



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Caractérisation acoustique: *Des matières premières aux fibreux et granulaires biosourcés*

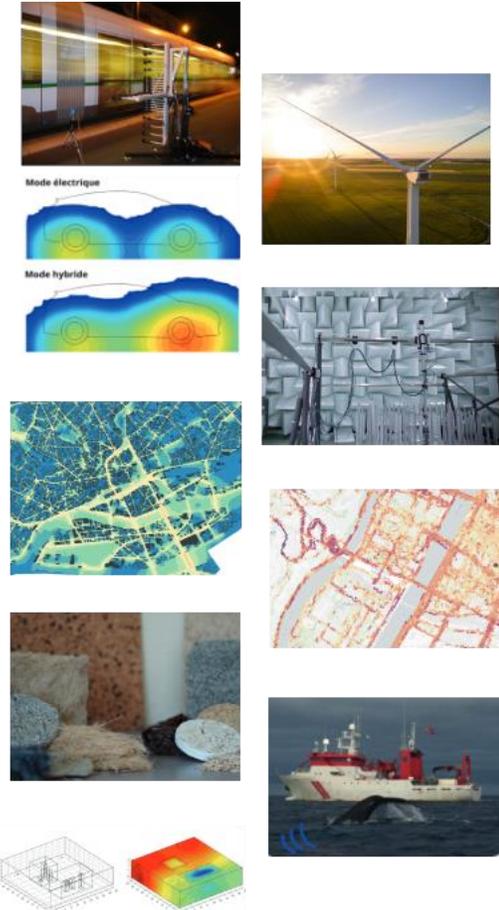
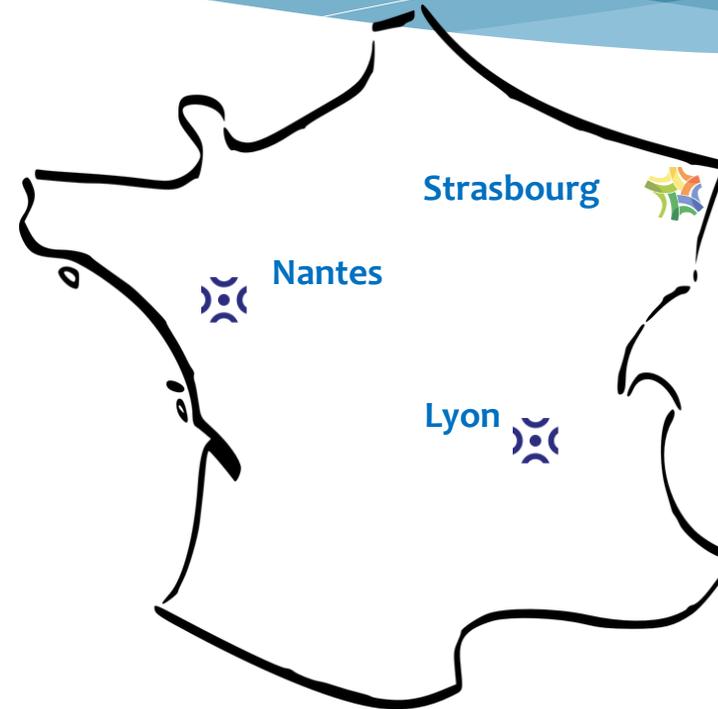
Philippe Glé & Clément Piégay

UMRAE

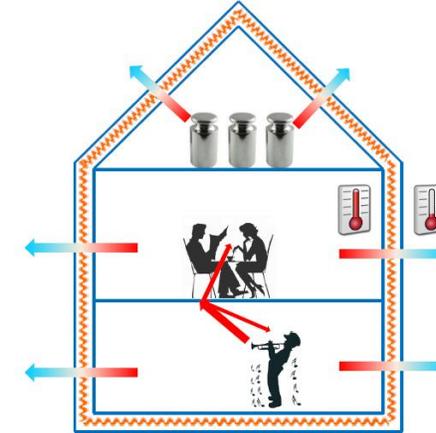
Ecole d'automne 2024 - Obernai



- L'UMRAE est **une unité de recherche conjointe** entre
 - l'**Université Gustave Eiffel** (ex Ifsttar)
 - le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (**CEREMA**)
- L'UMRAE
 - est un **laboratoire de référence en matière de recherche** sur le bruit dans l'environnement et contribue à de nombreux projets de recherche européens et français.
 - mène des **activités de recherche et de développement** et participe à **l'innovation** dans son domaine de compétence, en particulier en ce qui concerne les infrastructures de transport terrestre.
- L'objectif de l'UMRAE est
 - de proposer des méthodes, des logiciels, des guides, des recommandations pour **évaluer l'impact sonore des aménagements** routiers, urbains et ferroviaires, et plus largement de toute infrastructure générant du bruit,
 - de développer des **méthodes et des solutions de réduction du bruit**.
- Le pôle BioGéo en bref
 - Une équipe-ressource sur la thématique des matériaux biosourcés et géosourcés
 - Des moyens d'essais et de modélisation avancés en acoustique et thermique



- L'acoustique: un angle de performance parmi d'autres
 - Comme la mécanique, la thermique, la réaction au feu...
 - Une performance à caractériser
 - Quantitativement: Quels niveaux par rapport aux besoins/attentes
 - Qualitativement: Quels comportements
- L'acoustique: un angle d'observation parmi d'autres
 - Un outil d'investigation de la microstructure
 - Des opportunités de caractérisation indirecte
 - Pour la mécanique
 - Pour l'hygrothermique

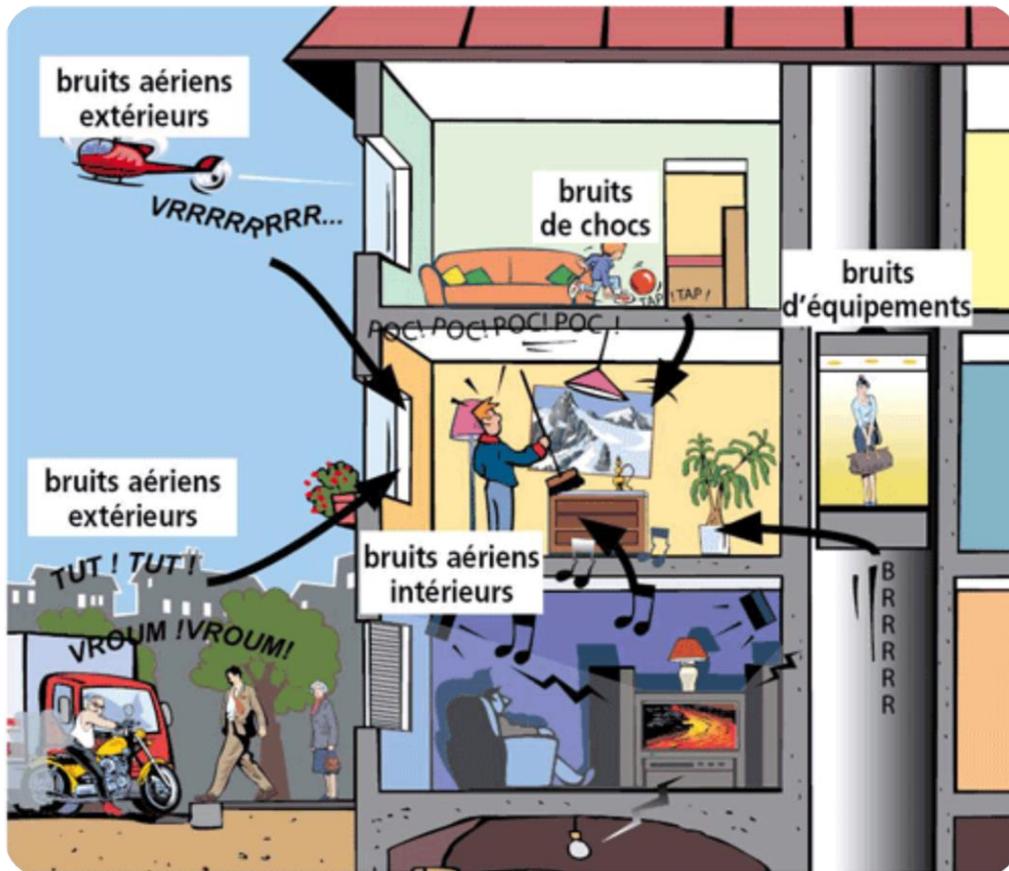


[labs.openai.com]

- Notions d'acoustique
- Phénomènes de dissipation au sein des matériaux
- Caractérisation des constituants, des matériaux et des systèmes constructifs
- Comportement et spécificités des biosourcés fibreux
- Comportement et spécificités des biosourcés granulaires
- Recherches en cours et perspectives

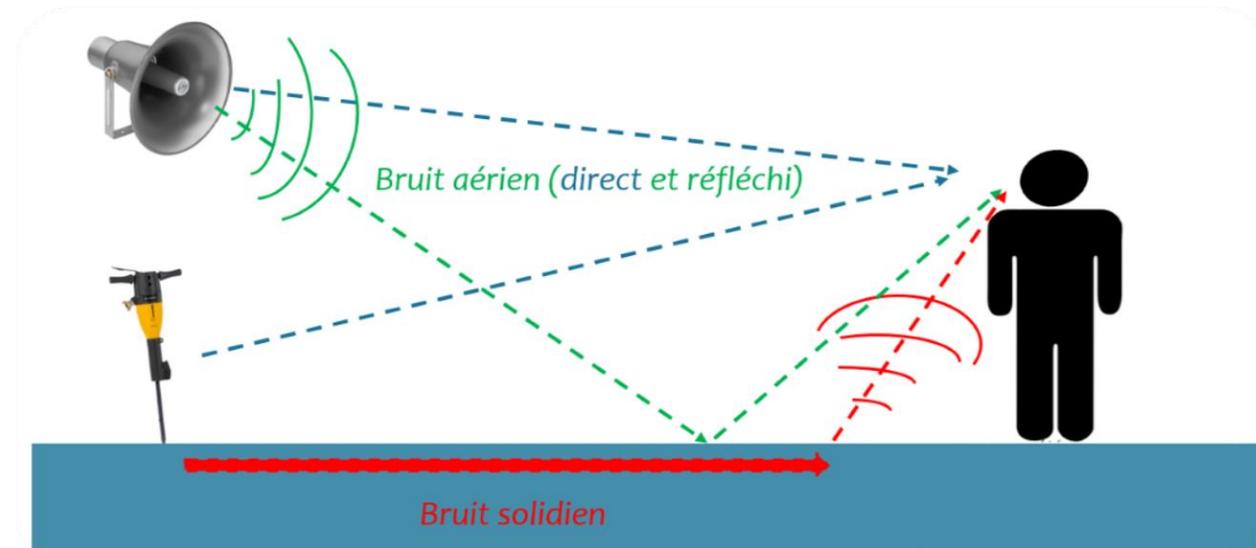
Notions d'acoustique

Quelles sources de bruit ?



[Source: Ademe]

Propagation aérienne ou solidienne?



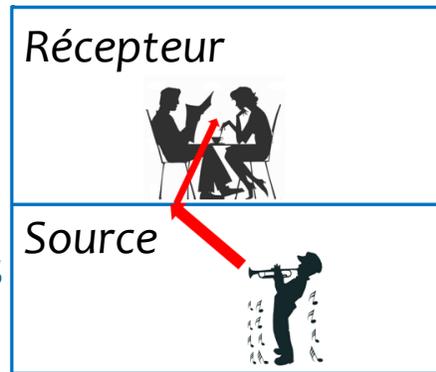
Deux traitements à optimiser

- Isolation acoustique
- Correction acoustique

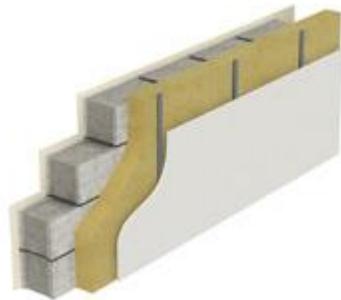
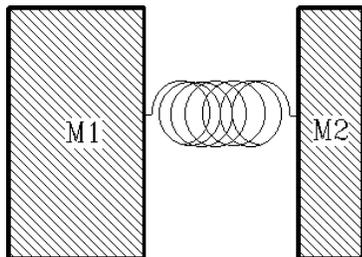
■ Isolation acoustique

* But :

Limiter la propagation du son à travers une paroi



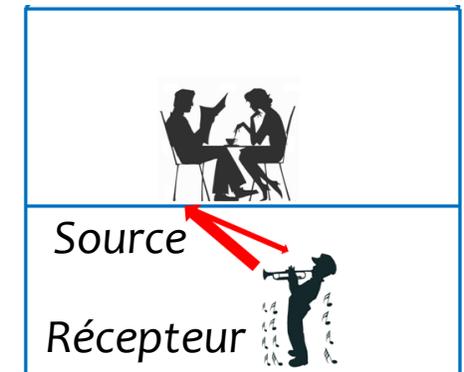
* Moyens :



■ Absorption acoustique

* But :

Limiter l'énergie réfléchiée sur une (des) surface(s)

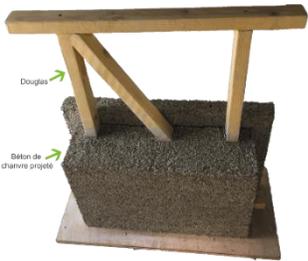


* Moyens :





Echelles
matériau, paroi



Echelle
bâtiment

Coefficient d'absorption

$$\alpha(\theta) = 1 - \left| \frac{p_r(\theta, x=0)}{p_i(\theta, x=0)} \right|^2$$

Indice d'affaiblissement

(TL : Transmission Loss, ou R)

$$TL(\theta) = -10 \log \left| \frac{p_t(\theta, x=e)}{p_i(\theta, x=0)} \right|^2$$

