

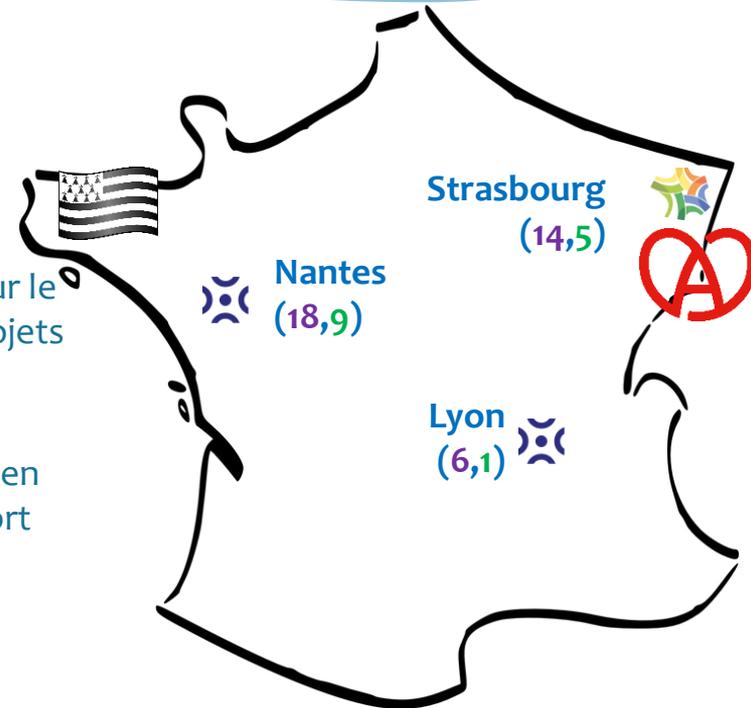


Les matériaux biosourcés sous l'angle acoustique

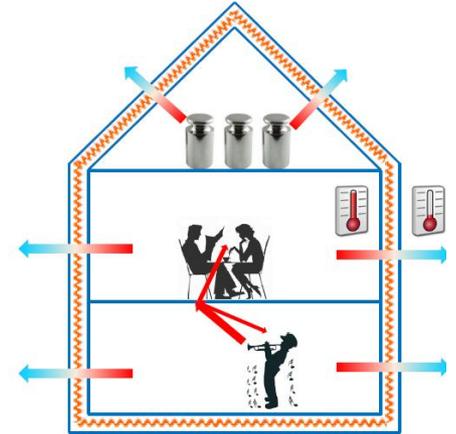
Philippe Glé – UMRAE

Ecole d'automne 2022 - Lorient

- 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**.



- 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

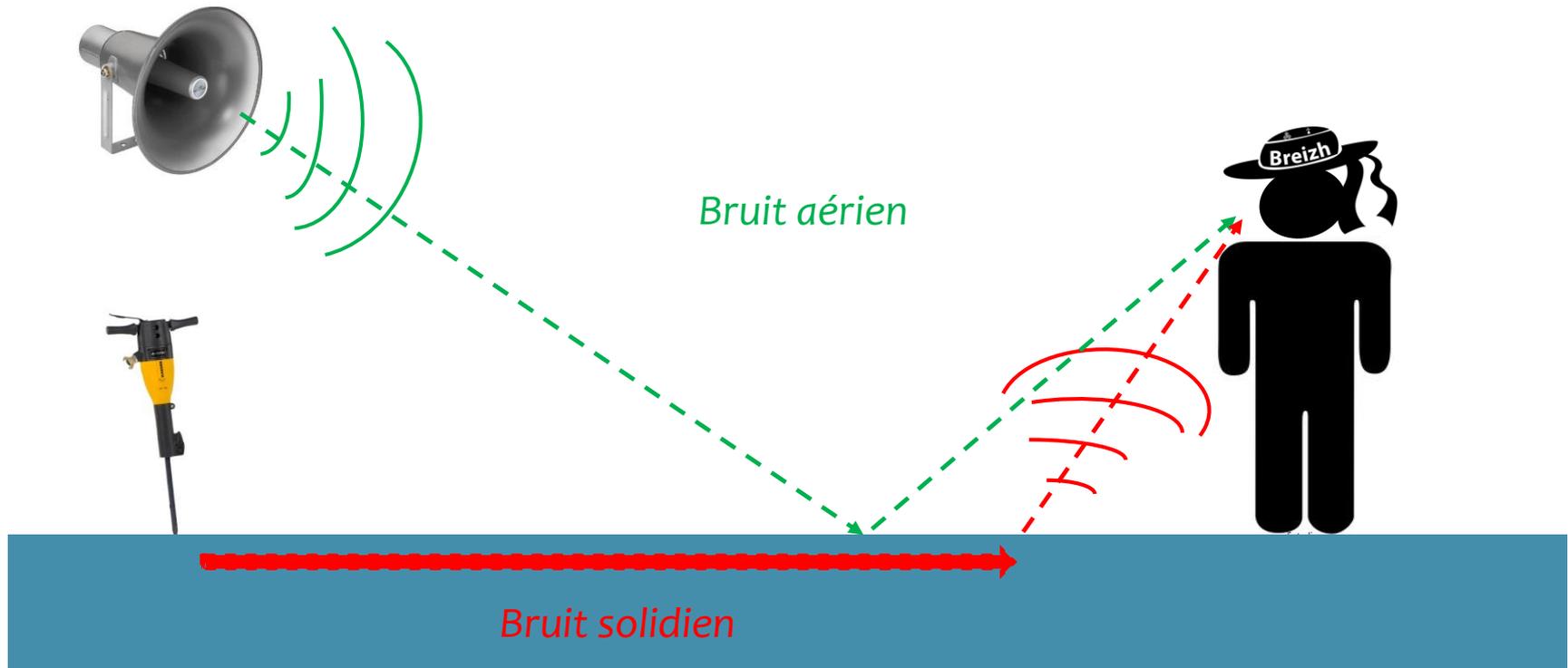


[labs.openai.com]

- Le comportement acoustique des matériaux poreux biosourcés
- Revue des techniques de caractérisation
- Modélisation : approches et applications
- Quels leviers d'optimisation?

Le comportement acoustique des matériaux poreux (biosourcés)

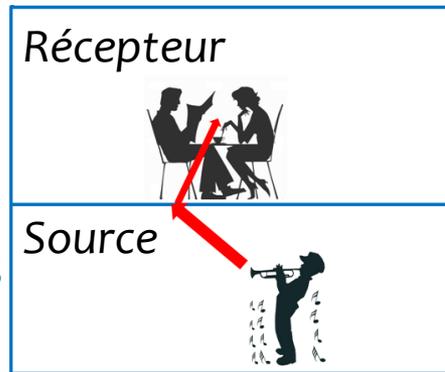
Définition du problème



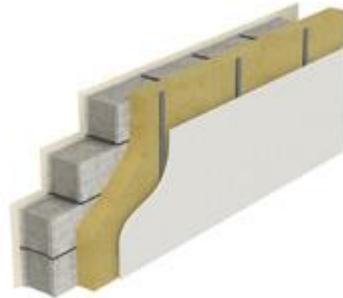
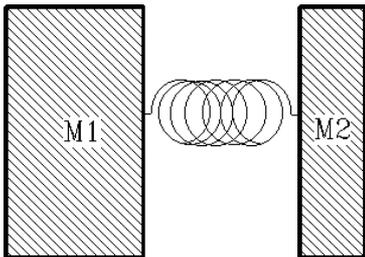
■ Isolation acoustique

* But :

Limiter la propagation du son à travers une paroi



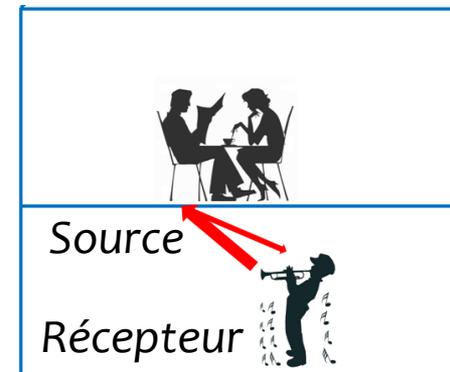
* Moyens :



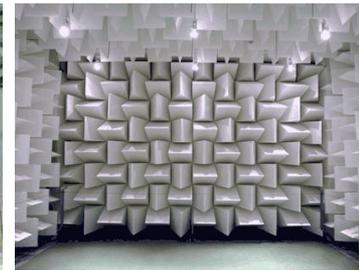
■ Absorption acoustique

* But :

