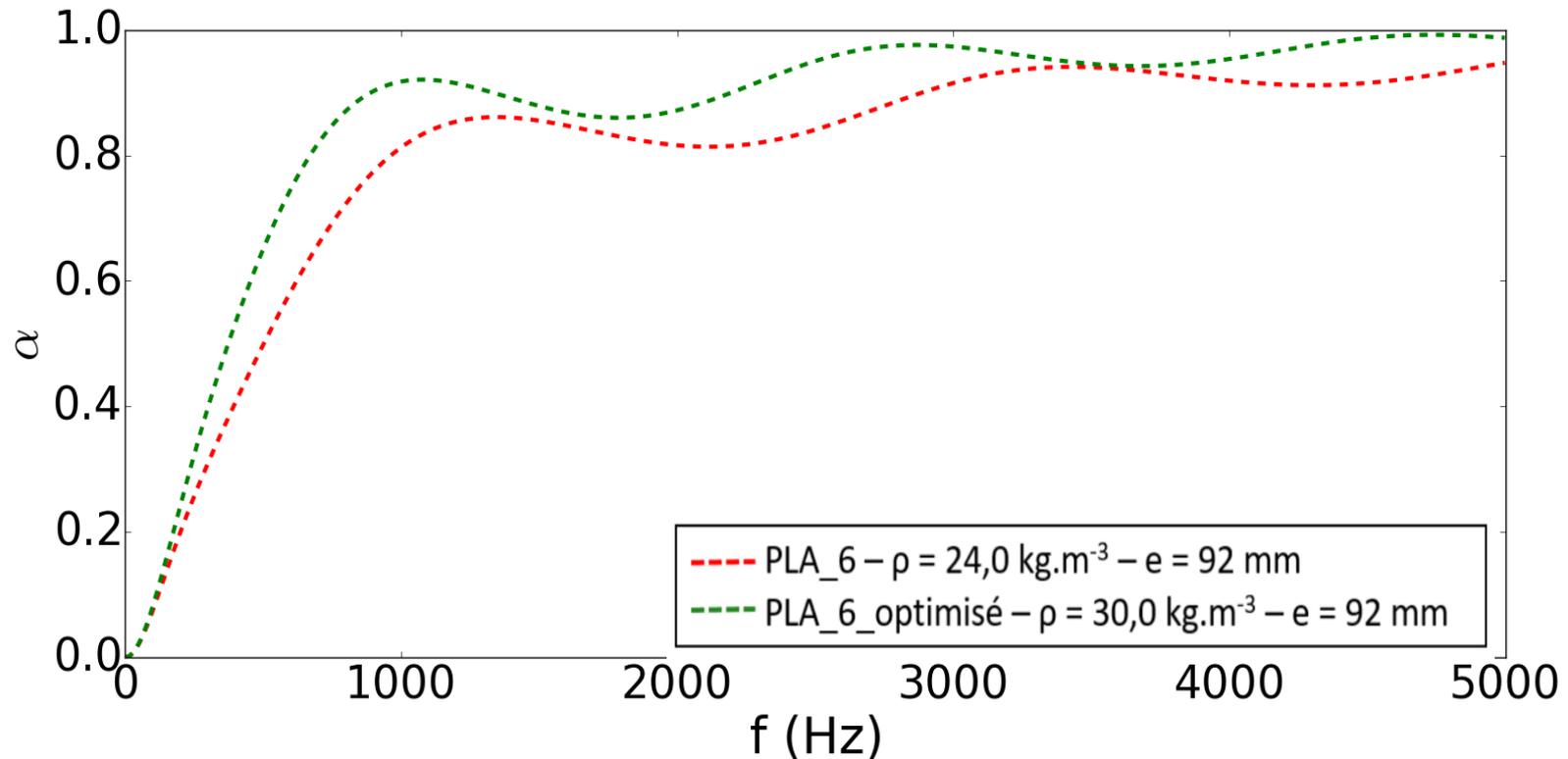
Laine PBS



- Très bon accord entre le modèle et la mesure avec des différences de moins de 5%

# V. Exemple d'optimisation possible

Matériau	Porosité $\phi$	Résistivité $\sigma (N.m^{-4}.s)$
PLA-6	0,985	2421
PLA_6 optimisé	0,977	3 100



# Merci pour votre attention



## ○ Contact :

- [clement.piegay@cerema.fr](mailto:clement.piegay@cerema.fr)
- [biogeo@cerema.fr](mailto:biogeo@cerema.fr)
- <http://www.umrae.fr/>

## Belle histoire de partenariat du Carnot Clim'Adapt

<https://www.cerema.fr/fr/innovation-recherche/institut-carnot-clim-adapt/belle-histoire-partenariat-parc-naturel-regional-lorraine>



# Comparaison avec DEFI-Laine + laines de verre du commerce