Amélioration de l'affaiblissement

$$\Delta R_w = R_w - R_{w,ref}$$

Isolement acoustique standardisé

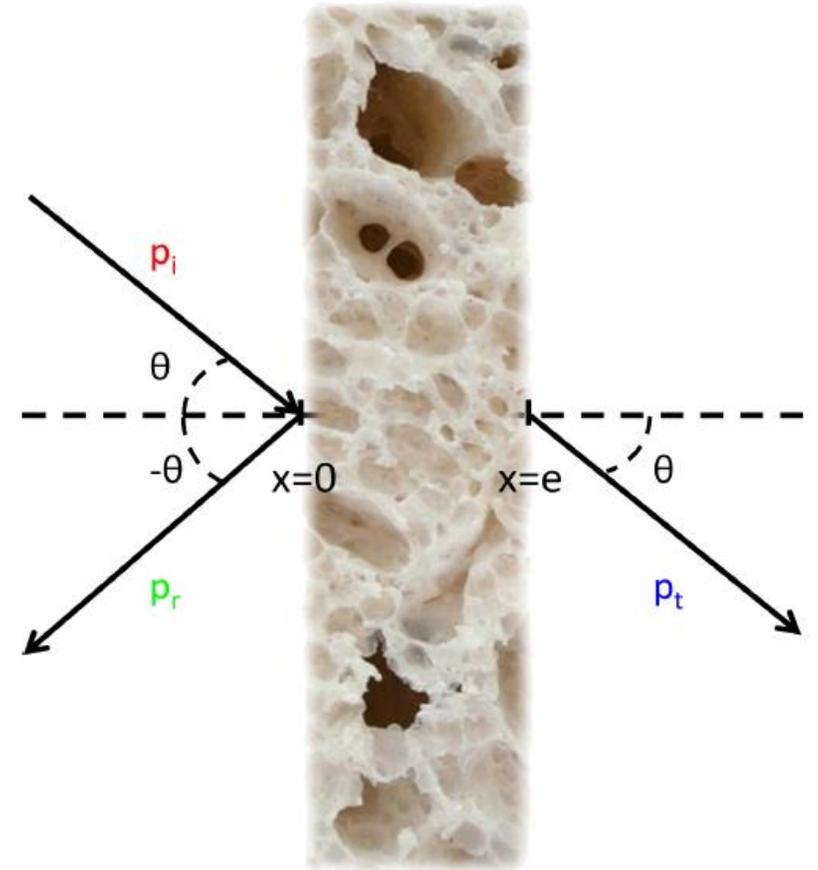
$$D_{nT}$$

Niveau pondéré du bruit de choc standardisé

$$L'_{nT,w}$$

Transmissions latérales

$$K_{i,j}$$



Phénomènes de dissipation au sein des matériaux

Définition du milieu poreux

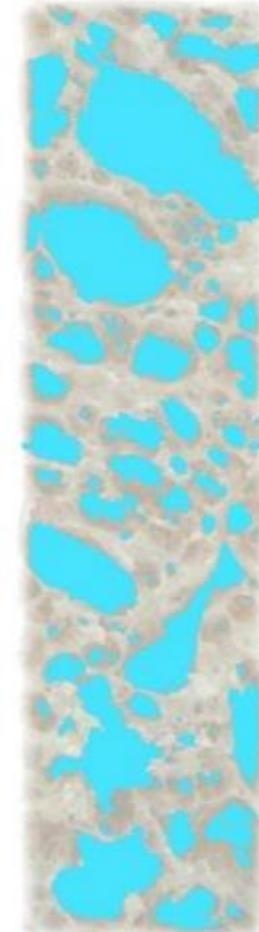
Matériau poreux

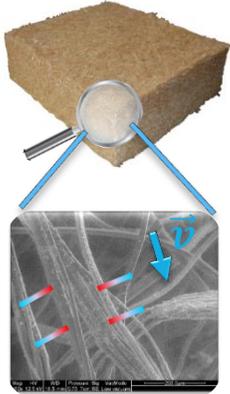


Phase solide

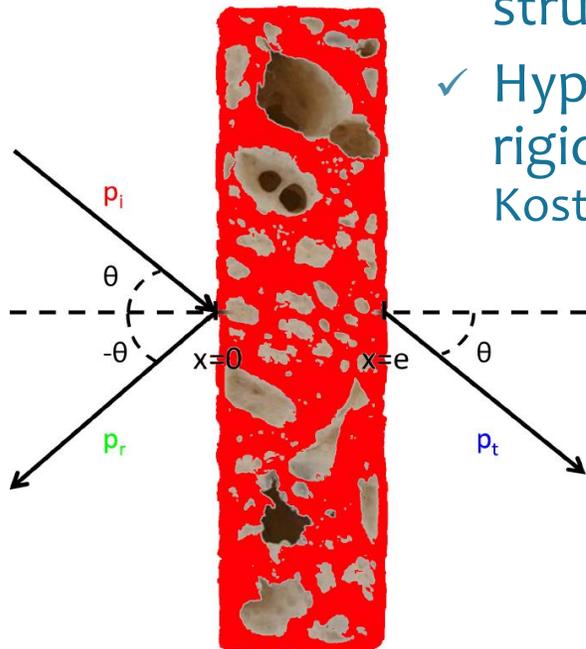


Phase fluide



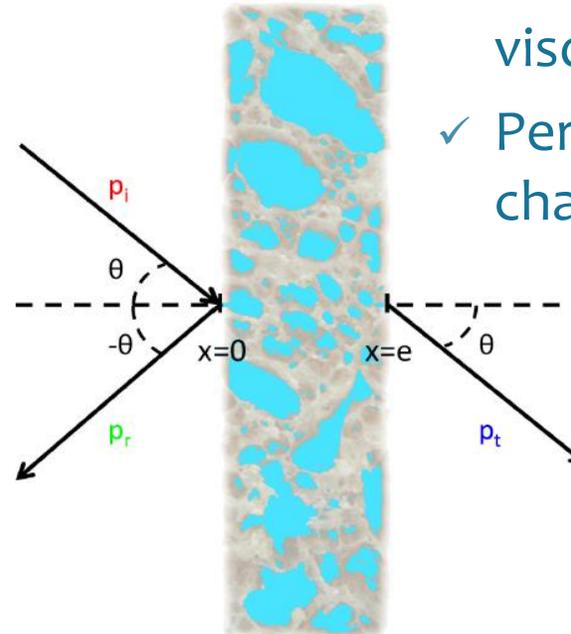


- **Effets mécaniques**
(phase solide)
 - ✓ 1 onde de compression + 1 onde de cisaillement
 - ✓ Pertes par amortissement structural [Biot 1956]
 - ✓ Hypothèse de squelette rigide si $f > f_{dec}$ [Zwikker & Kosten, 1949]



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

- **Effets visco-thermiques**
(phase fluide)
 - ✓ 1 onde de compression
 - ✓ Pertes par frottements visqueux fluide/solide
 - ✓ Pertes par échange de chaleur fluide <-> solide



Propagation de l'onde sonore dans le matériau qui génère un différentiel de pression et met en mouvement la phase fluide.

L'air se déplace dans les pores (effets inertiels) et subit des contraintes visqueuses au contact du squelette supposé rigide (effets visqueux).

Equation du mouvement d'un fluide visqueux newtonien en petites déformations :
équation de Navier-Stokes linéarisée

$$\mu \Delta \vec{v} + (\mu + \xi) \vec{\nabla} (\operatorname{div}(\vec{v})) - \rho_0 \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} = \vec{\nabla} p$$

Viscosité de cisaillement de l'air μ Coefficient de viscosité de volume de l'air ξ

λ : sollicitation macro \gg taille des pores
 Air considéré au 1^{er} ordre comme localement incompressible [Olny 1999]

$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0$

Forces visqueuses *Forces inertielles* *Gradient de pression « sollicitation »*

Le différentiel de pression généré par l'onde au sein de la phase fluide entraîne également une modification de l'évolution thermodynamique.

Le couplage entre différentiel de pression et variation de température à l'échelle des pores est régi par l'équation de la chaleur linéarisée:

Capacité calorifique de l'air à pression constante

Conductivité thermique de l'air

$$\kappa \Delta T - \rho_0 C_p \frac{\delta T}{\delta t} = - \frac{\delta p}{\delta t}$$

Conduction thermique
Inertie thermique
Variation de pression
« sollicitation »

La vitesse macro $\langle \vec{v} \rangle$ d'écoulement dans le pore cylindrique est régie par la loi de Darcy généralisée :

$$\langle \vec{v} \rangle = - \frac{\Pi(\omega) \vec{\nabla} p}{\mu}$$

$\Pi(\omega)$ est la **perméabilité dynamique**. Cette fonction est considérée comme une **grandeur intrinsèque** car indépendante des propriétés de la phase fluide.

$$\rho(\omega) = \frac{\mu}{j\omega \Pi(\omega)}$$

$\rho(\omega)$, la **densité dynamique** est l'autre grandeur caractéristique des effets visco-inertiels.

La température macro $\langle T \rangle$ dans le pore cylindrique est régie par la loi suivante:

$$\langle T \rangle = \frac{j\omega p \Theta(\omega)}{\kappa}$$

$\Theta(\omega)$ est la **perméabilité dynamique thermique**. Cette fonction est considérée comme une **grandeur intrinsèque** car indépendante des propriétés de la phase fluide.

$$K(\omega) = \rho_0 \frac{p}{\langle \rho \rangle} \quad K(\omega) = \frac{\gamma \frac{P_0}{\phi}}{\gamma - j(\gamma - 1) \frac{\Theta}{\phi \delta_t^2}}$$

$K(\omega)$, le **module d'incompressibilité thermique**, est l'autre grandeur caractéristique des effets thermiques.

Couplage des effets visco-thermique

$$j\omega\langle\rho\rangle + \rho_0 \operatorname{div}(\langle\vec{v}\rangle) = 0$$

Equation de conservation

$$\rightarrow j\omega \frac{\phi}{\gamma P_0} \left(\gamma - j(\gamma - 1) \frac{\Theta}{\phi \delta_t^2} \right) p - \frac{\Pi}{\mu} \Delta p = 0$$



$$\rightarrow \Delta p + \omega^2 \frac{\rho}{K} p = 0$$

Equation d'onde

Célérité du milieu dissipatif:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Nombre d'onde et impédance:

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

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

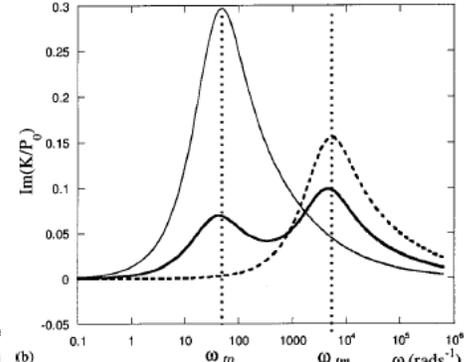
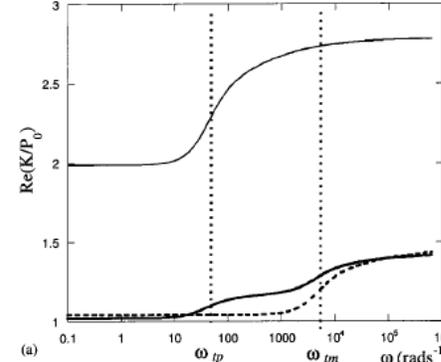
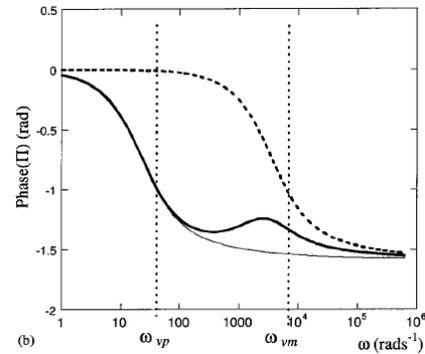
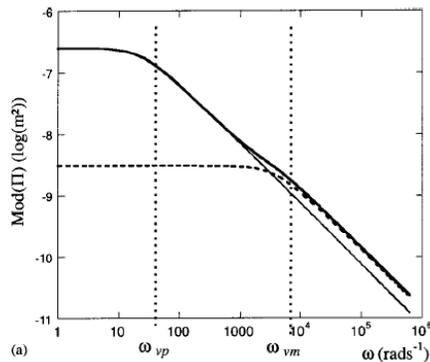
Expression générale des fréquences de transition dans un poreux

Effets visco-inertiels

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

Effets thermiques

$$\omega_t = \frac{\kappa\phi}{\Theta_0\rho_0C_p}$$



[Olny et al. 2002]

- Modèle poroélastique

- Cas général (théorie de Biot)
- Couplage ondes élastique et acoustique
- Le plus complet, mais pas toujours nécessaire

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \omega^2 \tilde{\rho}_s \underline{u} = - \tilde{\gamma} \operatorname{grad} p \\ \frac{\phi}{\omega^2 \tilde{\rho}_f} \Delta p + \frac{\phi}{\tilde{K}_f} p = \tilde{\gamma} \operatorname{div} \underline{u} \end{array} \right.$$

- Approche limp

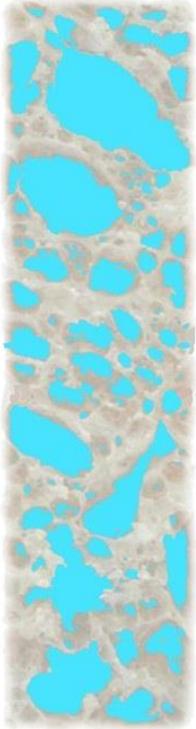
- Matériaux souples
- Faible module de cisaillement
- Exemples: Fibres en vrac ?

$$\frac{1}{\omega^2 \tilde{\rho}'_{\text{eq}}} \Delta p + \frac{1}{\tilde{K}_{\text{eq}}} p = 0 \quad \text{avec} \quad \tilde{\rho}'_{\text{eq}} \approx \frac{\tilde{\rho}_{\text{eq}} M - \rho_0^2}{M + \tilde{\rho}_{\text{eq}} - 2\rho_0}$$

- Fluide équivalent

- Cas d'une phase solide rigide
- Souvent utilisé pour des problématiques d'absorption acoustique

$$\frac{1}{\omega^2 \tilde{\rho}_{\text{eq}}} \Delta p + \frac{1}{\tilde{K}_{\text{eq}}} p = 0$$



- * Porosité
- * Résistivité
- * Tortuosité
- * Longueur visqueuse
- * Longueur thermique
- * Perméabilité thermique
- * ...

$$\phi = \frac{V_{\text{pores ouverts}}}{V_{\text{total}}}$$

$$\sigma \Phi \vec{v} = -\vec{\nabla} p$$

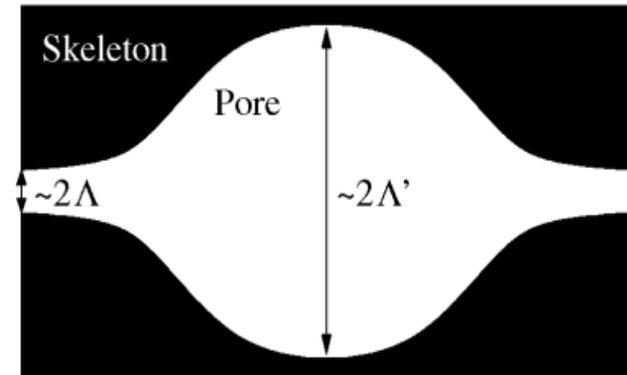
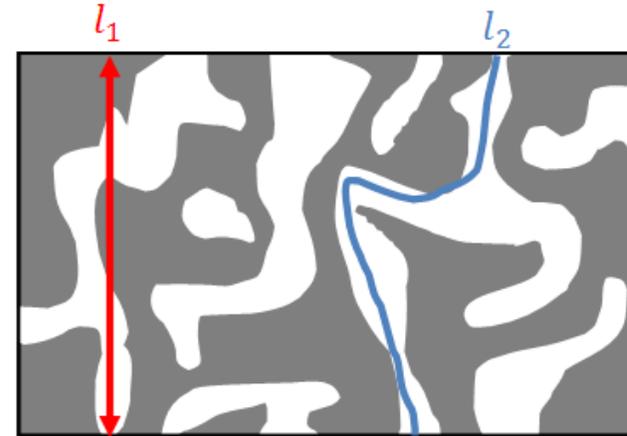
$$\alpha_{\infty} = \frac{\frac{1}{V} \int_V v^2 dV}{\left(\frac{1}{V} \int_V \vec{v} dV\right)^2} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2$$

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_{S_p} \vec{v}^2 dS_p}{\int_{V_p} \vec{v}^2 dV_p}$$

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{S_p}{\Phi}$$

$$\tau = j\omega \frac{k_0'}{\kappa} p$$

$$\alpha_0, \alpha_0', \dots$$



[apmr.matelys.com]

o La recette...

Propriétés intrinsèques / Caractéristiques de propagation (ex: JCAL)

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi} \left[1 - j \frac{\sigma \phi}{\rho_0 \alpha_\infty \omega} F_J(\omega) \right] \\ K = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 - j \frac{8\kappa}{\Theta_0 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{1 + j \frac{4\Theta_0^2 C_p \rho_0 \omega}{\kappa \phi^2 \Lambda^2}} \right)^{-1} \right]^{-1} \end{array} \right. \quad F_J(\omega) = \sqrt{1 + j \frac{4\mu \alpha_\infty^2 \rho_0 \omega}{\Lambda^2 \sigma^2 \phi^2}} \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{K}} \\ Z_c = \sqrt{\rho K} \end{array} \right.$$

Propriétés d'absorption ($\vartheta = 0^\circ$)

$$Z_s = \frac{p}{\vec{v} \cdot \vec{x}} \Big|_{x=0} = -j Z_c \cot ke$$

$$\Rightarrow \alpha = 1 - |R|^2 = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \right|^2$$

Propriétés de transmission ($\vartheta = 0^\circ$)

$$Tr = \frac{2e^{jk_0e}}{2 \cos(ke) + j \sin(ke) \left(\frac{Z_c}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_c} \right)}$$

$$\Rightarrow TL = -10 \log(\tau) = -10 \log(|Tr|^2)$$

Paramètres poro-élastiques



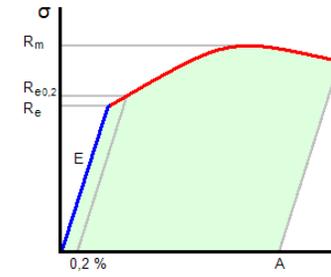
- * Masse volumique
- * Module d'Young
- * Coefficient de Poisson
- * Amortissement structural

$$\rho = \frac{m}{V_{total}}$$

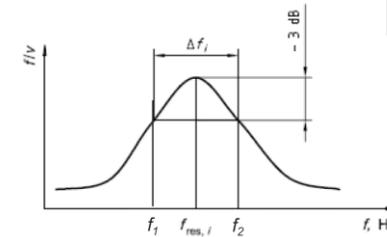
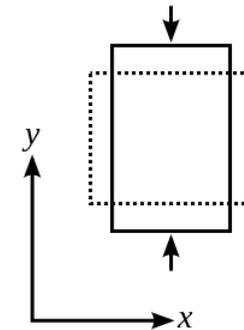
$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

$$\eta = \frac{f_{res}}{\Delta f}$$



[Wikipédia]



[EN 29052-1]

Caractérisation acoustique des constituants, des matériaux et des systèmes constructifs

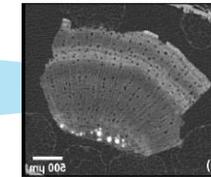
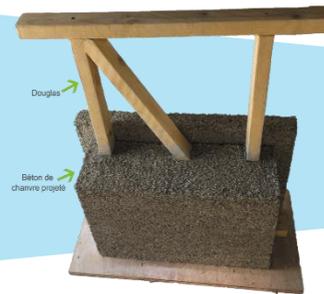
Des performances sur le terrain... ... en lien avec les matériaux

Question de départ



- Performances in situ
 - ✓ Ressenti de l'utilisateur
 - Incertitudes
 - Couplage inter-parois

Paramètres en jeu



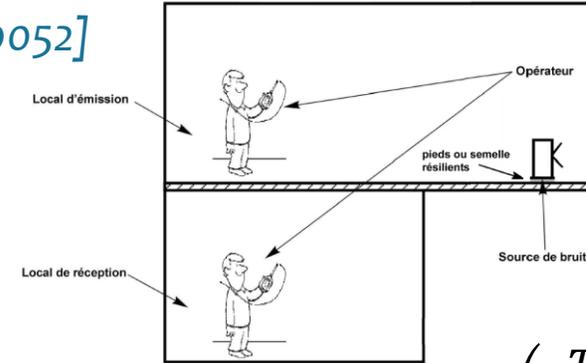
- Performances des systèmes
 - ✓ Performance 'référence'
 - Systèmes composites
 - Systèmes multicouches
 - Effet de dimension finie

- Propriétés du matériau
 - ✓ Compréhension du comportement
 - Matériau homogène

- Paramètres du matériau
 - ✓ Investigation fine
 - Paramètres acoustiques
 - Paramètres élastiques
 - (Caractéristiques microstructurales)

Isolation

- Isolement acoustique au bruit aérien [ISO 10052]
 - En façade
 - Méthode du haut parleur
 - Méthode du bruit de trafic ($DnTw < 40$ dB)
 - Entre locaux



$$DnT = L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + 10 \log \left(\frac{T}{T_{\text{réf}}} \right)$$

- Niveau de pression pondéré du bruit de choc standardisé [ISO 10052]

Absorption

- Durée de réverbération [ISO 3382-1 et 2]

Isolation

- Intensimétrie acoustique [ISO 15186-1 et 2]

Vecteur intensité acoustique :

$$\vec{I}(M) = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{i}(M, t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(M, t) \cdot \vec{v}(M, t) dt \text{ en } W/m^2$$

Sonde intensimétrique : $p(M, t) = \frac{p_A(t) + p_B(t)}{2}$.