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



* Moyens :



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

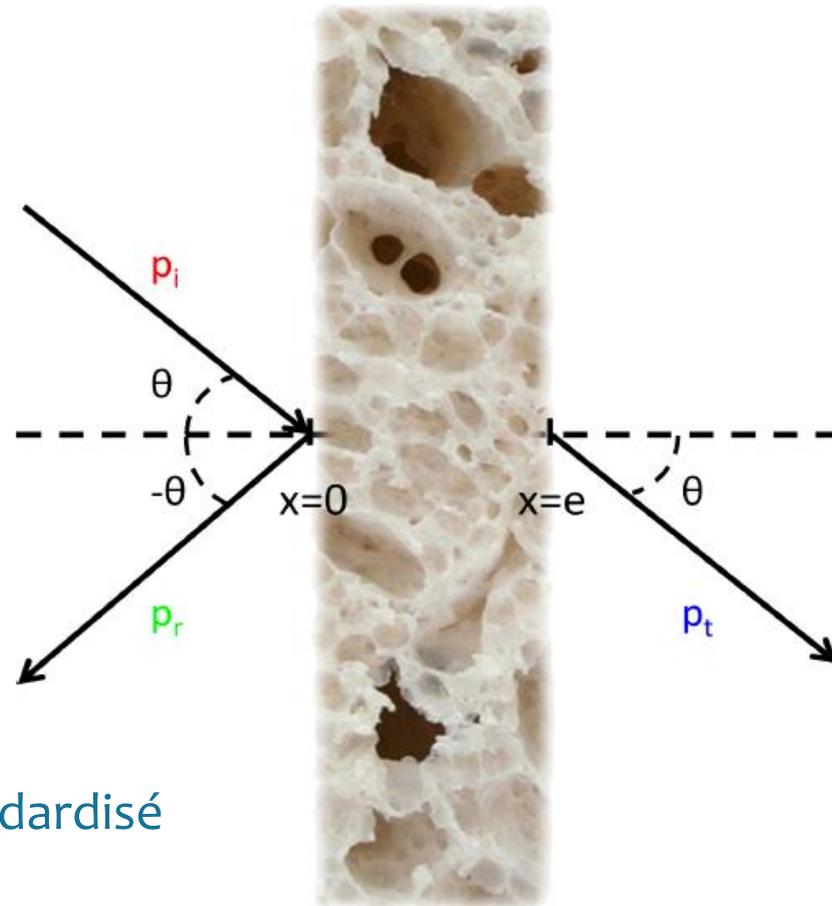
$$D_{nT}$$

Niveau pondéré du bruit de choc standardisé

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

Echelles
matériau, paroi

Echelle
bâtiment



Définition du milieu poreux

Matériau poreux



Phase solide



Phase fluide



Les réticulés



Les fibreux

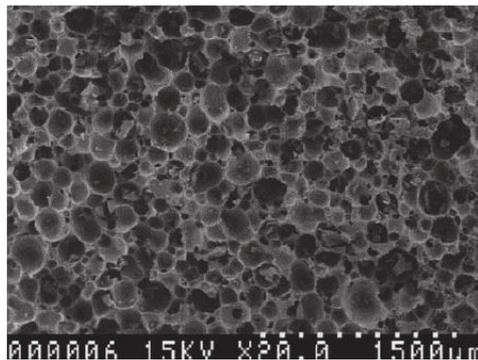


Les granulaires

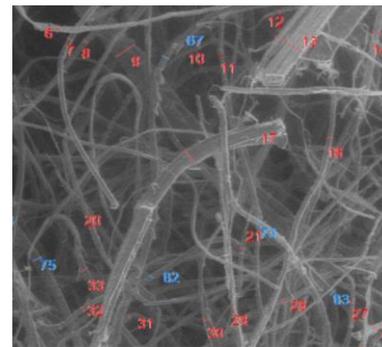


Poreux du
quotidien

Poreux
biosourcés



[Basso et al., 2014]

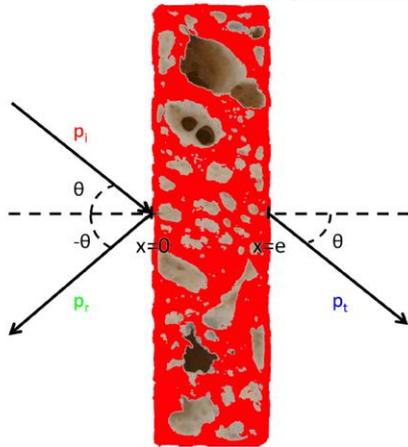


[Piégay, 2019]

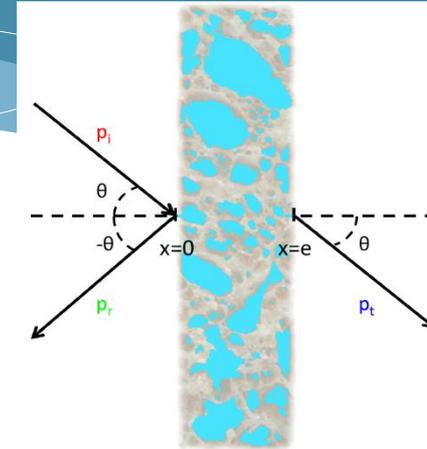


[Glé, 2013]

Mécanismes de dissipation



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



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

Effets visco-inertiels

Effets visco-inertiels : Navier-Stokes

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

Forces visqueuses

Terme négligé
(écoulement incompressible)

Forces inertielles

Gradient de pression
« sollicitation »

Effets thermiques

Effets thermiques : Equation de la chaleur

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

Conduction thermique

Inertie thermique

Variation de pression
« sollicitation »

Mécanismes de dissipation

Propriétés intrinsèques des matériaux

Densité dynamique:

Dissipation par effets visco-inertiels

$$\rho = \frac{\eta}{j\omega\Pi} \quad \text{avec} \quad \Pi = -\frac{\mu \langle \vec{v} \rangle}{\vec{\nabla} p}$$

Module d'incompressibilité dynamique:

Dissipation par effets thermiques

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

Couplage des effets visco-thermiques

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

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

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

Equation de conservation



Equation d'onde

Célérité du milieu dissipatif:

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

Nombre d'onde et impédance:

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

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

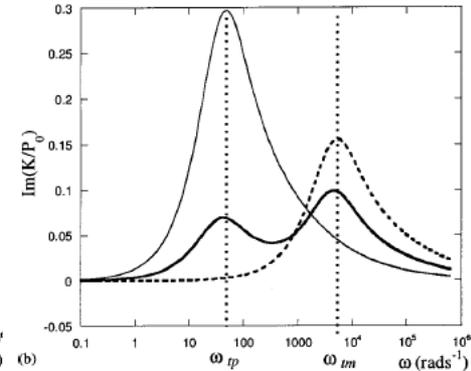
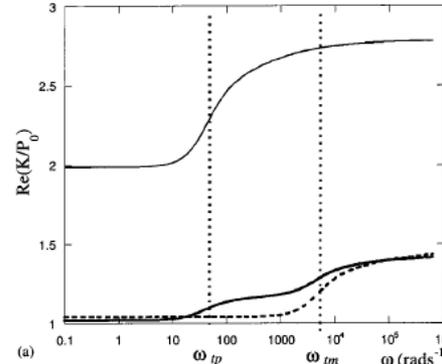
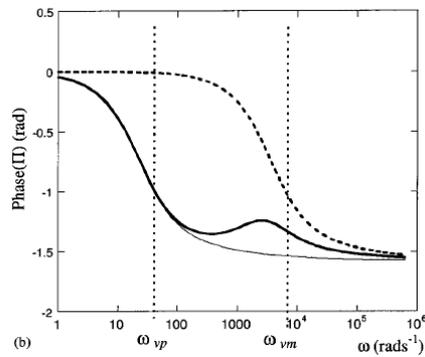
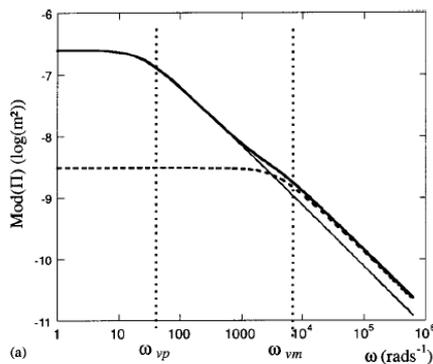
Expression générale des fréquences de transition dans un poreux