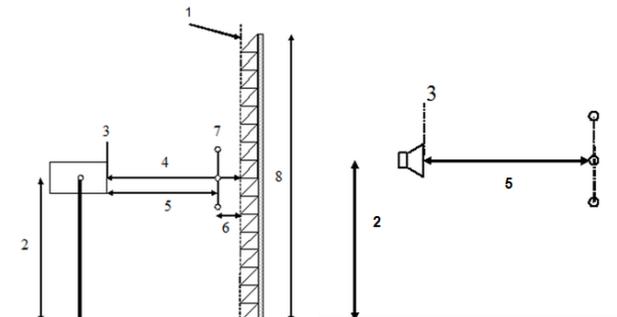
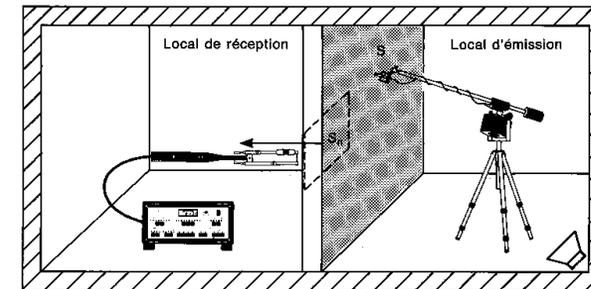
$$v(M, t) = \frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{p_A(\tau) - p_B(\tau)}{\Delta r} d\tau.$$

Application :

$$R'_I = L_{p1} - 6 - \left(\bar{L}_{I_n} + 10 \log \left(\frac{S_M}{S} \right) \right) \text{ en dB,}$$

Absorption

- Absorption acoustique
 - Méthodes Adrienne [EN 1793-5], [EN 13472-1]
 - Méthode locale [EN 13472-2]

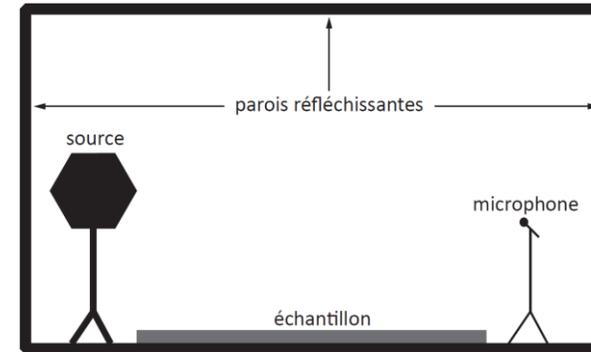


- Mesures en salles réverbérantes (champ diffus)

Absorption

Absorption acoustique:

$$\alpha_s = \frac{A_2 - A_1}{S} = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_{R2}} - \frac{1}{c_1 T_{R1}} \right) - 4V(m_2 - m_1)$$

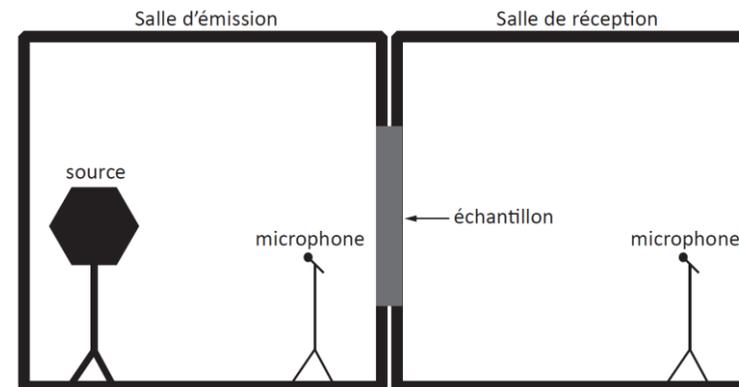


[NF EN ISO 354]

Isolation

Indice d'affaiblissement acoustique:

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right)$$



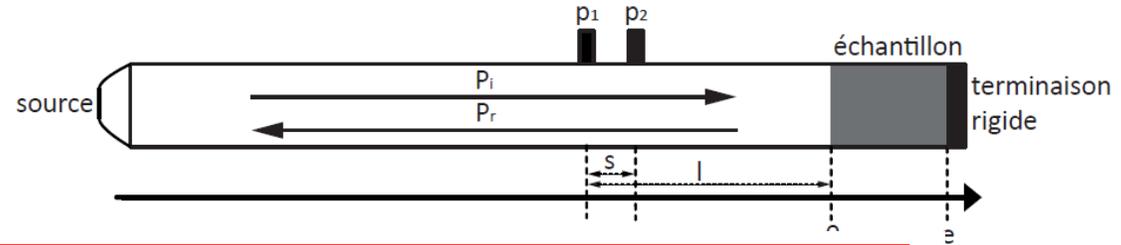
[NF EN ISO 10140-1 à 5]

○ Tube de Kundt (Incidence normale)

Absorption, impédance de surface [ISO 10534-2]

Absorption

$$\begin{cases} p_1 = p_0 e^{j(\omega t + k_0 l)} + R p_0 e^{j(\omega t - k_0(l-s))} \\ p_2 = p_0 e^{j(\omega t + k_0(l-s))} + R p_0 e^{j(\omega t - k_0 l)} \end{cases}$$



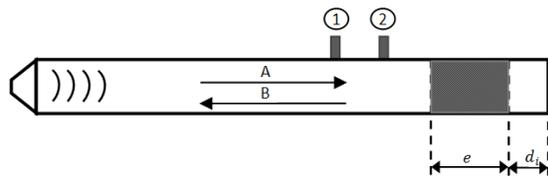
$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1}$$



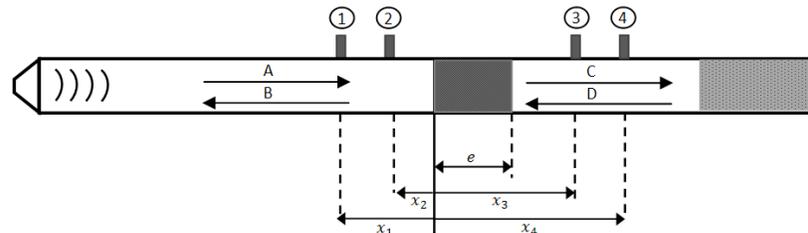
$$R = \frac{H_{12} - e^{-jk_0 s}}{e^{jk_0 s} - H_{12}} e^{2jk_0 l} \quad Z_s = \frac{P}{\vec{v} \cdot \vec{n}} = Z_0 \frac{1 + R}{1 - R} \quad \alpha = 1 - |R|^2$$

Caractéristiques de propagation + indice d'affaiblissement

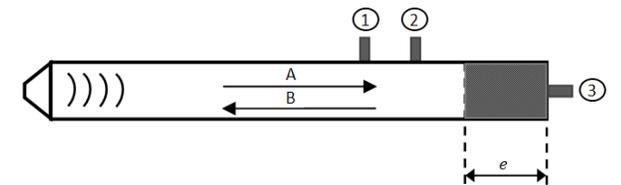
Isolation



[Utsuno et al., 1989]



[Song et al., 2000]

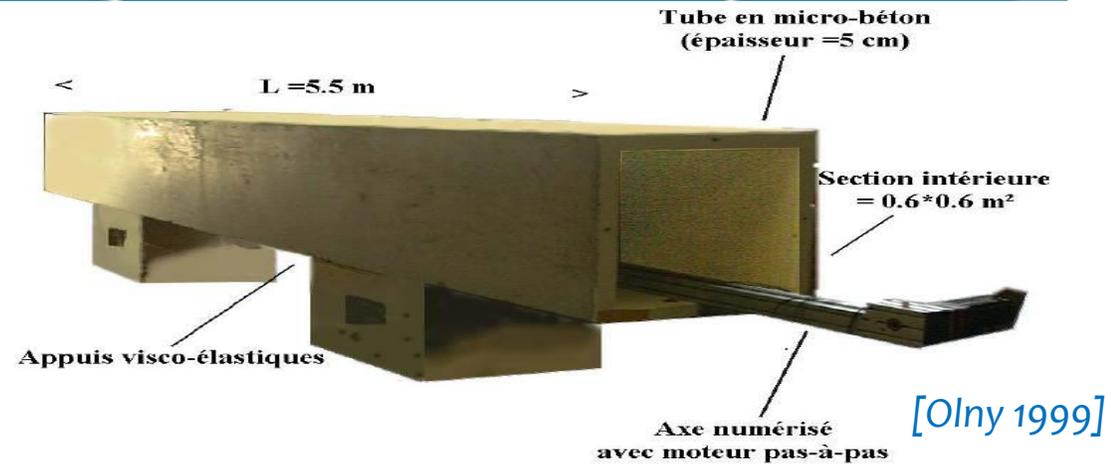


[Iwase et al., 98]

○ Tube de Kundt (Incidence normale) [ISO 10534-2]

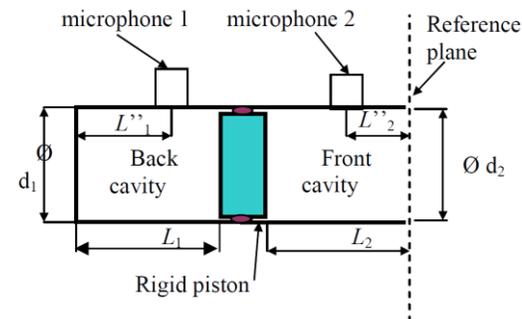
Caractérisation à des fréquences allant de 30 Hz (Megatube de Kundt – 60cm x 60cm) à 10000 Hz (Petit tube – ø 2cm)

- $f_{min} = \frac{0,05 \cdot c_0}{s}$
- $f_{max} = \frac{0,59 \cdot c_0}{\Phi}$ (tube circulaire)
- $f_{max} = \frac{0,50 \cdot c_0}{d}$ (tube carré)



○ Capteur d'impédance (alternative)

$$\frac{p_2}{p_1} = -jC \omega Z_{sensor} \quad (\text{Mesures à partir de 10 Hz})$$



[Le Roux, 2012]

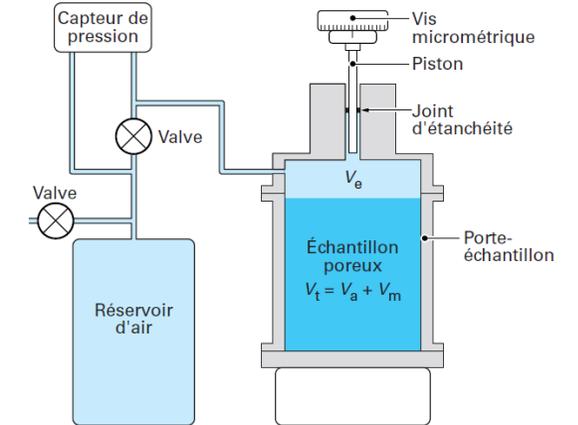
- Porosité ouverte [Beranek 1942, Champoux et al., 1991]

$$V_{squelette} = V_0 - \Delta V \frac{\Delta P + P_0}{\Delta P}$$

$$\Phi_{ouverte} = \frac{V_{total} - V_{squelette}}{V_{total}}$$

- Autres approches

- Pycnométrie: He/He (poudre)/N₂
 - He → 0,26 nm
 - N₂ → 0,36 nm
- Intrusion de mercure
 - Hg (414 MPa) → 3,6 nm
- Tomo-X
 - ⚠ : Limites résolution



V_t volume total de l'échantillon
 V_a volume des pores interconnectés ou volume d'air dans l'échantillon
 V_m volume occupé par la structure solide de l'échantillon
 V_e volume extérieur à l'échantillon occupé par l'air dans la cavité fermée

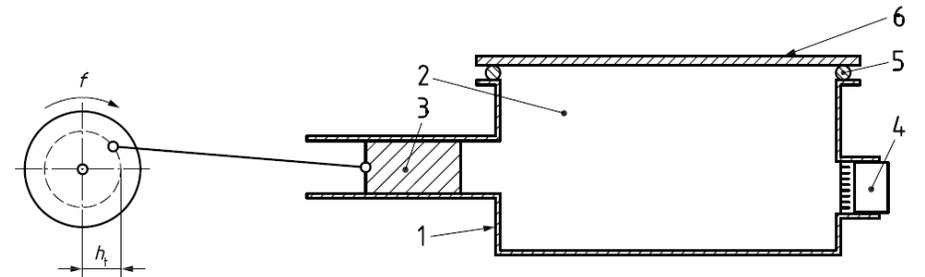
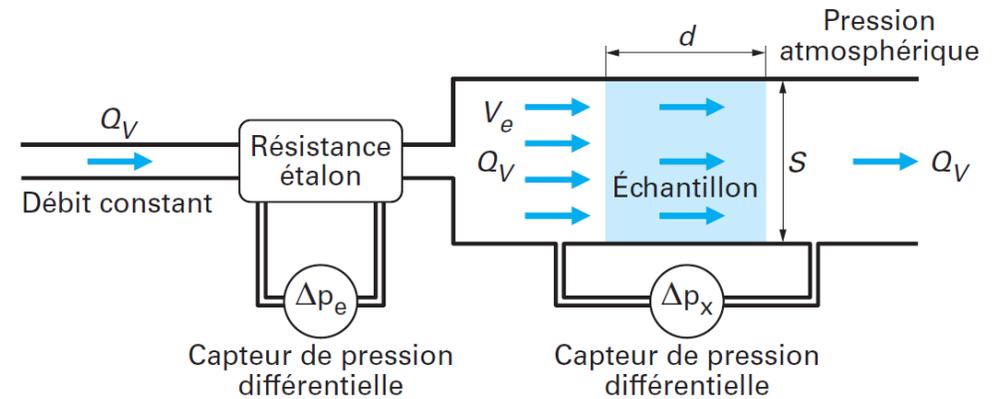


○ Résistance statique à l'écoulement de l'air [ISO 9053]

■ *Écoulement statique*

$$\sigma = \frac{S \cdot \Delta P}{Q \cdot e}$$

■ *Écoulement alternatif*

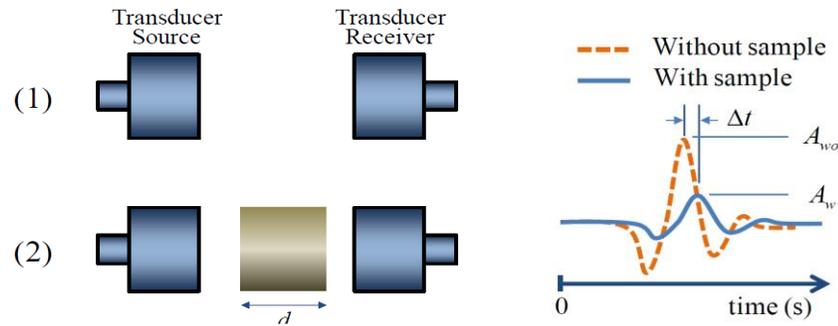


Légende

- | | |
|-------------|-----------------------|
| 1 récipient | 2 cavité d'air |
| 3 piston | 4 microphone |
| 5 joint | 6 terminaison étanche |

○ Tortuosité [Allard 1994, Fellah et al. 2003, Panneton 2013]

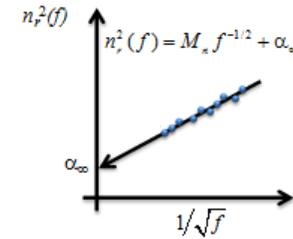
▪ Méthode en transmission (faibles tortuosité et/ou résistivité)



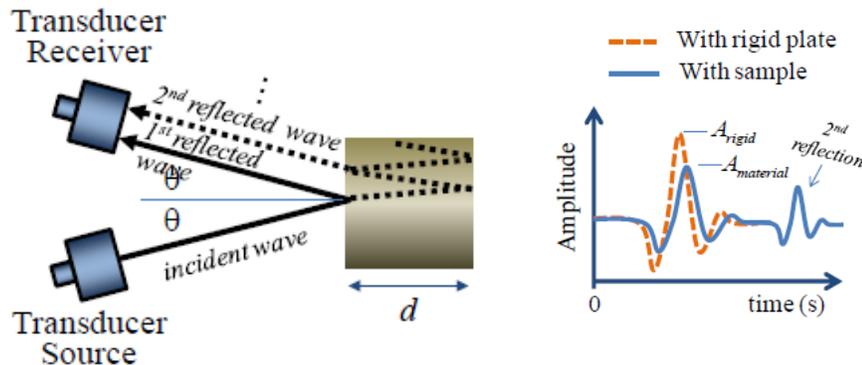
$$n_r(\omega) = \frac{c_0}{c(\omega)} = 1 + c_0 \frac{\Delta t(\omega)}{d}$$

$$n_r^2(\omega) = \alpha_\infty \left[1 + \delta \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{\gamma - 1}{B\Lambda'} \right) \right]$$

$$= \alpha_\infty + \frac{M_n}{\sqrt{f}} \xrightarrow{f \rightarrow \infty} \alpha_\infty$$



▪ Méthode en réflexion (fortes tortuosité et/ou résistivité) -> Si porosité connue



$$r(t, \theta) = \frac{A_m(t, \theta)}{A_r(t, \theta)} \quad z = \frac{1+r}{1-r} \frac{\phi}{\cos \theta}$$

$$\alpha_\infty = \frac{z^2}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{z} \sin \theta \right)^2} \right)$$

- Caractérisations indirectes [Panneton & Oly 2006, Oly & Panneton 2007]

Relations analytiques directes entre propriétés acoustiques et paramètres

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

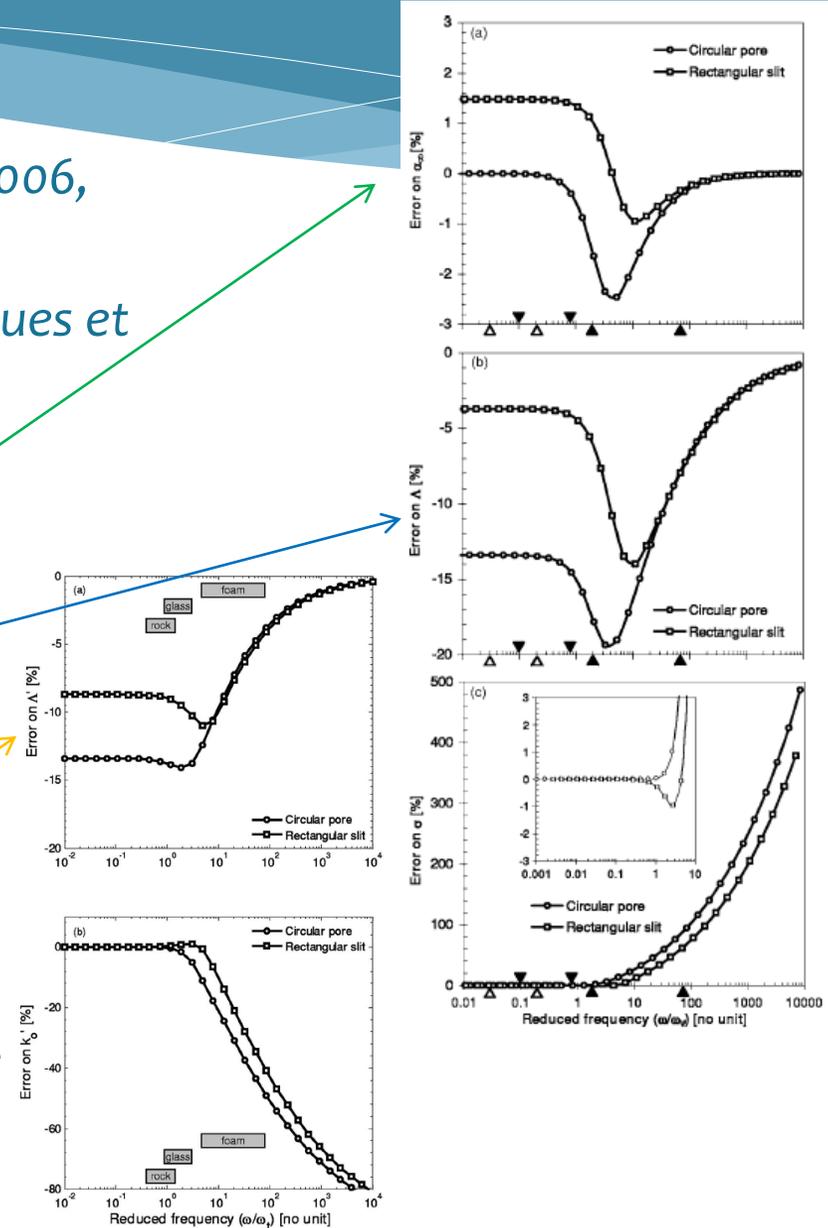
$$\alpha_{\infty} = \frac{\phi}{\rho_0} \left(\text{Re}(\tilde{\rho}_{eq}) - \sqrt{(\text{Im}(\tilde{\rho}_{eq}))^2 - \frac{\sigma^2}{\omega^2}} \right)$$

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

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

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

$$k_0' = \frac{\phi \kappa}{C_p \rho_0 \omega} / \sqrt{-\text{Re} \left(\left(\frac{\gamma P_0 - \phi \tilde{K}_{eq}}{\gamma P_0 - \gamma \phi \tilde{K}_{eq}} \right)^2 \right)}$$



○ Caractérisations indirectes [Jaouen et al. 2020]

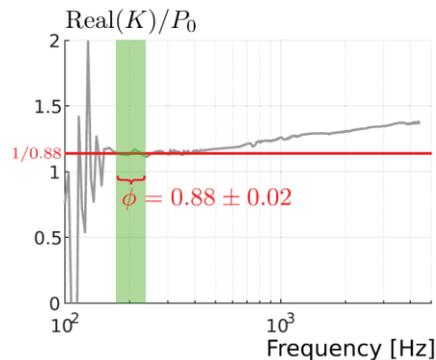
Relations asymptotiques entre propriétés acoustiques et paramètres Δ : La gamme de fréquence doit être suffisamment éloignée des fréquences de transition f_v et/ou f_t

Porosité

$$\phi = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P_0}{\Re(K)}$$

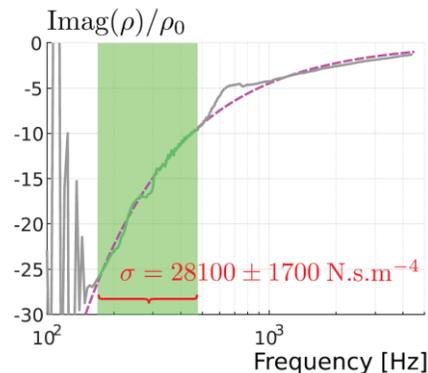
$$\phi = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P_0}{e\omega \Im(Z_s)}$$

$$\phi = \lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{\gamma P_0}{\Re(K)}$$



Résistivité

$$\sigma = \lim_{\omega \rightarrow 0} -\omega \Im(\rho)$$

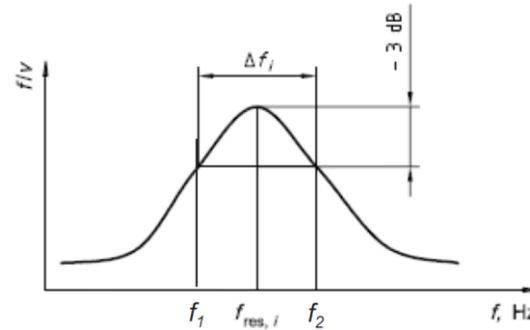
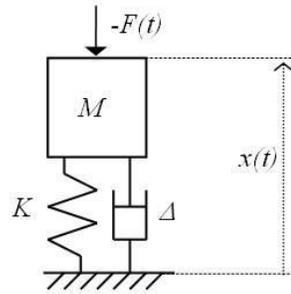


Tortuosité

$$\lim_{\omega \rightarrow +\infty} \frac{\Re(Z_c)}{Z_0} = \frac{\sqrt{\alpha_\infty}}{\phi}$$

- Paramètres élastiques

- Mesure de la raideur dynamique [EN 29052-1] -> Matériaux souples



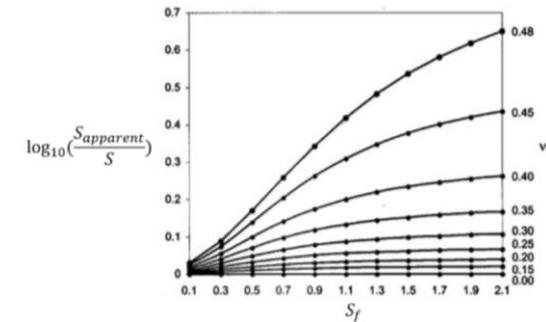
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}}$$

$$E = s'_t \times e$$

$$\eta = \frac{f_{res}}{\Delta f}$$

- Analyse mécanique quasistatique [Langlois et al. 2001]

$$S_f = \frac{D}{4e} \quad E_{apparent} = \frac{4eS_{apparent}}{D^2\pi}$$



- Mesure du module d'élasticité dynamique longitudinale [EN 14146] -> Matériaux rigides

- Compression sous presse (simple, cyclique)

○ Théorie des résonnances mécaniques en acoustique
[Allard & Atalla 2009]

■ Fréquence de respiration:

- Systèmes en 'sandwich'

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{eM_{eq}}} \quad \text{avec} \quad M_{eq} = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}$$

■ Fréquence critique:

- Coïncidence flexion / acoustique

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_v e}{D}} \quad \text{avec} \quad D = \frac{Ee^3}{12(1 - \nu^2)}$$

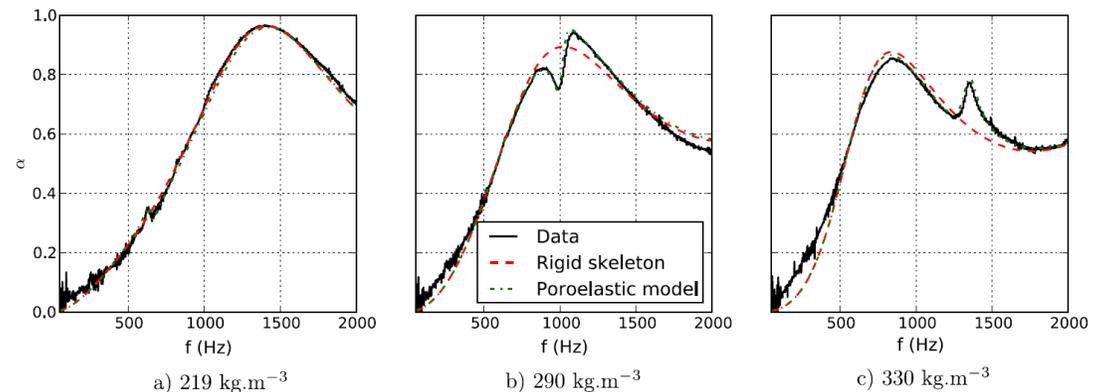
■ Fréquence ¼ (et ½) onde :

- Compression du solide

$$f_r = \frac{1}{4e} \sqrt{\frac{\Re(K_c)}{\rho_v}} \quad \text{avec} \quad K_c = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

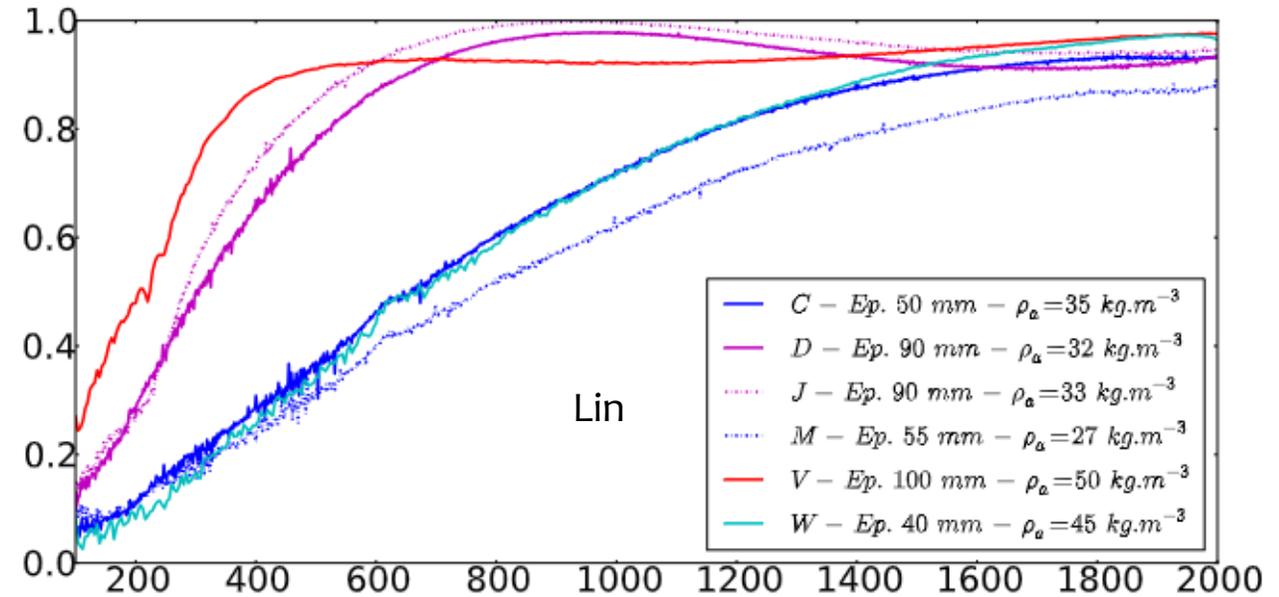
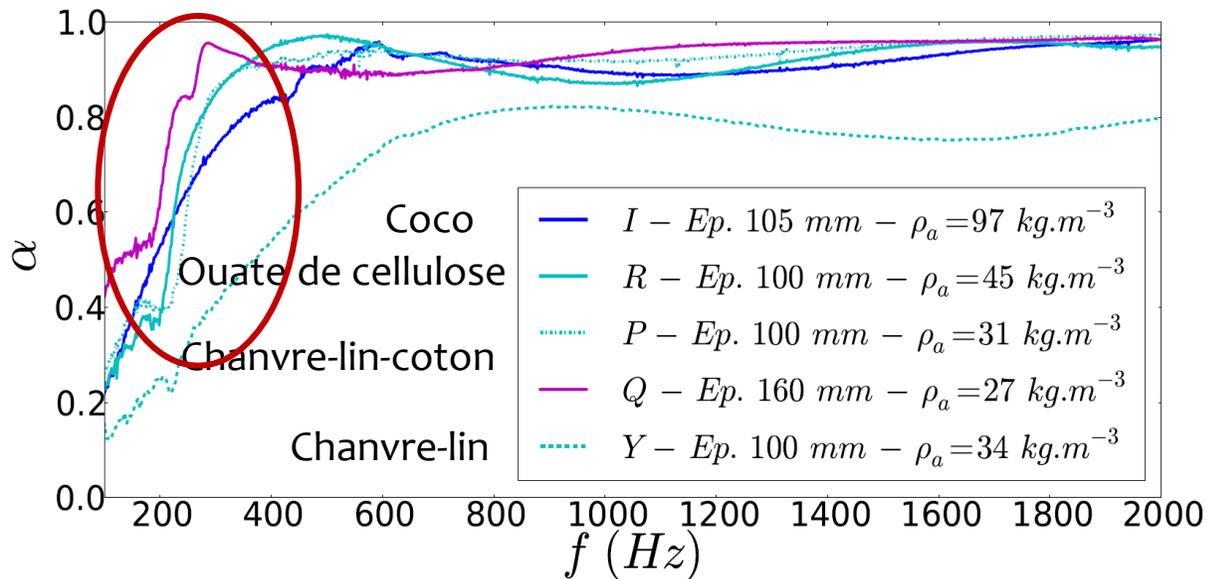
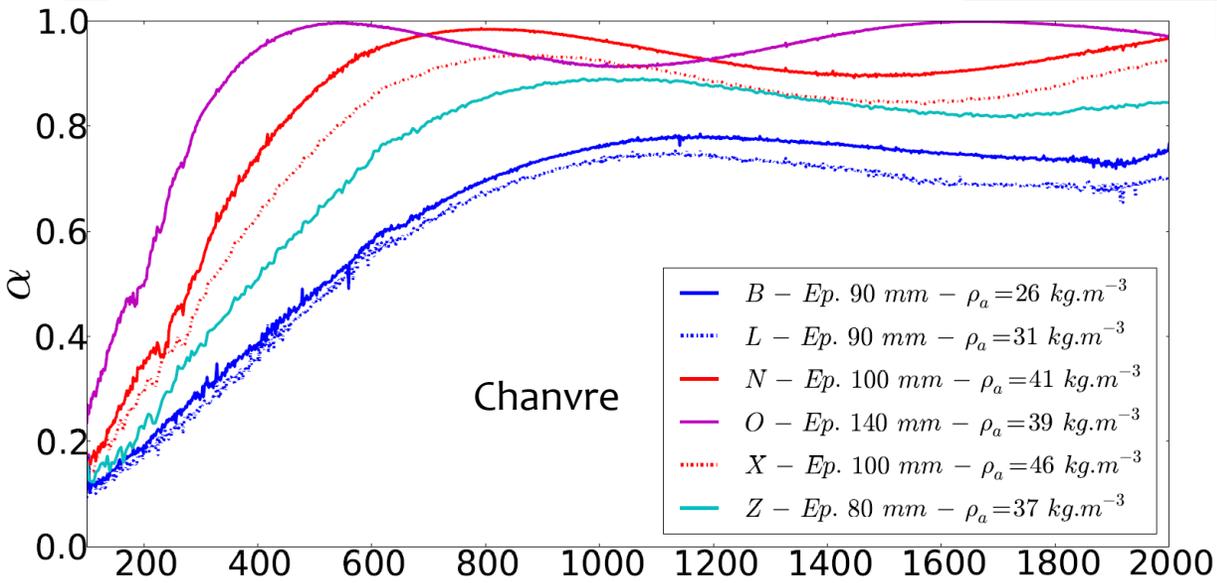
○ En pratique

- Estimation du module d'Young par mesure d'abs.