Effets visco-inertiels

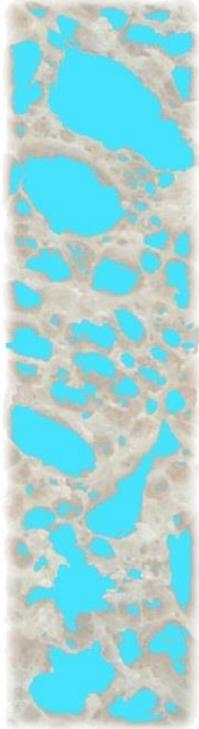
$$\omega_v = \frac{\sigma\phi}{\rho_0\alpha_\infty}$$

Effets thermiques

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



[Olny et al. 2002]



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

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

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

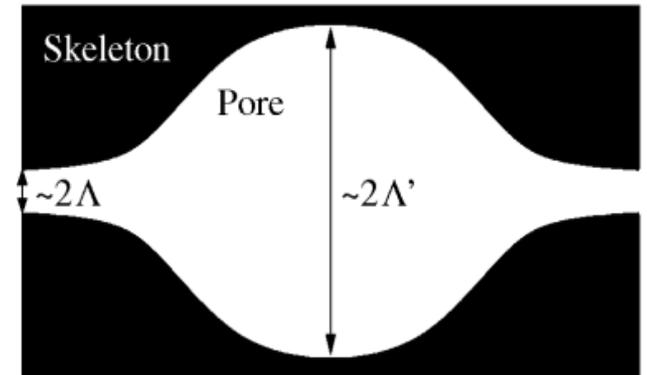
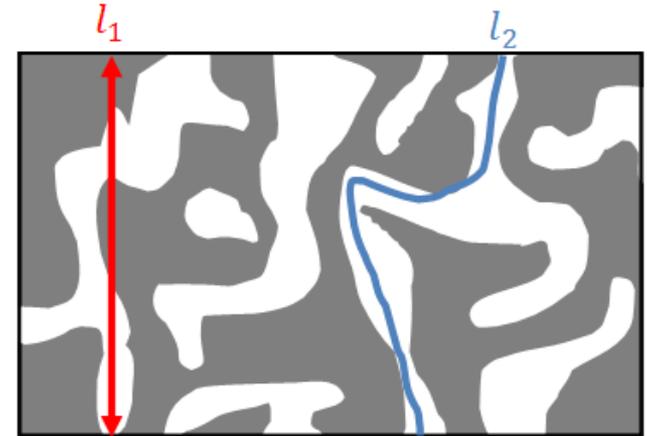
$$\alpha_{\infty} = \frac{\frac{1}{V} \int_V v^2 dV}{\left(\frac{1}{V} \int_V \vec{v} dV\right)^2} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2$$

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

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

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

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



[apmr.matelys.com]



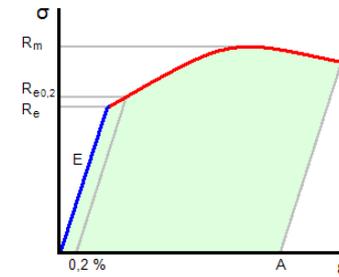
- * Masse volumique
- * Module d'Young
- * Coefficient de Poisson
- * Amortissement structural

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

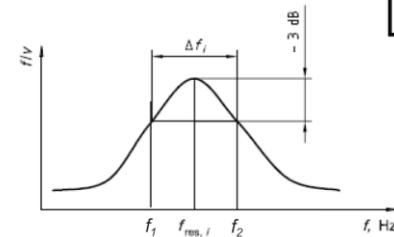
$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$$

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

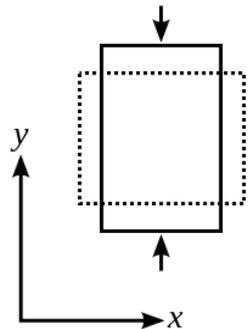
$$\eta = \frac{f_{res}}{\Delta f}$$



[Wikipédia]



[EN 29052-1]



- Microstructure
 - Particules et fibres poreuses
 - Approche multiéchelle

- Anisotropie
 - Fibres, granulats allongés

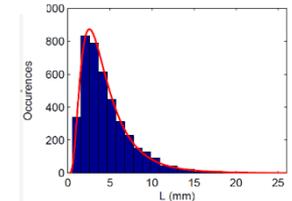
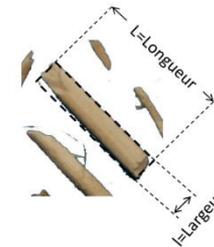
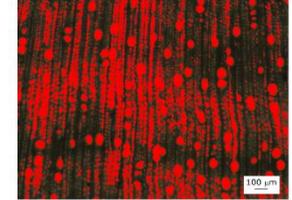
- Distribution granulométrique
 - Dimensions caractéristiques
 - Largeur de distribution

- Variabilité
 - Process naturel
 - Durabilité?

Inter-particle pores



Intra-particle pores

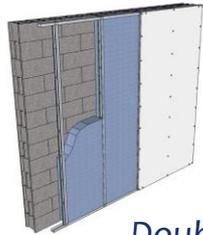
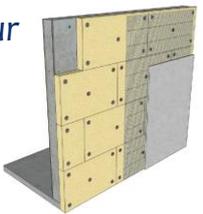


	Mineral wools	Plant wools
ρ_{frame} ($kg.m^{-3}$)	≈ 2600	1000-1500
Diameter (μm)	1-10	20-40
Micro-porosity	-	2-16 %

Performances des Biosourcés

Voir [Etude CSTB-Cerema, 2018]

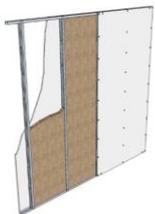
Doublage extérieur
 $\Delta R_{w+C} = 20\text{dB}$



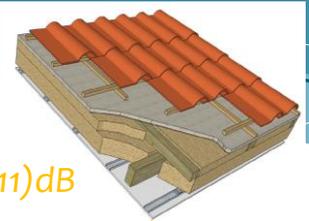
Doublage intérieur
 $\Delta R_{w+C} = 20\text{dB}$



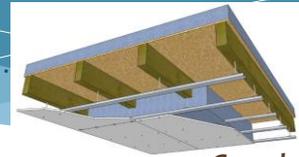
Cloison 72/48
 $R_{w(C,Ctr)} = 40(-5,-11)\text{dB}$



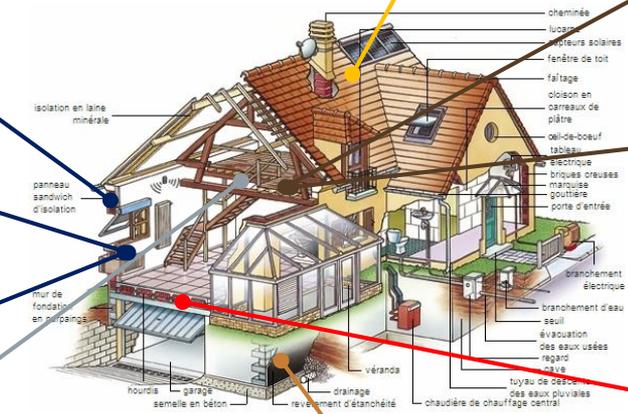
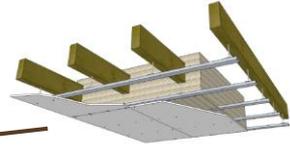
Toiture
 $R_{w(C,Ctr)} = 52(-4,-11)\text{dB}$



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



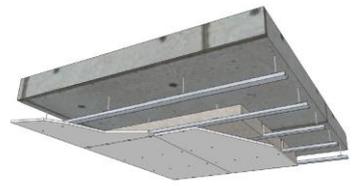
Combles perdus
 $R_{w(C,Ctr)} = 43(-1,-8)\text{dB}$