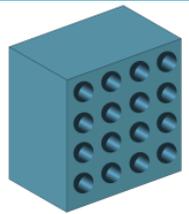


Comportement et spécificités des biosourcés fibreux

Un large panel de performances en absorption acoustique



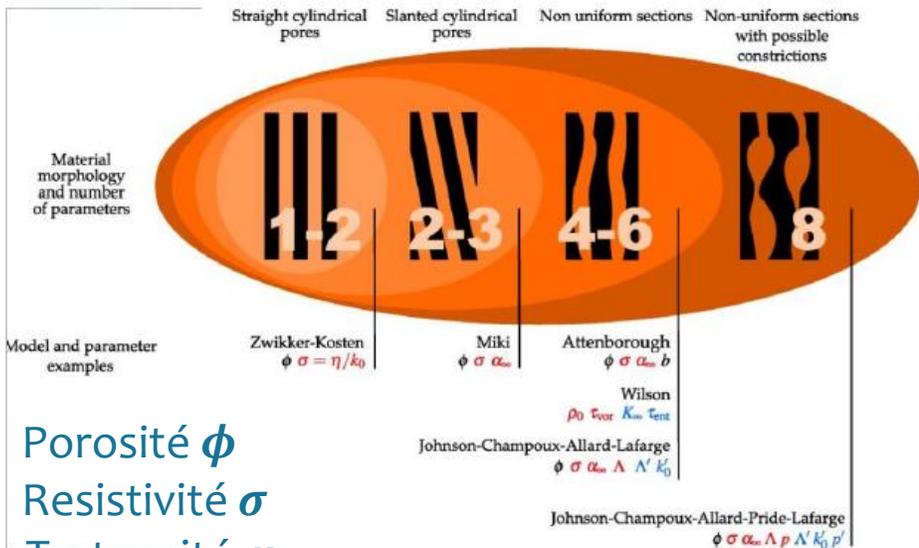
- Large panel d'absorption pour $40 \leq e \leq 160 \text{ mm}$ et $26 \leq \rho_a \leq 97 \text{ kg.m}^{-3}$
- Bon niveau de performances en absorption pour moyennes et hautes fréquences
- Apparition possible de phénomènes de résonances élastiques lorsque e augmente



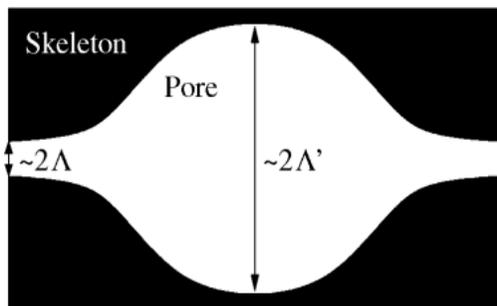
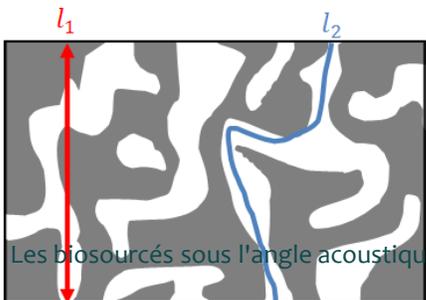
2 approches de modélisation des milieux fibreux

Géométrie des pores

[apmr.matelys.com]



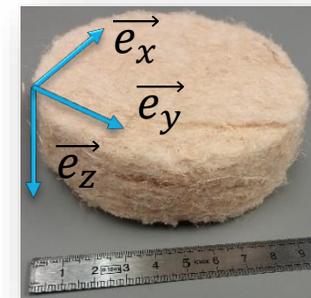
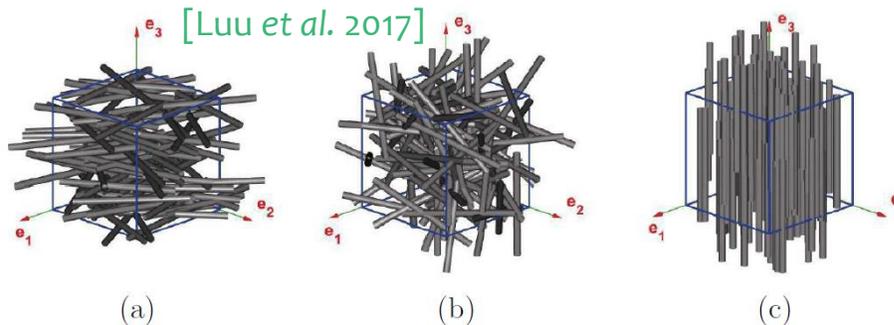
- Porosité ϕ
- Resistivité σ
- Tortuosité α_∞
- Longueur caractéristique visqueuse Λ
- Longueur caractéristique thermique Λ'
- Perméabilité thermique statique k'_0



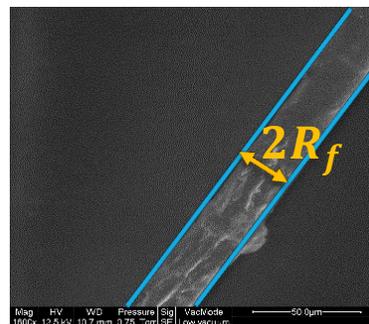
Les biosourcés sous l'angle acoustique

Géométrie de la microstructure

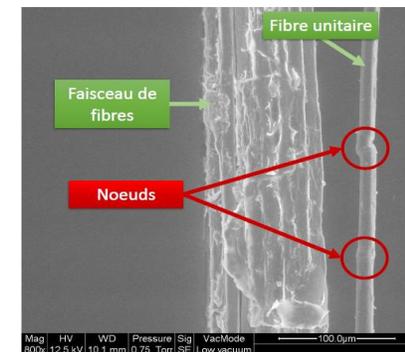
- Orientation des fibres : caractère anisotrope des laines



- Morphologies et dimensions : variabilités des fibres végétales



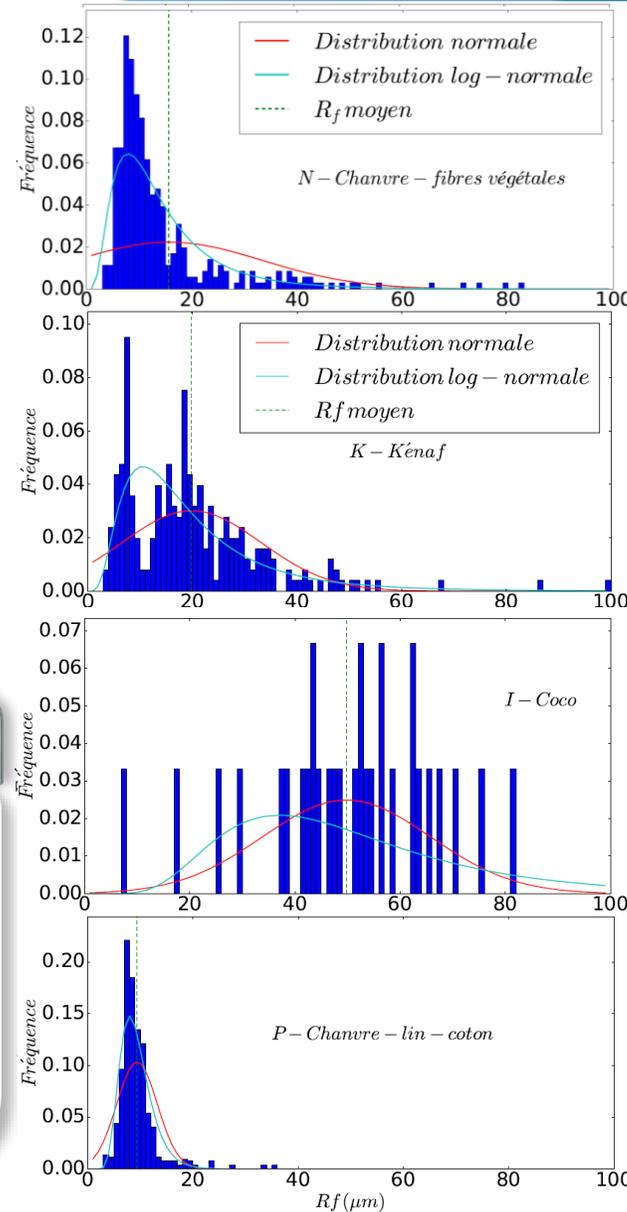
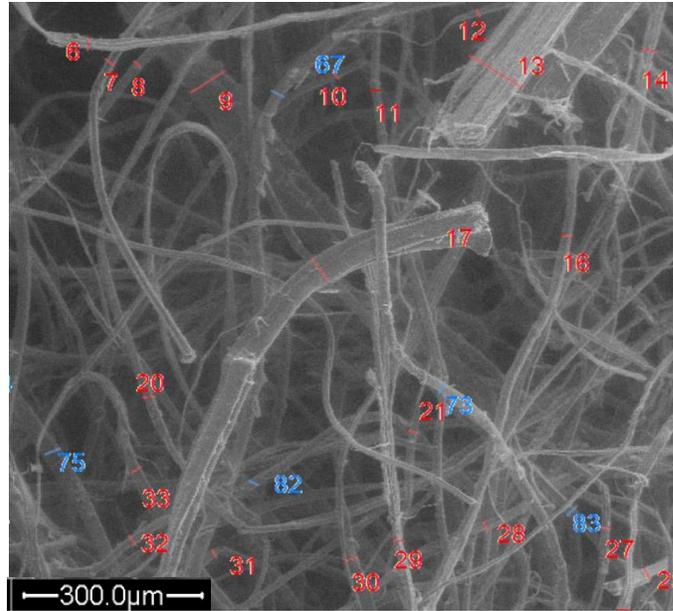
[Charlet et al. 2010]



Méthodes de modélisation micro-macro

- HPM, SCM, etc.

Distribution des rayons de fibres



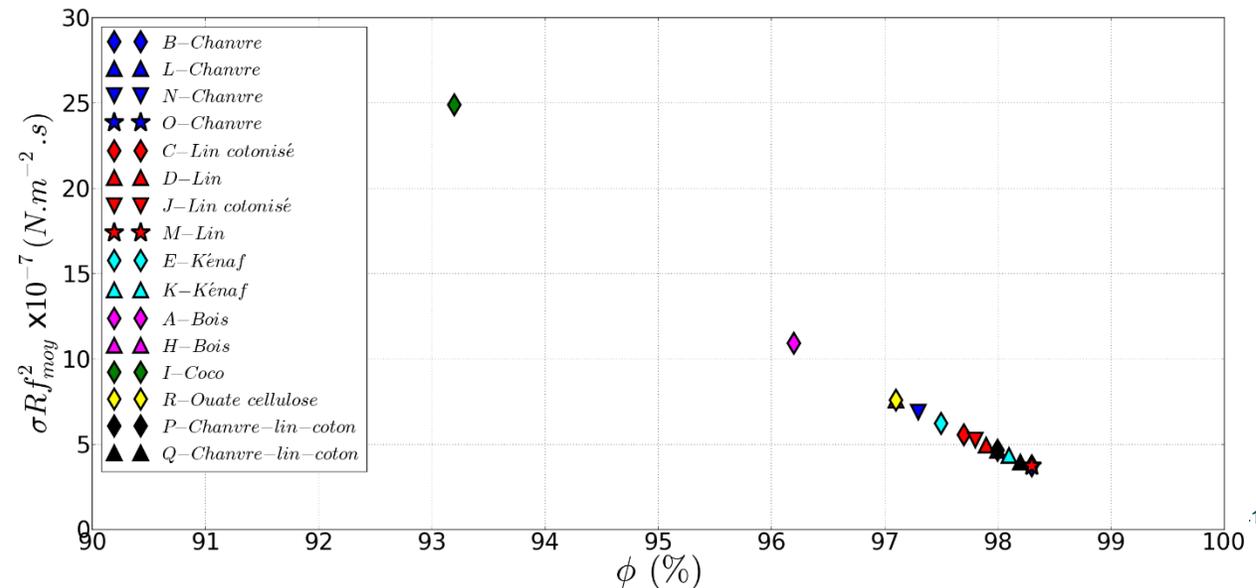
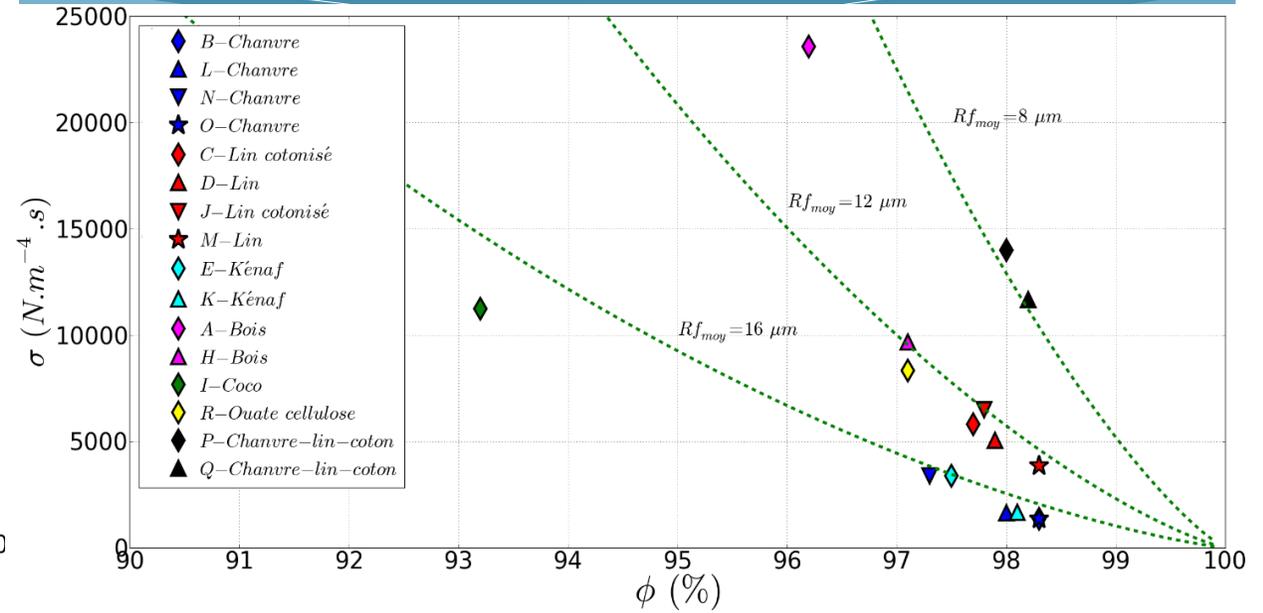
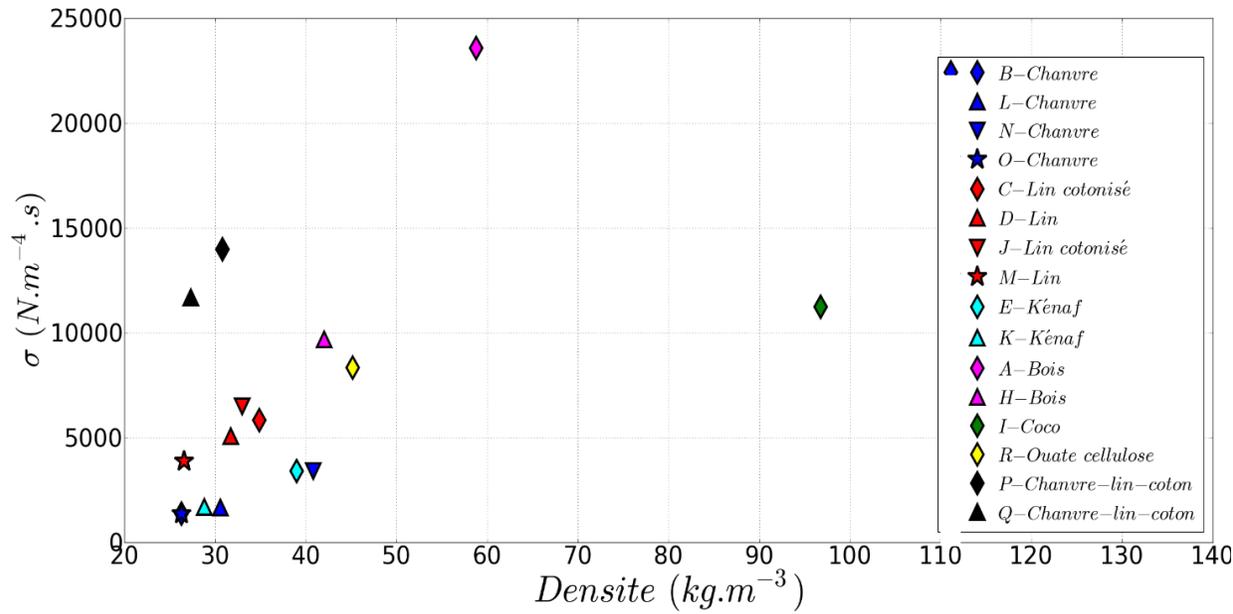
Type de laine	Réf.	$R_{f\text{ pol}}$ (μm)	$R_{f\text{ veg}}$ (μm)	$R_{f\text{ moy}}$ (μm)	$\sigma_{\text{ moy}}$ (μm)
Chanvre	N	10.75	15.60	14.28	1.74
Kénaif	K	12.86	19.84	16.88	1.68
Coco	I	11.52	49.79	15.63	1.61
Chanvre-lin-coton	P	10.89	9.38	9.49	1.37

Hypothèses

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

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

Liens entre paramètres



- Corrélation entre résistance au passage à l'air et masse volumique et donc porosité
- Relation entre la porosité, la résistance au passage à l'air et le rayon de fibres

○ Matériaux fibreux

[Mechel 1976] $R_f \in [3;5] \mu m$

$$\sigma = 10,56\mu \frac{(1-\phi)^{1,531}}{R_f^2 \phi^3}$$

[Mechel 1976] $R_f \in [10;15] \mu m$

$$\sigma = 6,8\mu \frac{(1-\phi)^{1,296}}{R_f^2 \phi^3}$$

[Bies & Hansen 1980]

$$\sigma = 7,25\mu \frac{(1-\phi)^{1,53}}{R_f^2}$$

[Garai & Pompoli 2005] $R_f \in 10-25 \mu m$

$$\sigma = 9,55\mu \frac{(1-\phi)^{1,404}}{R_f^2}$$

[Tarnow 1996a] // (idéal)

$$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [\ln(1/(1-\phi)) - 1,500 + 2(1-\phi)]}$$