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



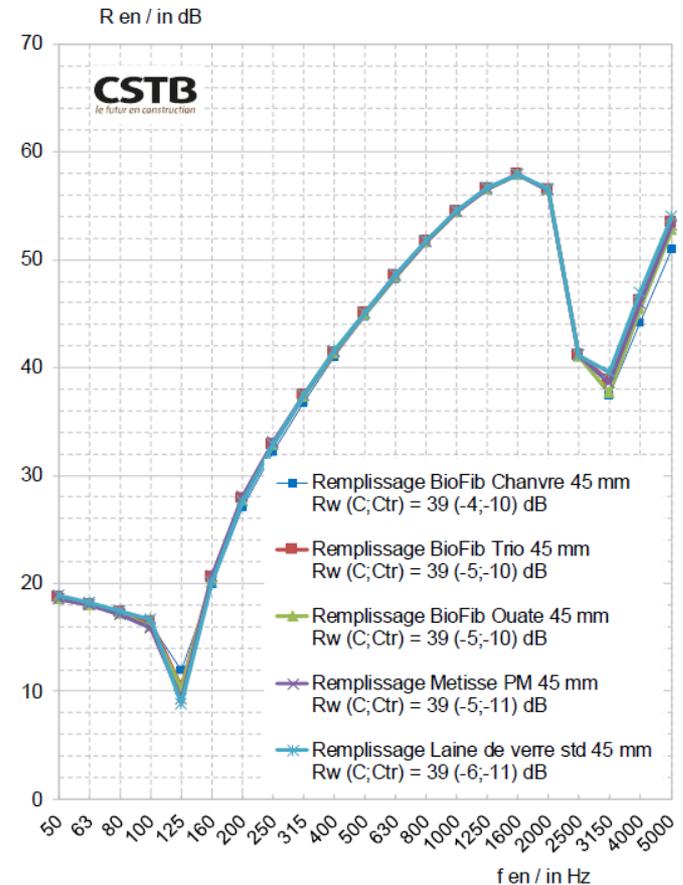
Plafond suspendu
 $\Delta R_{w+C} = 15\text{dB}$



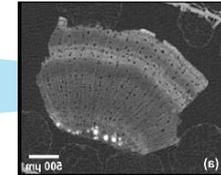
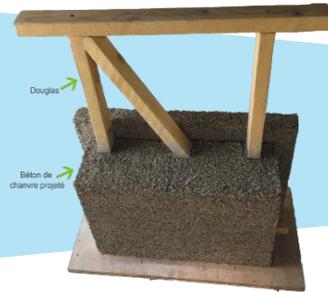
○ Conclusion de l'étude [CSTB-Cerema, 2018]:

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)



Revue des techniques de caractérisation



■ Performances in situ

- ✓ Ressenti de l'utilisateur
- Incertitudes
- Couplage inter-parois

■ Performances des systèmes

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

■ Propriétés du matériau

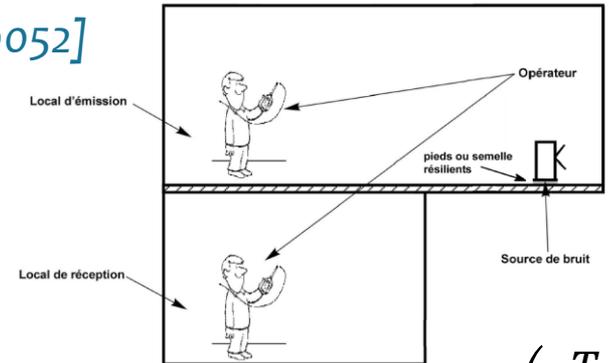
- ✓ Compréhension du comportement
- Matériau homogène

■ Paramètres du matériau

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

○ 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]

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

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

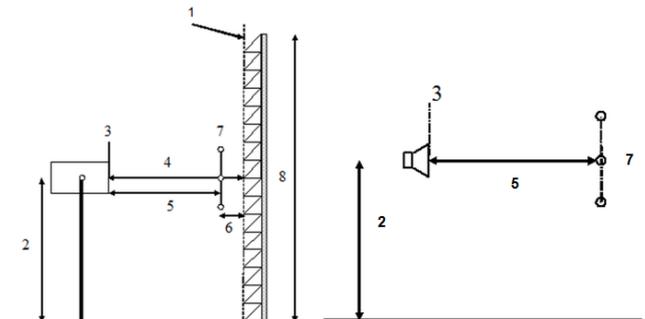
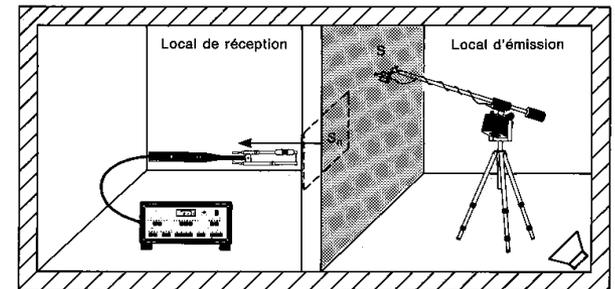
$$v(M, t) = \frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{p_A(\tau) - p_B(\tau)}{\Delta r} d\tau.$$

Application :

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

- Absorption acoustique

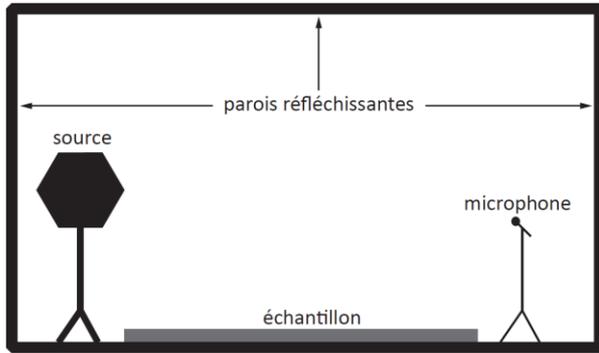
- Méthodes Adrienne [EN 1793-5], [EN 13472-1]
- Méthode locale [EN 13472-2]



Isolation

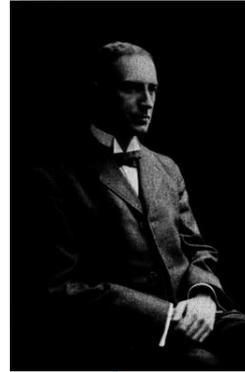
Absorption

○ Mesures en salles réverbérantes (champ diffus)

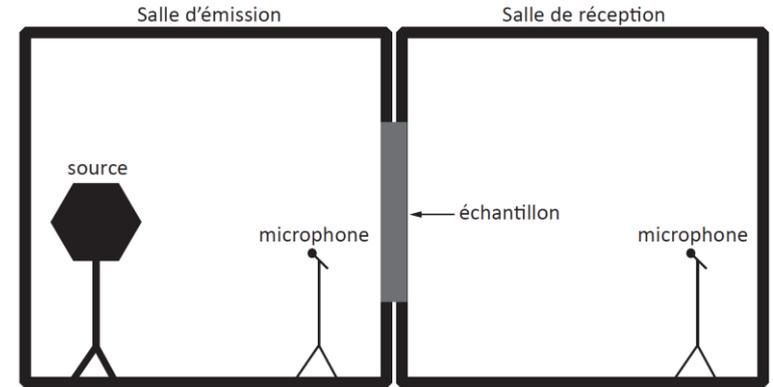


[NF EN ISO 354]

[NF EN ISO 11654]



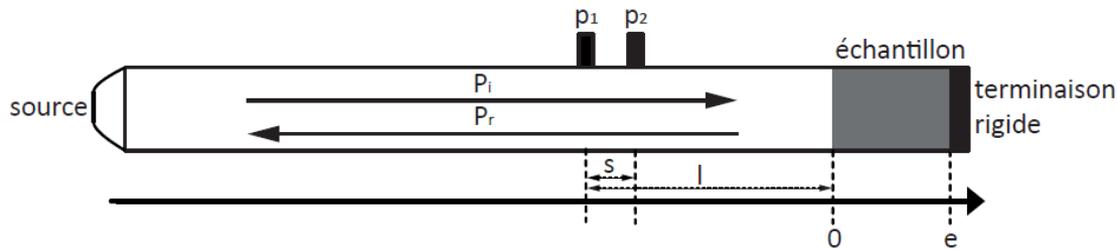
 1868-1919



[NF EN ISO 10140-1 à 5]

$$\alpha_s = \frac{A_2 - A_1}{S} = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_{R2}} - \frac{1}{c_1 T_{R1}} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad TL = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right)$$

- Tube de Kundt (Incidence normale) [ISO 10534-2]
Absorption, impédance de surface



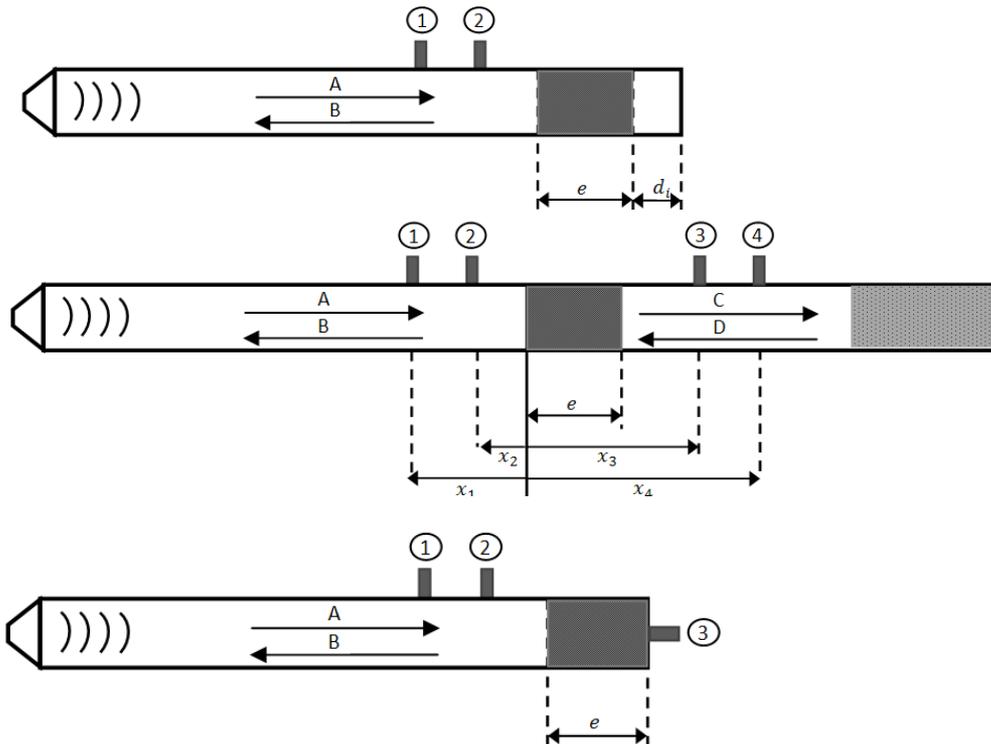
 1839-1894

$$\begin{cases} p_1 = p_0 e^{j(\omega t + k_0 l)} + R p_0 e^{j(\omega t - k_0 (l - s))} \\ p_2 = p_0 e^{j(\omega t + k_0 (l - s))} + R p_0 e^{j(\omega t - k_0 l)} \end{cases} \quad H_{12} = \frac{p_2}{p_1}$$

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

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

Caractéristiques de propagation



[Utsuno et al., 1989]

[Yaniv, 1973]

[Song et al., 2000]

[Iwase et al., 98]

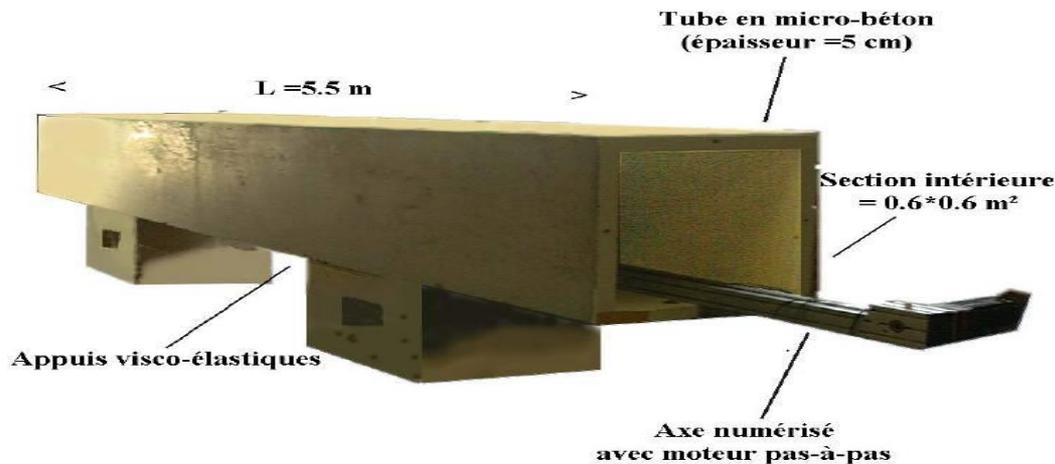
$\rho(\omega), K(\omega)$

$\alpha(\omega), T(\omega)$

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

Caractérisation à des fréquences allant de 30 Hz (Megatube de Kundt)

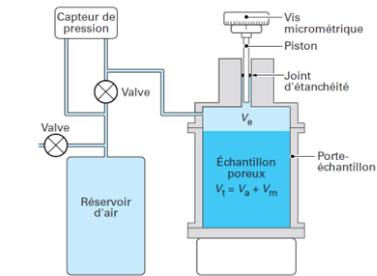
À 10000 Hz (Petit tube)



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

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

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



V_t volume total de l'échantillon
 V_p 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



1627-1691



1620-1684

○ Autres approches

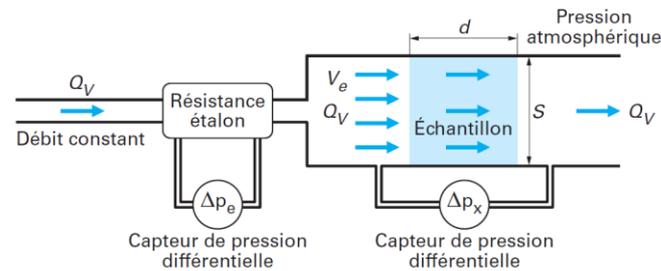
- Pycnométrie: He/He (poudre)/N₂
 - He → 0,26 nm
 - N₂ → 0,36 nm
- Intrusion de mercure
 - Hg (414 MPa) → 3,6 nm
- Tomo-X
 - ⚠ : Limites résolution



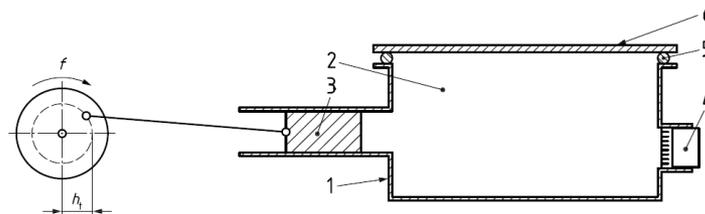
○ Résistance statique à l'écoulement de l'air [ISO 9053]

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

■ *Écoulement statique*



■ *Écoulement alternatif*



Légende

- 1 récipient
- 3 piston
- 5 joint

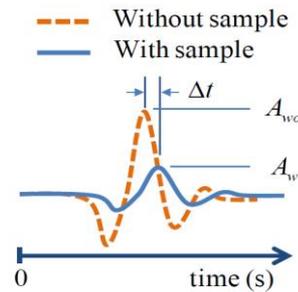
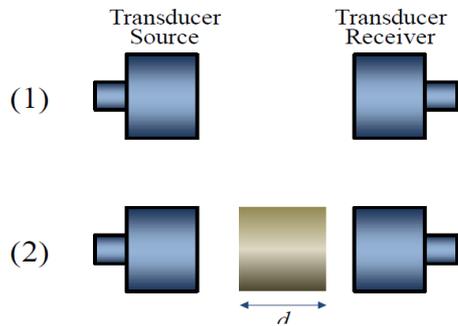
- 2 cavité d'air
- 4 microphone
- 6 terminaison étanche



1803-1868

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

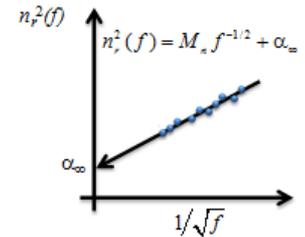
- Méthode en transmission (faibles tortuosité et/ou résistivité)



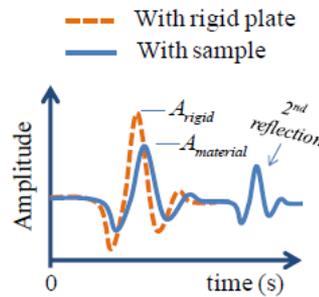
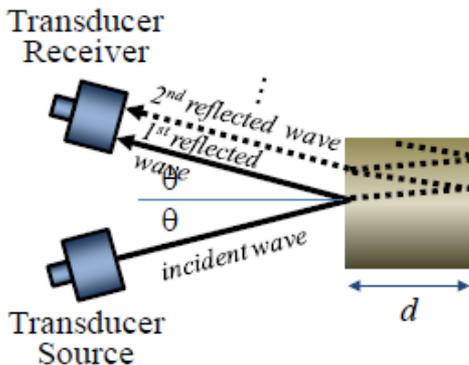
$$n_r(\omega) = \frac{c_0}{c(\omega)} = 1 + c_0 \frac{\Delta t(\omega)}{d}$$