[Tarnow 1996a] // (aléatoire)

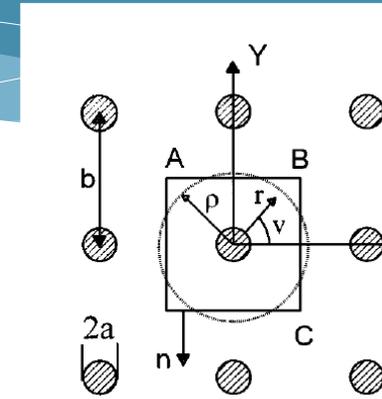
$$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [1,280 \ln(1/(1-\phi)) - 1,474 + 2(1-\phi)]}$$

[Tarnow 1996a] \perp (idéal)

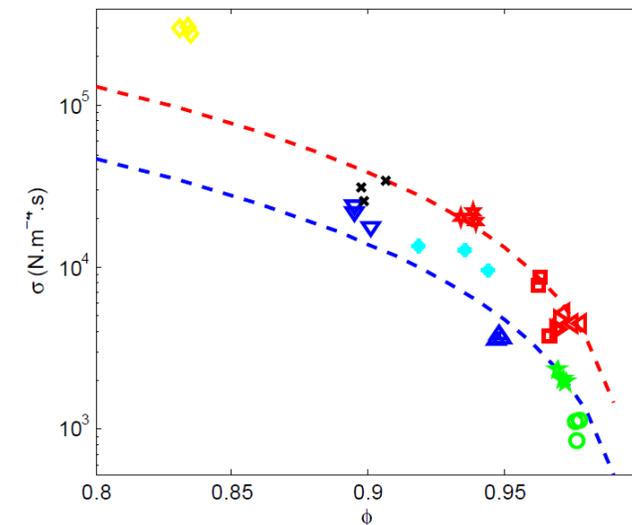
$$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [\ln((1-\phi)^{-1/2}) - 0,750 + (1-\phi) - 0,250(1-\phi)^2]}$$

[Tarnow 1996a] \perp (aléatoire)

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

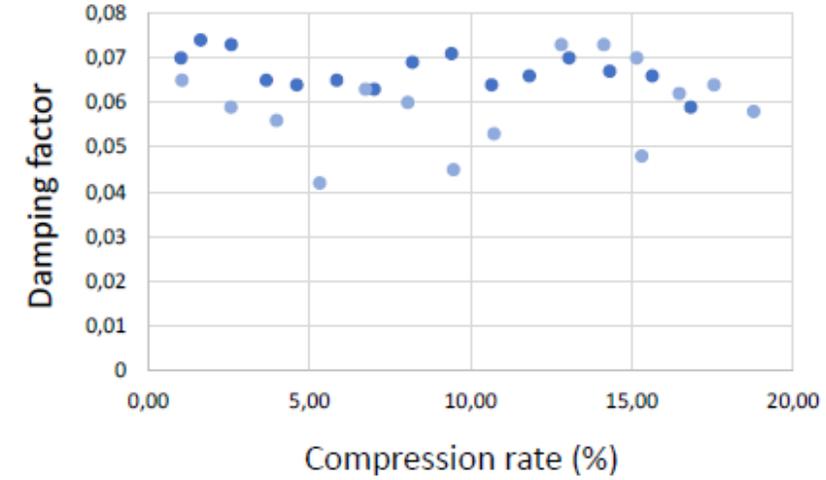
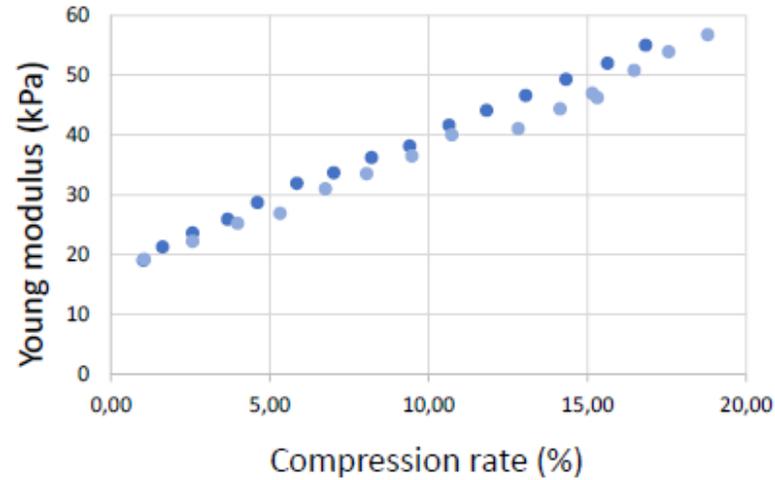
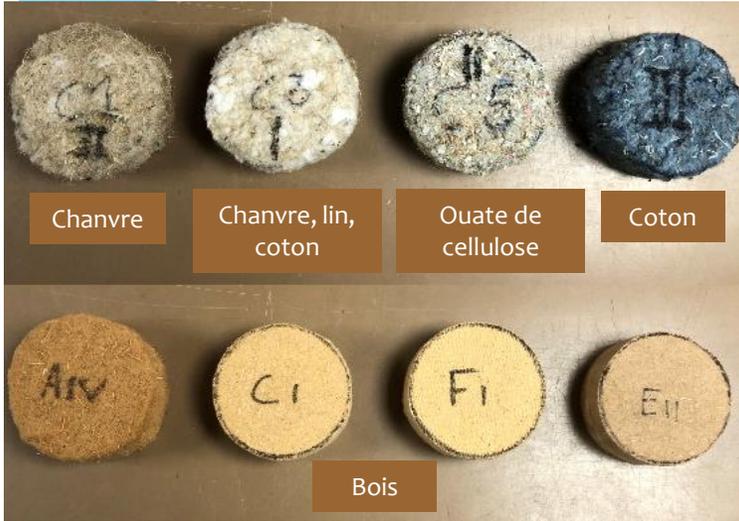


[Tarnow 1996]



[Glé 2013]

Paramètres mécaniques des laines végétales



Density range ($kg.m^{-3}$)	Material family	Young's modulus range (kPa)	Damping factor range (%)
29 - 275	Vegetal wools	15.6 - 3326.0	5.0 - 9.4

Material	Density ($kg.m^{-3}$)	E (kPa)
Hemp	43	15.6 ± 2.1
Hemp, cotton, flax	33	28.9 ± 3.8

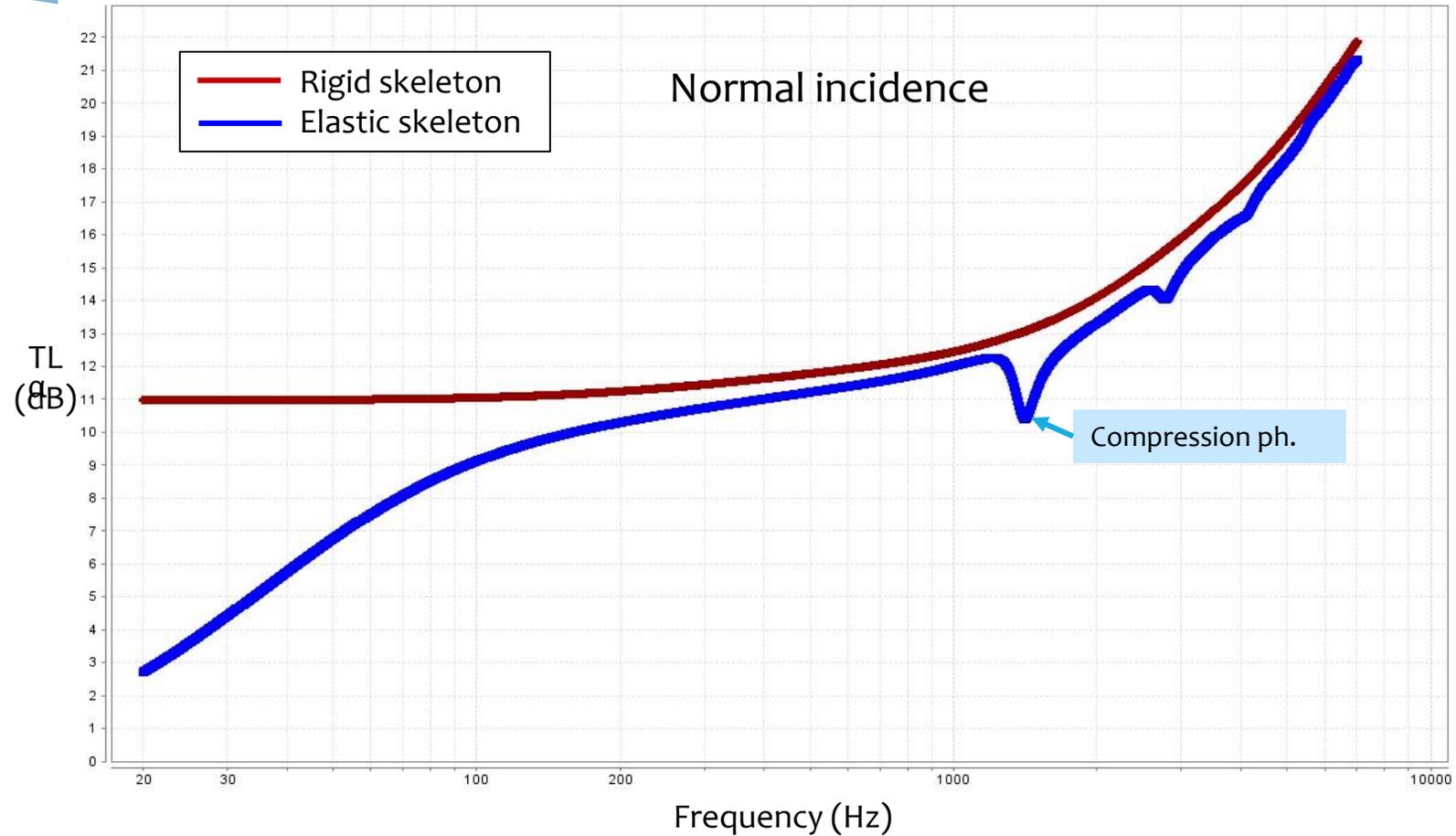
- Comportement spécifique aux matériaux fibreux : augmentation du module d'Young avec le taux de compression
- Les valeurs de modules d'Young dépendent de la nature des laines végétales
- Amortissement structural indépendant du taux de compression et de la masse volumique



[Johnson et al. 1987]

[Champoux & Allard 1991]

Poro-elastic parameter	Parameter value
Density ρ_a ($kg.m^{-3}$)	120
Porosity ϕ (%)	92
Resistivity σ ($N.m^{-4}.s$)	52 272
Tortuosity α_∞	1.16
Viscous characteristic length Λ (μm)	26.2
Thermal characteristic length Λ' (μm)	247
Young's modulus E (kPa)	1 477
Damping factor η (%)	6.8
Poisson's ratio μ (%)	0

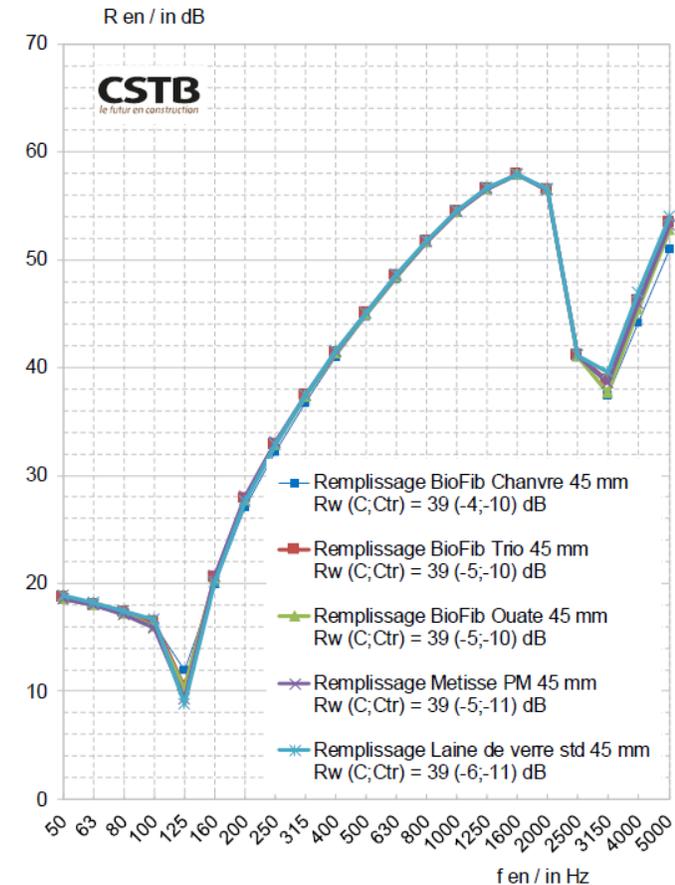


- Pour des matériaux très résistifs, les propriétés élastiques peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés acoustiques

- Conclusion de l'étude [CSTB-Cerema, 2018]:

Des performances acoustiques équivalentes entre systèmes avec laines minérales standards ou avec matériaux biosourcés (⚠: mise en œuvre !)

- Cloisons
 - Doublages sur ossature (sans contact avec mur support)
 - Plafonds suspendus sur ossature sous plancher béton de 140mm (sans contact avec plancher)
 - Combles perdus et toitures (hors cas des matériaux en vrac)
- Mais de nombreuses questions encore en suspens



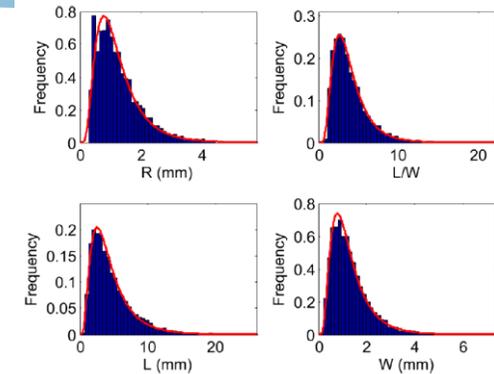
Comportement et spécificités des biosourcés granulaires

Un comportement acoustique spécifique?

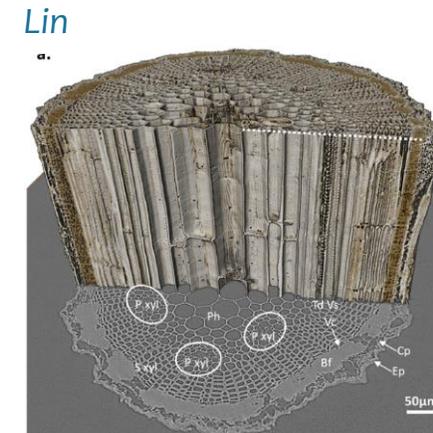
Spécificités des granulaires biosourcés?

- Anisotropie
 - Distribution dimensionnelle polydisperse
 - Hygroscopicité -> [Venegas et al. 2024]
 - Porosité multiéchelle
 - Porosité interparticule
 - Porosité additionnelle (possible) intraparticule
- Pas uniquement propre aux biosourcés*
- Quelle(s) échelle(s) particule(nt) en acoustique ?
 - Porosité partiellement ou totalement ouverte/connectée ?
 - Contraste de perméabilité (double porosité) ?

Comment peut-on caractériser cette porosité spécifique et modéliser les comportements acoustiques associés ?