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

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



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



$$r(t, \theta) = \frac{A_m(t, \theta)}{A_r(t, \theta)}$$

$$z = \frac{1+r}{1-r} \frac{\phi}{\cos \theta}$$

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

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

Relations analytiques directes entre propriétés acoustiques et paramètres

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

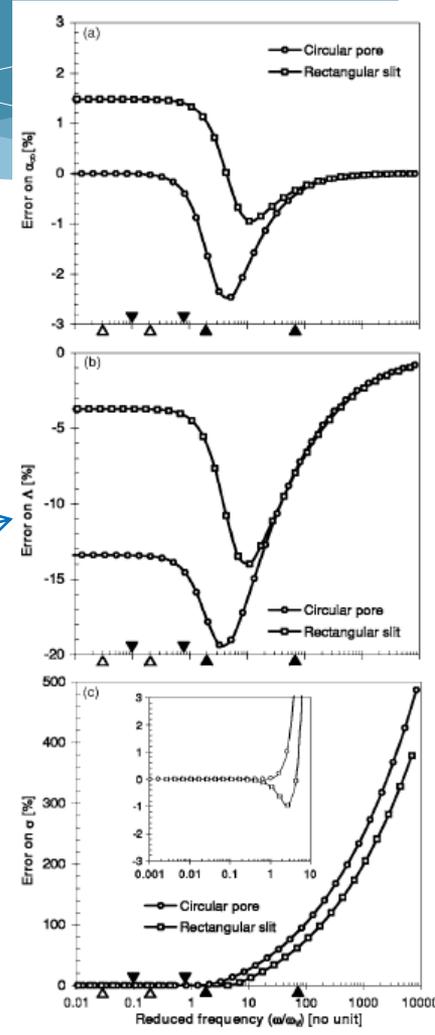
$$\alpha_{\infty} = \frac{\phi}{\rho_0} \left(\text{Re}(\tilde{\rho}_{eq}) - \sqrt{(\text{Im}(\tilde{\rho}_{eq}))^2 - \frac{\sigma^2}{\omega^2}} \right)$$

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

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

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

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



○ Caractérisations indirectes [Jaouen et al. 2020]

Relations asymptotiques entre propriétés acoustiques et paramètres

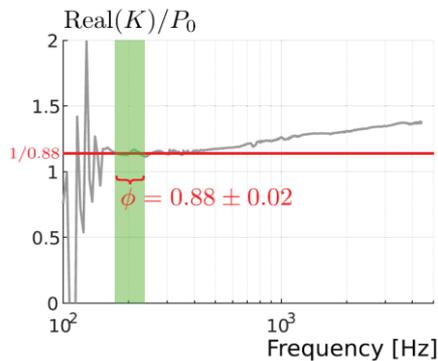
⚠: La gamme de fréquence doit être suffisamment éloignée des fréquences de transition f_v et/ou f_t

Porosité

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

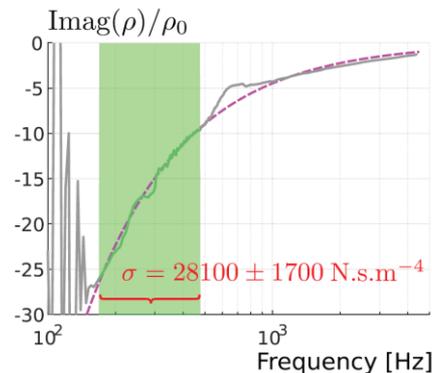
$$\phi = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P_0}{e\omega \Im(Z_s)}$$

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



Résistivité

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

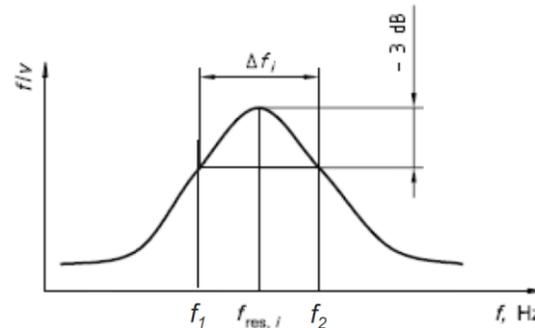
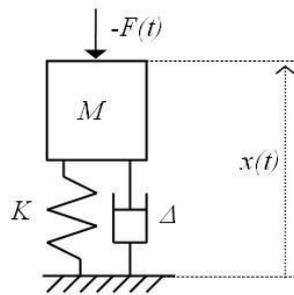


Tortuosité

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

○ Paramètres élastiques

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



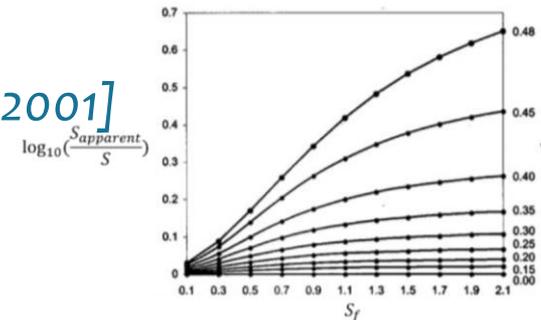
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}}$$

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

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

- Analyse mécanique quasistatique [Langlois et al. 2001]

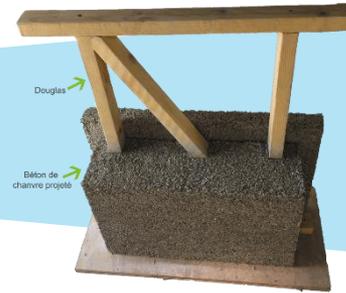
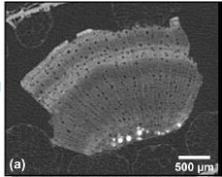
$$S_f = \frac{D}{4e} \quad E_{apparent} = \frac{4eS_{apparent}}{D^2\pi}$$



- Mesure du module d'élasticité dynamique longitudinal [EN 14146] -> Matériaux rigides
- Compression sous presse (simple, cyclique)

- Evaluation directe des paramètres à partir de la microstructure
 - Par microscopie ou MEB
 - > *Présentation Thomas Sa: Laines végétales optimisées pour le confort intérieur : couplage du traitement au feu et des performances acoustiques et hygrothermiques*
 - Par microtomographie
 - > *Poster Arthur Kouakou: Analyse microstructurale des empilements granulaires biosourcés pour une modélisation multiphysique consolidée*

Modélisation : approches et applications



- Quelques hypothèses à fixer:
 - Gamme de fréquences
 - **Comportement poroélastique**
 - Type d'excitation (incidence fixe, champ diffus, ...)
 - Dimension finie ou infinie
 - Autres conditions limites
 - ...

○ 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

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

○ 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)

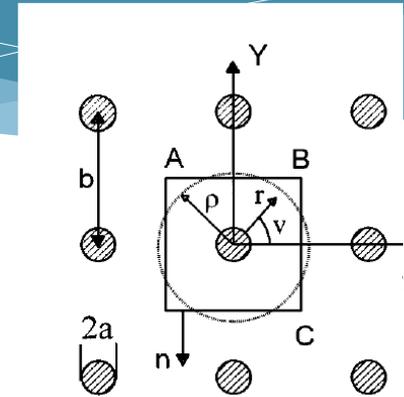
$$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [1,280 \ln(1/(1-\phi)) - 1,474 + 2(1-\phi)]}$$

[Tarnow 1996a] \perp (idéal)

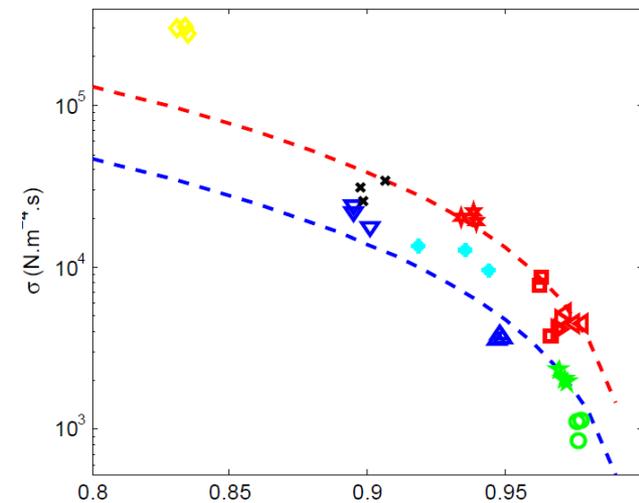
$$\sigma = 4\mu \frac{1-\phi}{R_f^2 [\ln((1-\phi)^{-1/2}) - 0,750 + (1-\phi) - 0,250(1-\phi)^2]}$$

[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]

○ Matériaux granulaires

[Attenborough 1993]

$$\sigma = \frac{27\mu}{R_p^2} \frac{(1-\phi)^2}{\phi^{3.5}}$$

[Priour du Plessis & Woudberg 2008]

$$\sigma = \frac{A\mu(1-\phi)^2}{(\frac{4}{3}\pi)^{2/3} R_p^2 \phi^3}$$

$$A = \frac{25.4\phi^3}{(1-\phi)^{2/3}(1-(1-\phi)^{1/3})(1-(1-\phi)^{2/3})^2}$$

[Voronina & Horoshenkov 2003]

$$\sigma = \frac{100\mu(1-\phi)^2(1+\phi)^5}{\phi R_p^2}$$

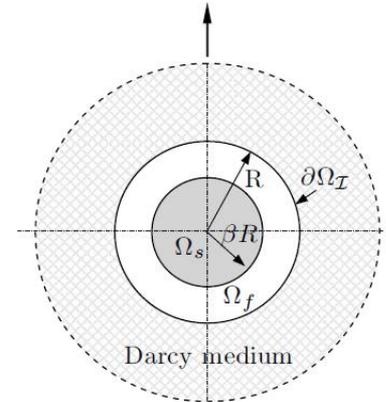
[Umnova *et al.* 2000]

$$\sigma = \frac{9\mu}{2 \frac{\phi^2}{(1-\phi)(1-\phi)\Omega} R_p^2}$$

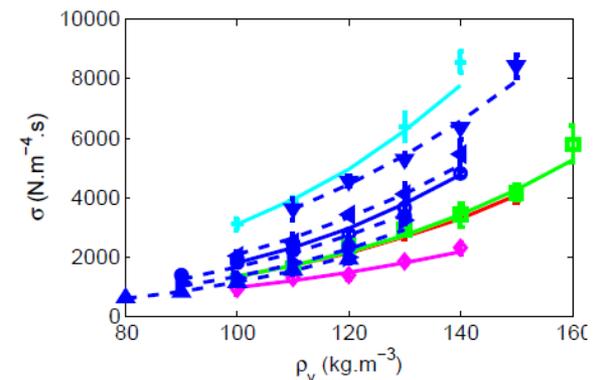
$$\Omega = \frac{5}{5-9\Theta^{1/3}+5\Theta-\Theta^2} \quad \Phi = \frac{3}{\sqrt{2}\pi} (1-\phi)$$

[Boutin & Geindreau 2010] _p

$$\sigma = \frac{3\beta^2\mu}{(-1+\frac{2+3\beta^5}{\beta(3+2\beta^5)})R_p^2} \quad \beta = (1-\phi)^{1/3}$$

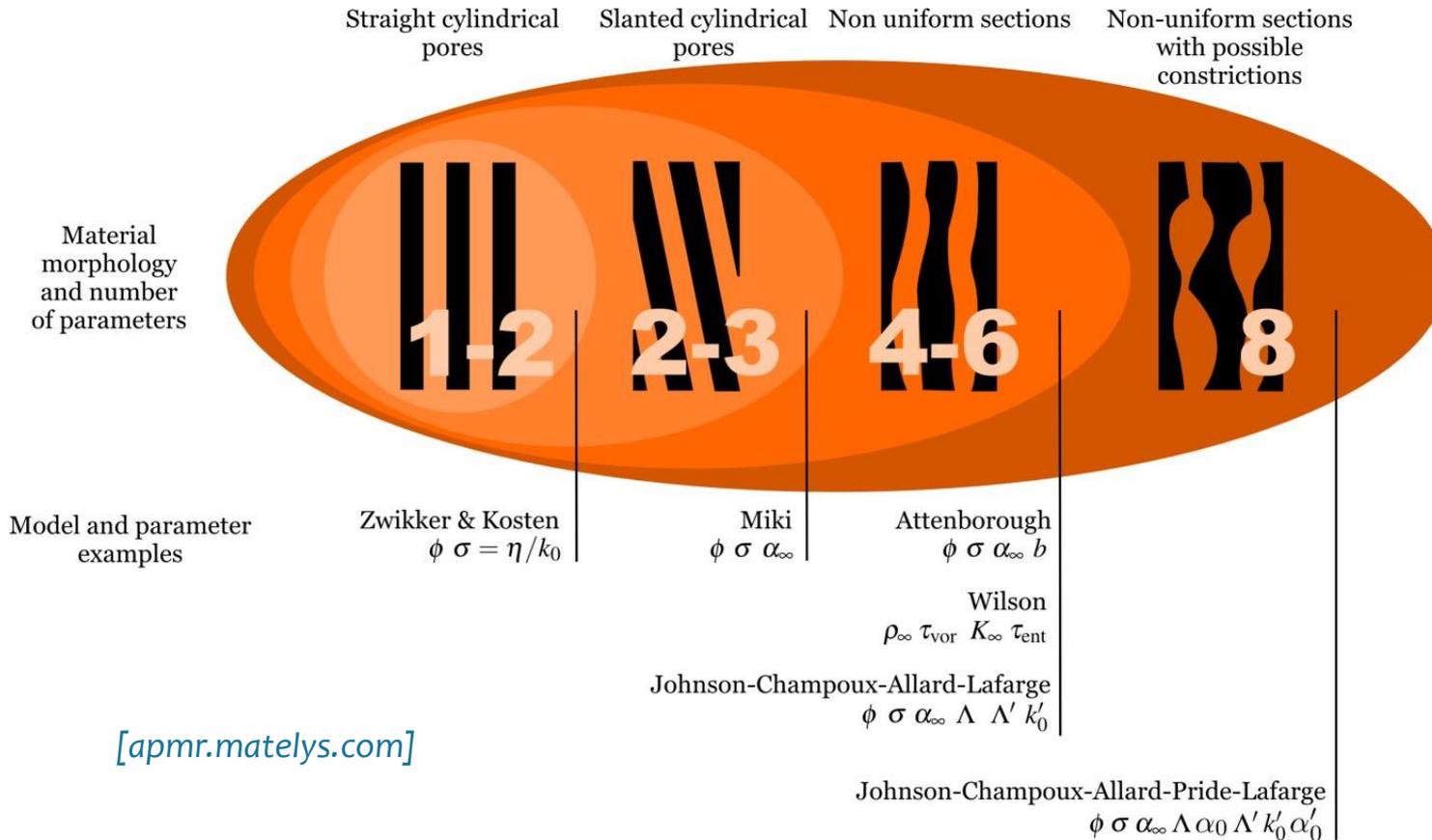


[Boutin & Geindreau 2010]



[Glé 2013]

○ Revue des modèles principaux



[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 ($\vartheta = 0^\circ$)

$$Tr = \frac{2e^{jk_0 e}}{2 \cos(ke) + j \sin(ke) \left(\frac{Z_c}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_c} \right)}$$

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

Quelques cas particuliers

○ Matériaux multiéchelles [Olny et Boutin, 2003]

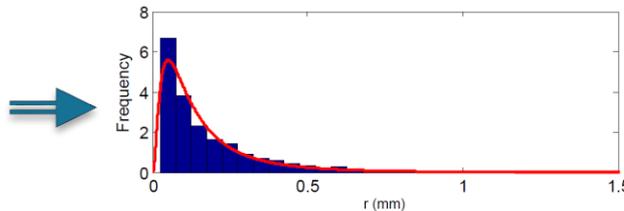
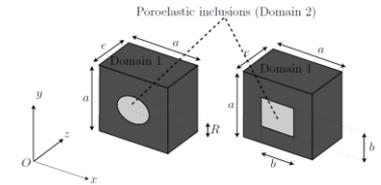
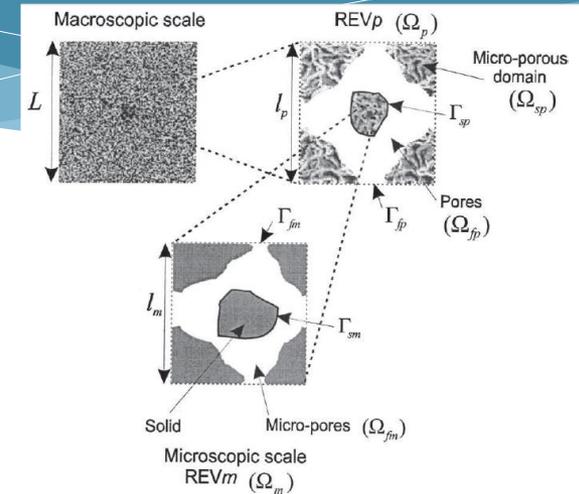
▪ Application générale