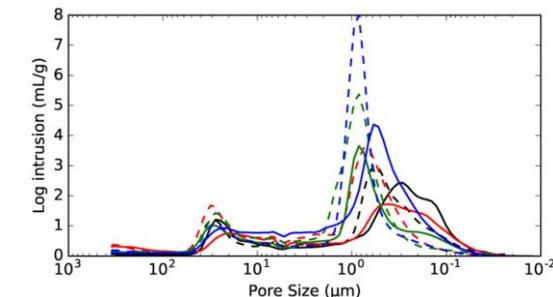


[Glé et al. 2013]



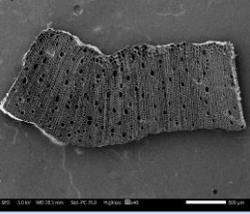
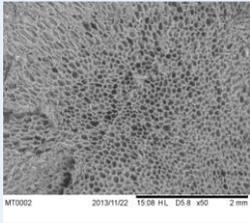
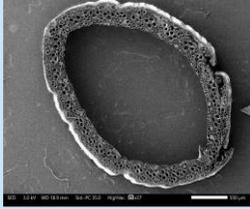
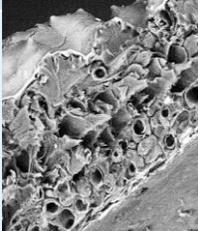
[Nuez et al. 2022]

Chanvre



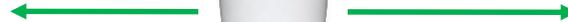
[Glé et al. 2021]

Quelques exemples caractéristiques

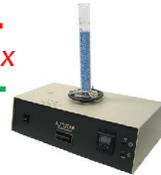
Matériau	Photo	Forme des particules	Porosité intraparticule
Chènevotte		Parallélepipède	Forte (80%) Tubulaire <i>[Honoré, 2020]</i> 
Moëlle de tournesol		~ Sphérique	Très forte (95%) Cellulaire <i>[Lenormand, 2014]</i> 
Roseau		Tubulaire	Intermédiaire (70%) Tubulaire <i>[Honoré, 2020]</i> 
Balle de riz		Ellipsoïdale	Faible (35%) Paroi refermant une grande cavité <i>[Chabannes, 2015]</i> 

Echelle empilement

- Densité arasée
- Densité apparente
- Densité tappée
- Densité compactée



Représentativité max



Echelle particule

- Pycnometrie solide
- Intrusion de mercure
- Tomographie RX



[Glé et al. 2021]

Echelle cellulaire

- Pycnometrie He (poudre)
- Pycnometrie He
- Pycnometrie N₂
- Intrusion de mercure



N₂ → 0,36 nm

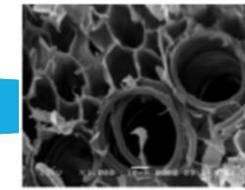
He → 0,26 nm

Résolution max

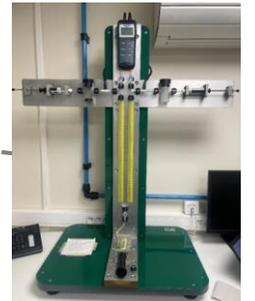
Hg (414 MPa) → 3,6 nm



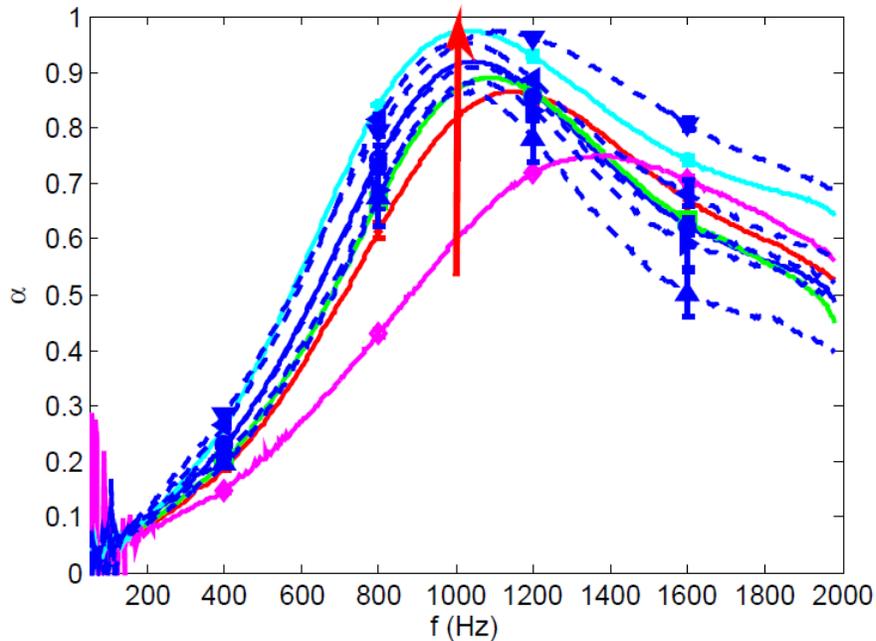
Effets bouteille d'encre



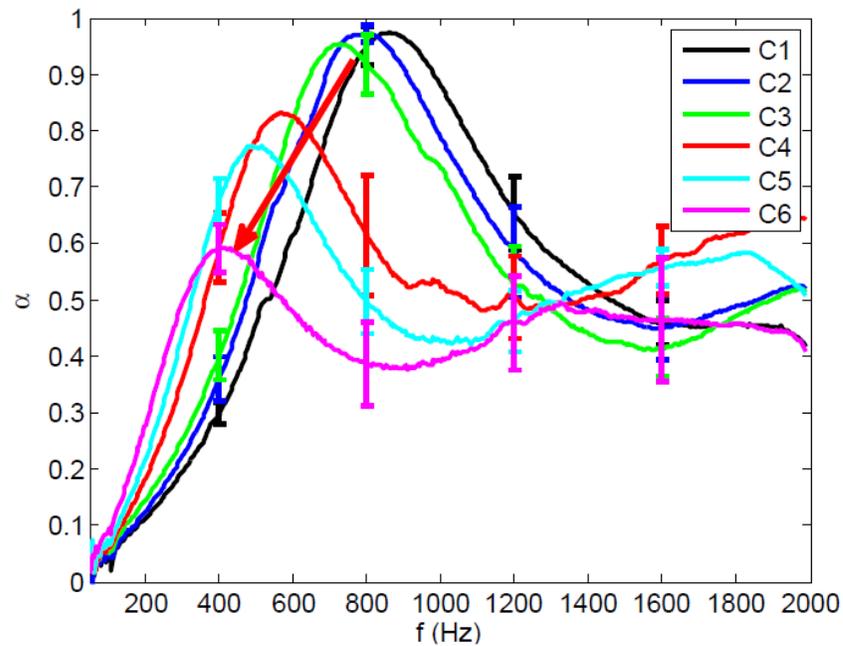
- Mesures au tube de Kundt
 - Méthode des 3 microphones sans cavité [Iwase et al 1998, Doutres et al 2012]
 - Tube fixé verticalement
- Résistivité
 - ISO 9053-1 + estim. BF
- Porosité ouverte
 - Comparaison des volumes d'air [Leclaire et al 2003]
- Porosité interparticule
 - Pycnometrie solide [Ratsimbazafy 2022]
- Caractérisation indirecte
 - Méthode analytique [Olny and Panneton 2006-2007]



- Plusieurs paramètres dimensionnant au premier ordre
 - Choix des constituants

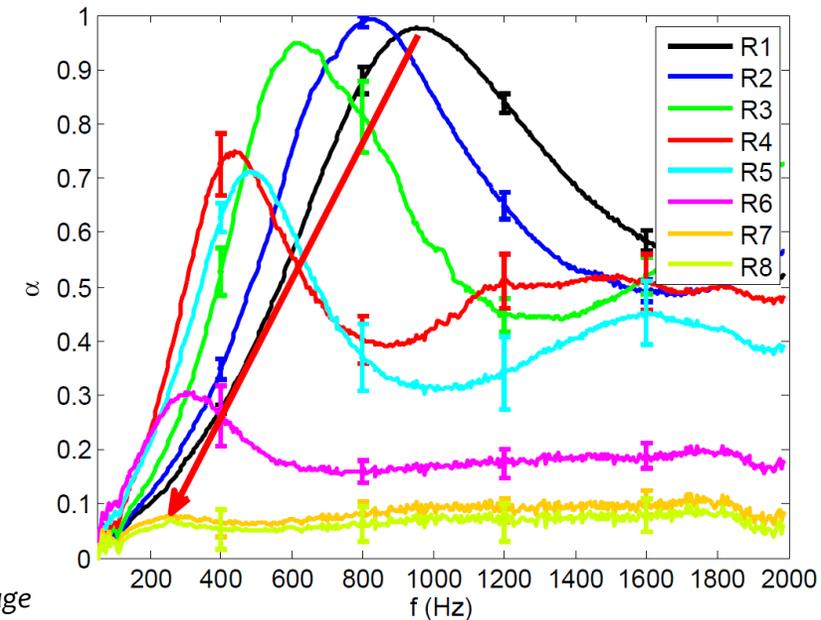


- Compactage

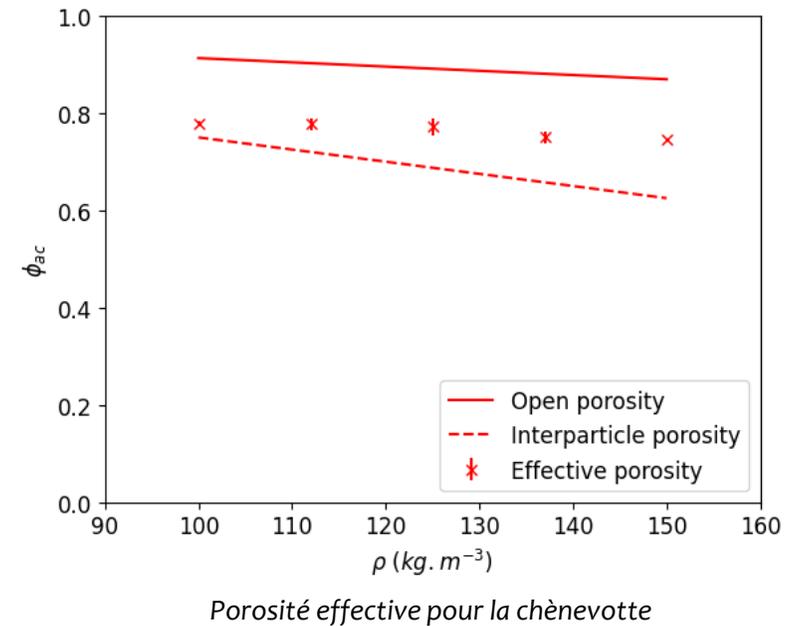
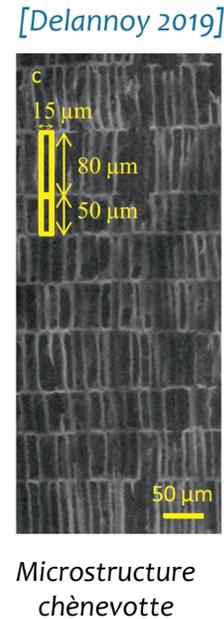
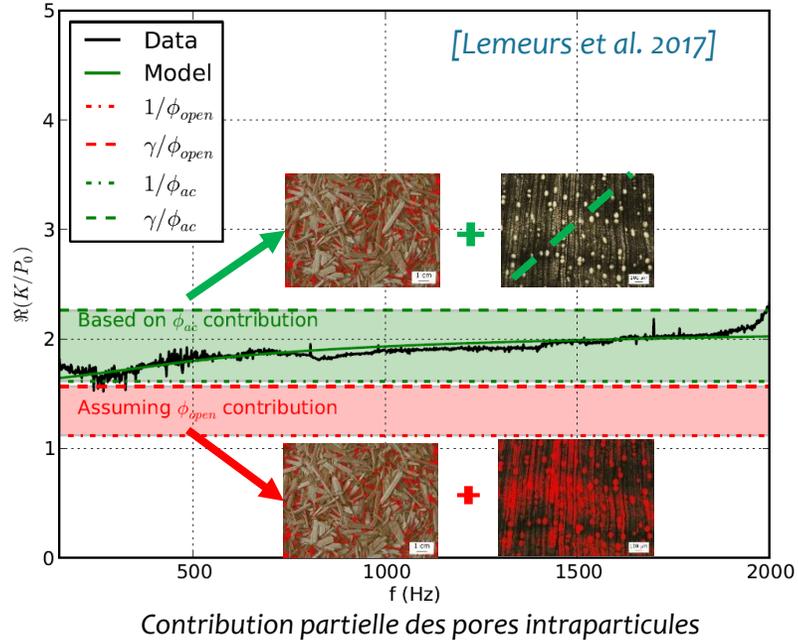


Absorption acoustique en fonction de la granulométrie de la chènevette, du compactage ou de la formulation des bétons de chanvre [Glé 2013]

- Dosage Liant / Particules



o Zoom sur la partie réelle du module d'incompressibilité



o Des échelles multiples de porosité, pas toutes impliquées:

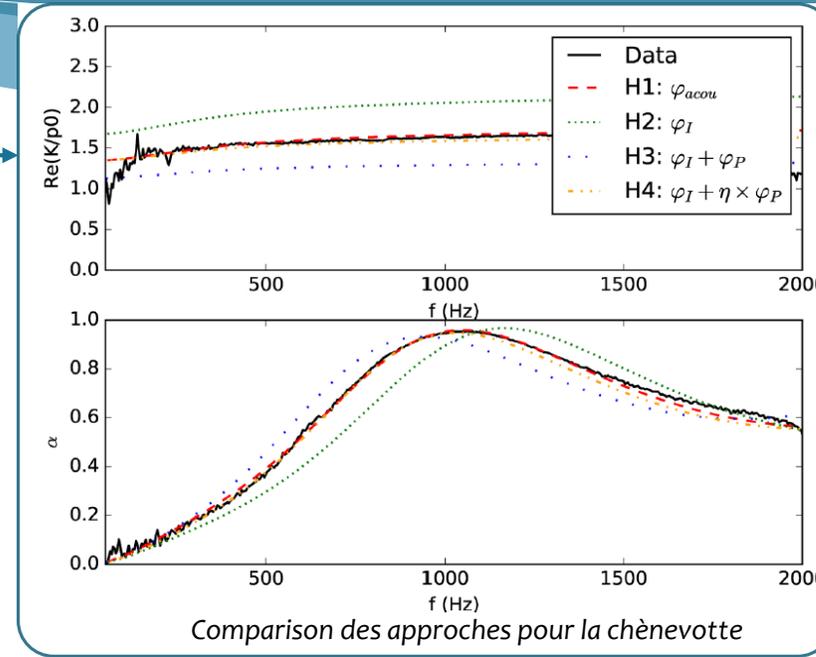
- o Pores interparticules (~1 mm)
- o Pores intraparticules (1 - 100 μm)
- o Pores intraliant (pores < 1 μm)

-> Question: A quoi correspond la poroité effective?

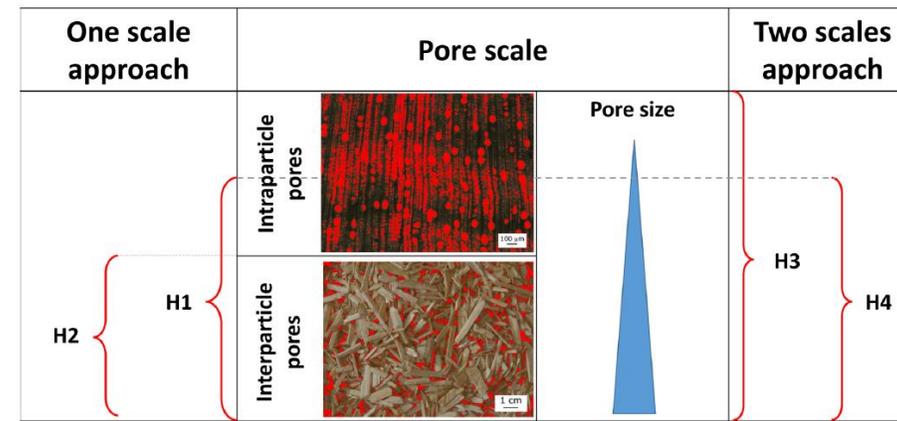
Approche de modélisation

Une approche à adapter selon le matériau

Matériau		Comportement
Chènevotte		Fraction de la porosité intra impliquée Approche H1 / H4
Moëlle de tournesol		Fraction de la porosité intra impliquée Approche H1 / H4
Roseau		Fraction de la porosité intra impliquée Approche H1 / H4
Balle de riz		Porosité intra négligeable Approche H2

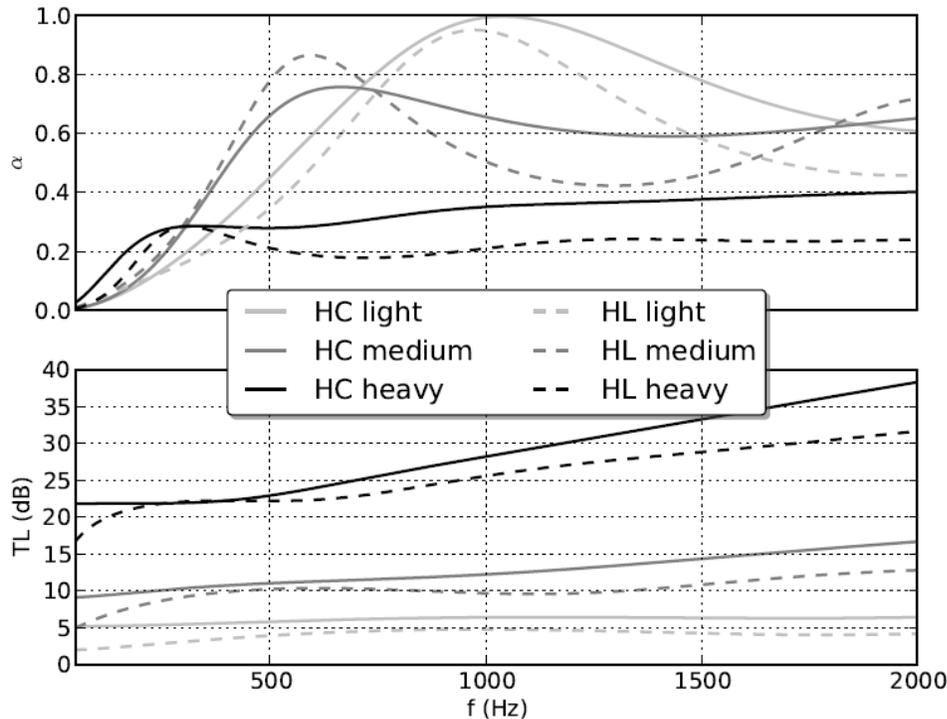


- Selon le matériau, tous les pores ouverts ne participent pas forcément à la dissipation
- Pores interparticules + fraction des pores intraparticule impliqués généralement
- Deux approches sont satisfaisantes, mais la double porosité (partielle) est physiquement plus adaptée



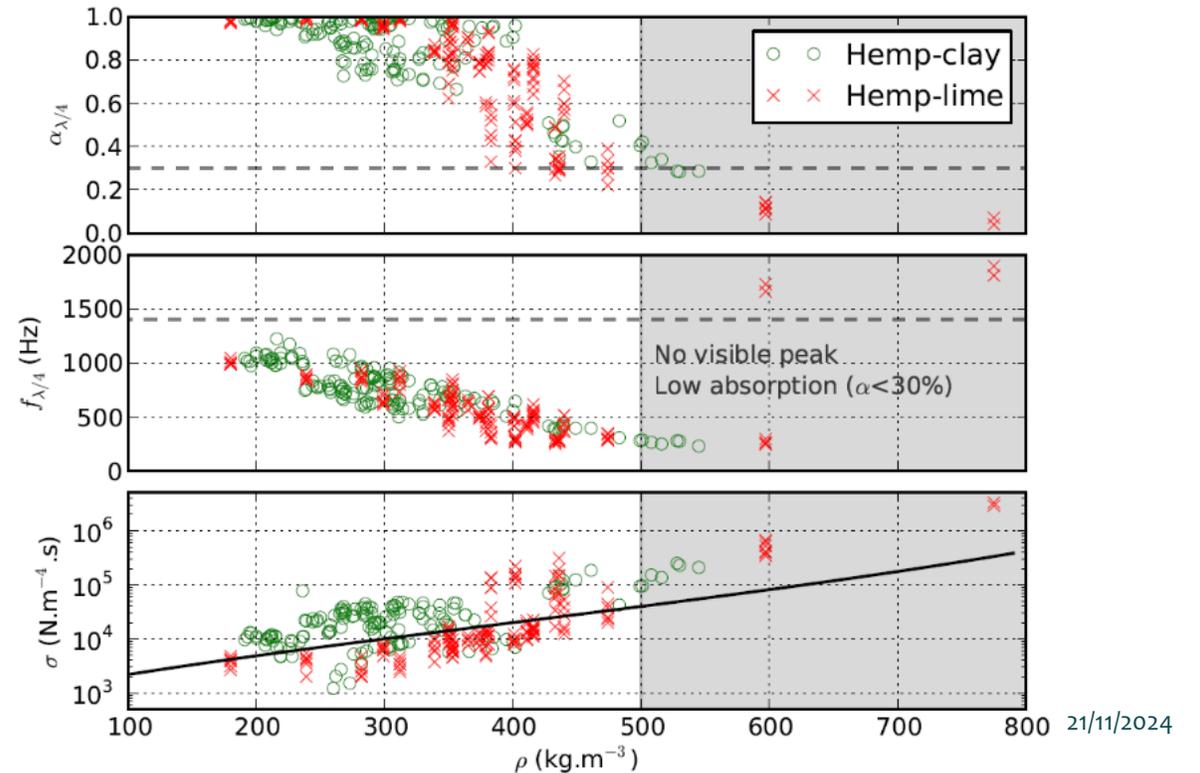
○ Illustration à partir d'une comparaison entre mélanges chaux-chanvre et terre-chanvre

- Un comportement similaire à densité donnée
 - Tendances semblables pour α et TL
 - Contribution principale interparticulaire
 - Même approche théorique



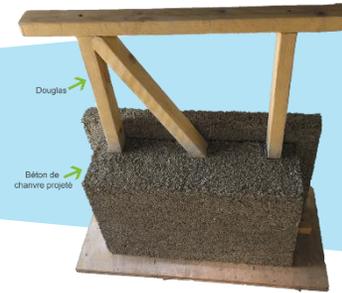
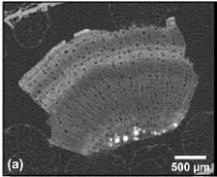
... mais avec des différences à analyser

- Pic d'absorption plus prononcé avec la chaux (tortuosité >)
- Résistivité supérieure avec la terre



Recherches en cours et perspectives

Un certain nombre de sujets à explorer



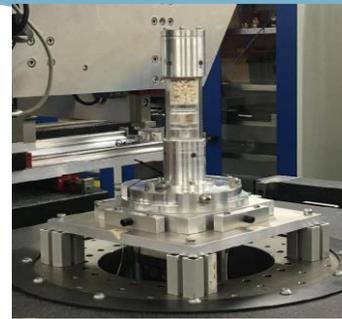
- Caractérisation microstructure
- Distribution de tailles de pores
- Arrangements granulaires / fibreux

- Modélisation micro-macro
- Anisotropie
- Comportement poroélastique
- Comportement multiéchelle
- Durabilité

- Modélisation multicouche, couplage structure-matériau
- Qualification des performances (α_w , R_w , ΔR)
- Transmissions latérales (D_n, f, w)

- Expérimentations in situ ($D_n T, A$, $L' n T, w$, $R' I$)
- Transmissions latérales (K_{ij})
- Enquêtes de perception / confort acoustique

- Campagne expérimentale @ Synchrotron Soleil en 2021
 - Exploitation en cours
 - Ségmentation / *DragonFly*
 - Séparation / *Inertia tensor*
- [Depriester et al. 2022]
- Calcul des paramètres morphologique / d'écoulement
 - Premiers résultats
 - Porosité interparticule / *DragonFly*
 - Résistivité / *OpenPNM - Fickian diffusion*
 - Tortuosité / *OpenPNM - Fickian diffusion*
 - Perspectives
 - Extension aux autres configurations
 - Simulations numériques sur des géométries simplifiées



Installation (bout de ligne)

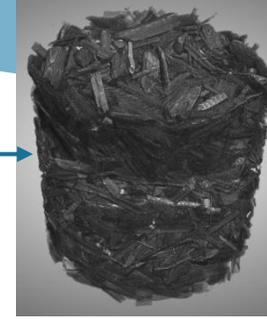


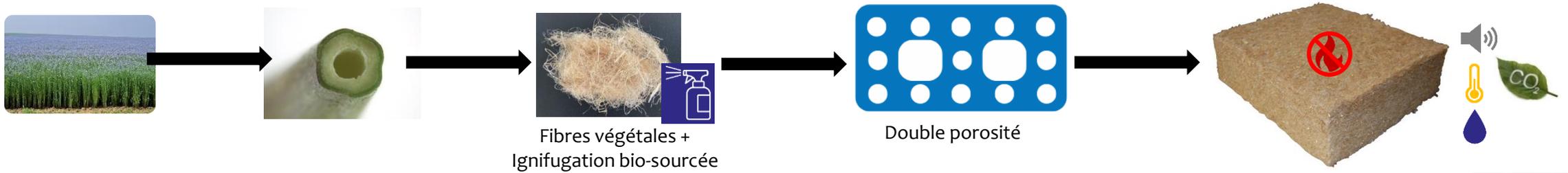
Image brute 3D



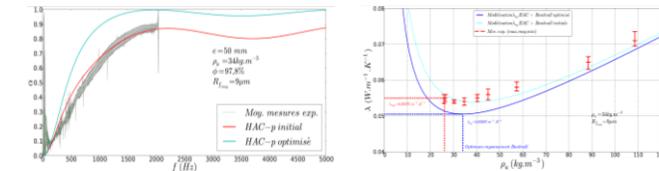
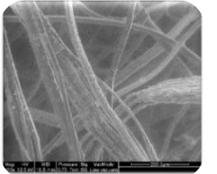
Image après ségmentation & séparation

Comp. pour chènevotte (130 kg.m ³)	Approche acoustique	Données issues de MCT
ϕ_{inter}	0,61	0,57
σ_{inter}	4500 Nm ⁻⁴ s	4600 Nm ⁻⁴ s (z) 2500-3000 Nm ⁻⁴ s (xy)
$\alpha_{\infty inter}$	2,1	2,4 (z) 1,7 – 1,8 (xy)

Isolants bio-sourcés ignifugés et optimisés pour des applications acoustiques et hygrothermiques



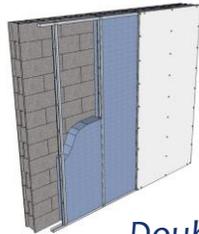
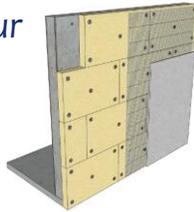
- Analyse et compréhension de la microstructure des laines végétales.
- Caractérisation et prédiction des performances multifonctionnelles des laines végétales.
- Adaptation et optimisation des traitements au feu compatibles avec les matériaux biosourcés par une meilleure compréhension de leur influence aux échelles fibres et matériau.
- Optimisation de l'épaisseur des laines végétales.
- Synthèse et diffusion des résultats



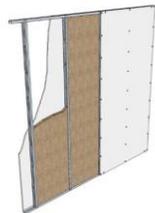
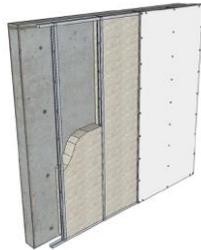
Résultats à l'échelle des systèmes

Voir [Etude CSTB-Cerema, 2018]

Doublage extérieur
 $\Delta R_{w+C} = 2\text{dB}$



Doublage intérieur
 $\Delta R_{w+C} = 2\text{dB}$

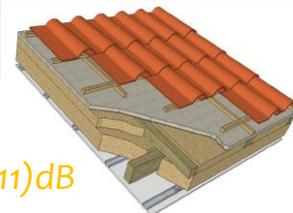


Cloison 72/48
 $R_{w(C,Ctr)} = 40(-5,-11)\text{dB}$

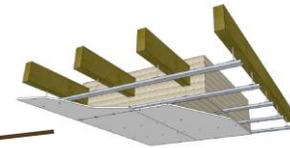
Mur chaux-chaivre
 $R_{w(C,Ctr)} = 46(-2,-4)\text{dB}$



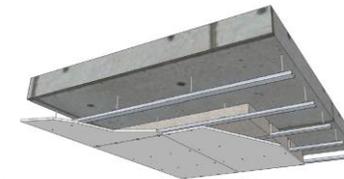
Toiture
 $R_{w(C,Ctr)} = 52(-4,-11)\text{dB}$



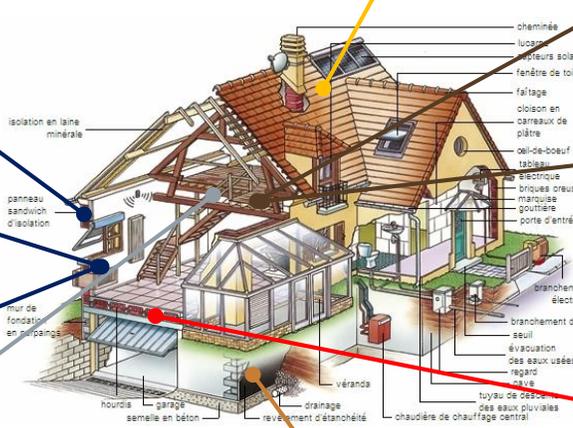
Combles perdus +
 $R_{w(C,Ctr)} = 54(-5,-12)\text{dB}$



Combles perdus -
 $R_{w(C,Ctr)} = 43(-1,-8)\text{dB}$

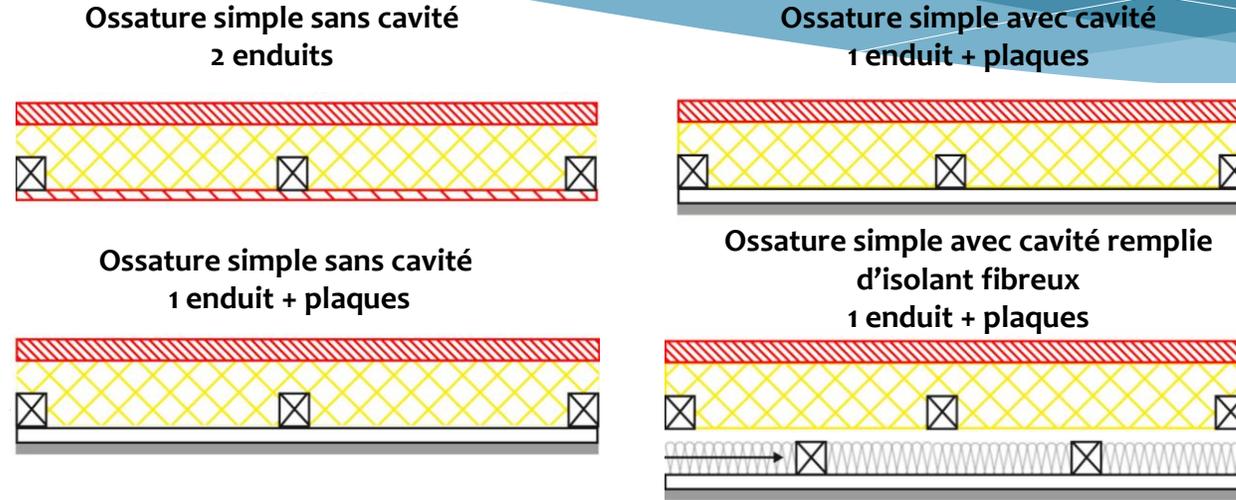


Plafond suspendu
 $\Delta R_{w+C} = 15\text{dB}$

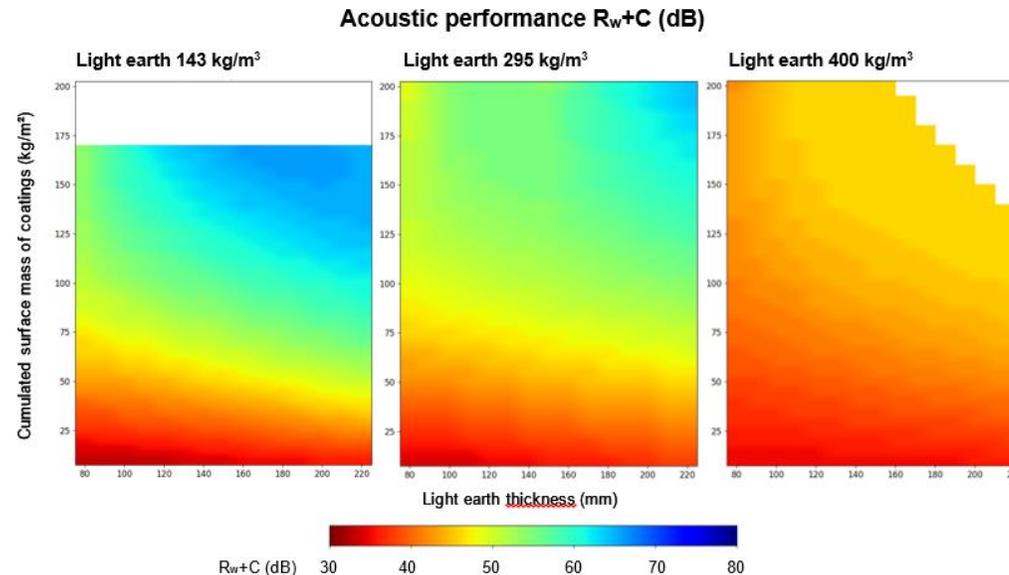


Transfert vers l'opérationnel

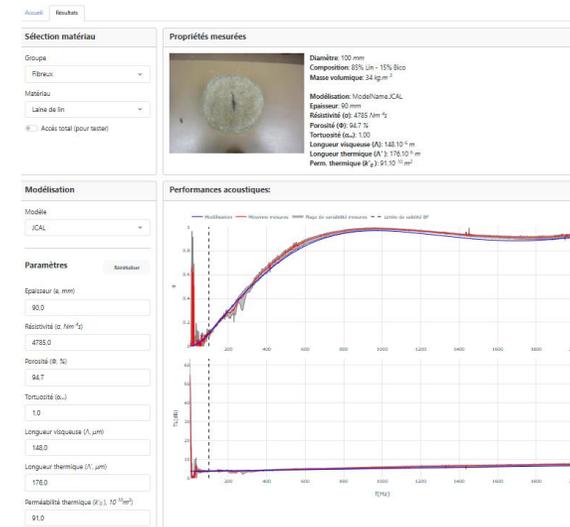
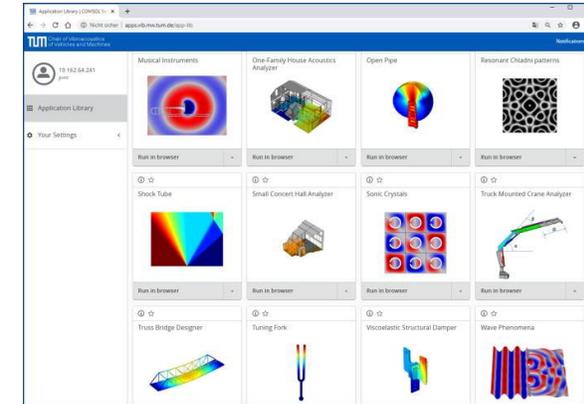
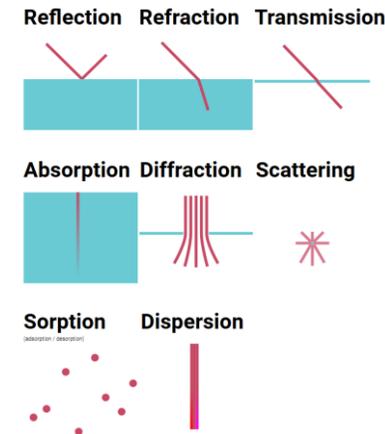
- Exemples d'abaques de conception
(Cloisons)



- Transfert aux acteurs du bâtiment en cours
(Webinaire LOB+HIE le 17/12)



- Allard & Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, 2009
- Bibliothèques de visualisations:
 - <http://www.falstad.com/mathphysics.html>
 - <https://apps.vib.ed.tum.de/app-lib>
- Vidéos sur la médiathèque LeMans Université
- Site web APMR Matelys
- Site web www.umrae.fr
 - Généralités sur les recherches en acoustique environnementale
 - A venir: *BDD Acoustique des biosourcés en ligne*



○ Contacts :

- Philippe.Gle@cerema.fr
- Clement.Piegay@cerema.fr

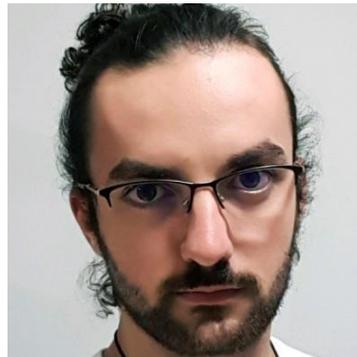
○ Liens :

- <http://www.umrae.fr/>



L'Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale (UMRAE) est un laboratoire de recherche commun entre l'Ifsttar et le Cerema,

○ RDV au niveau des posters avec notre équipe de choc



Merci pour votre attention...
... des questions?