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{eq}(\omega) = \left(\frac{1}{\rho_p(\omega)} + \frac{1 - \phi_p}{\rho_m(\omega)} \right)^{-1} \\ K_{eq}(\omega) = \left(\frac{1}{K_p(\omega)} + \frac{(1 - \phi_p)F_d(\omega, \omega_d)}{K_m(\omega)} \right)^{-1} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega \ll \omega_d \Rightarrow F_d \approx 1 \\ \omega \approx \omega_d \Rightarrow F_d \in [0; 1] \\ \omega \gg \omega_d \Rightarrow F_d \approx 0 \end{array} \right.$$

▪ Application aux poreux perforés [Sgard et al, 2005]

▪ Application aux matériaux composites [Gourdon et Seppi, 2010]

○ Distribution de porosité [Horoshenkov et al., 2001]



-> Distrib. Arbitraire:

$$F(\omega) = -\frac{j\omega\rho_0\alpha_\infty I(\omega)}{\sigma\phi(1 - I(\omega))}$$

$$I(\omega) = 1 - \frac{j\omega\rho_0}{\mu} \int_0^{+\infty} s^2 e(s) \bar{\xi} \left(\sqrt{-j} \sqrt{\frac{\rho_0\omega}{\mu}} s \right) ds$$

-> Distrib. Lognormale:

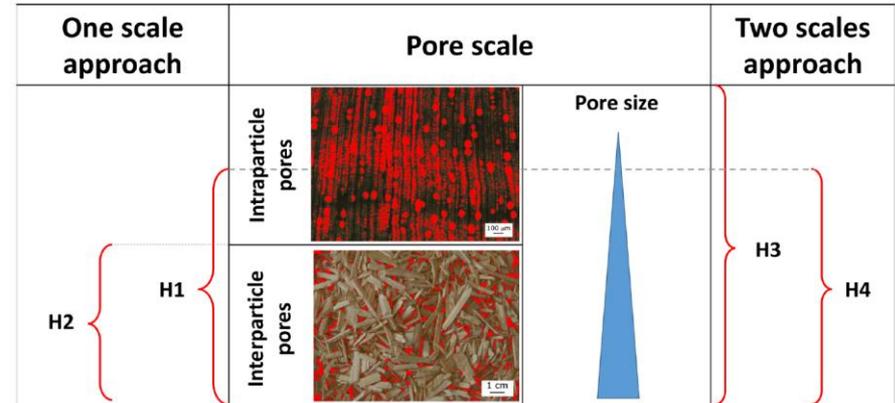
$$\tilde{F}(\omega) = \frac{1 + \theta_2\epsilon(\omega) + \theta_1\epsilon(\omega)^2}{1 + \theta_3\epsilon(\omega)}$$

$$\epsilon(\omega) = \sqrt{\frac{j\omega\rho_0\alpha_\infty}{\sigma\phi}}$$

- Principe utilisé [Glé et al 2021]
 - Domaine visqueux pores intra
 - Fort contraste de perméabilité

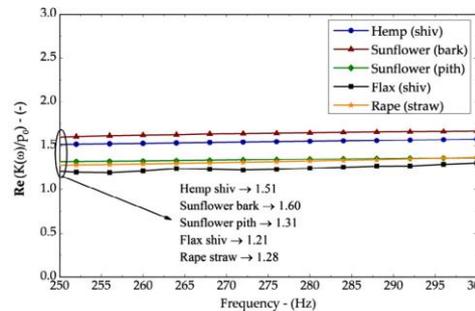
$$\rho = \left[\frac{1}{\rho_{inter}} + (1 - \phi_{inter}) \frac{1}{\rho_{intra}} \right]^{-1} \approx \rho_{inter}$$

$$K = \left[\frac{1}{K_{inter}} + (1 - \phi_{inter}) \frac{F_d(\omega)}{K_{intra}} \right]^{-1} \approx K_{inter}$$

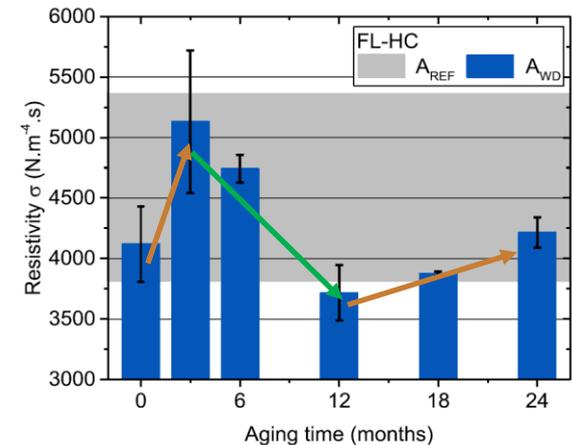


○ Applications

- Evaluation de la porosité interparticule [Chabriac et al 2016]



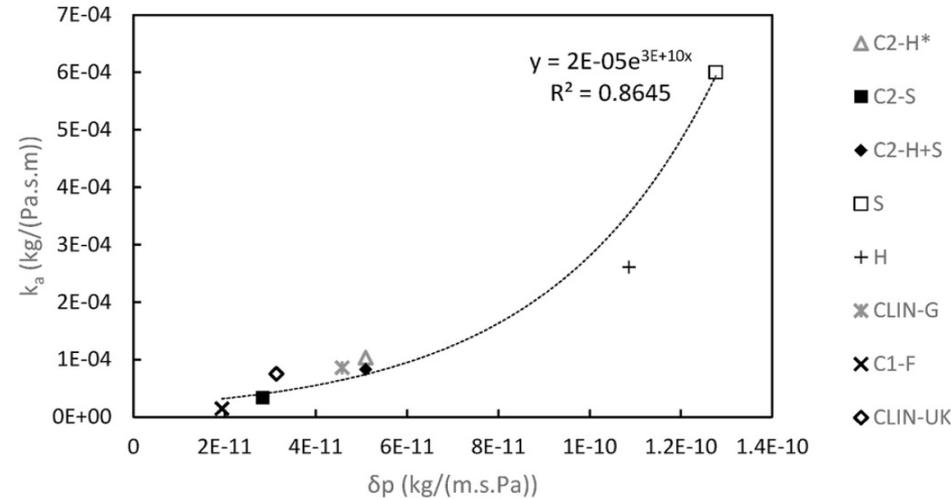
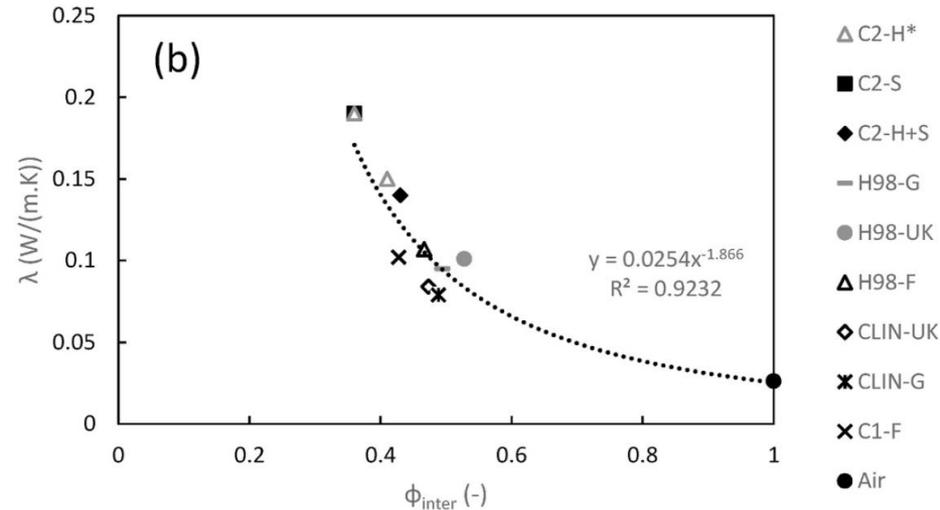
- Suivi du vieillissement des matériaux [Delannoy et al, 2019]
 - Mise en évidence de l'effet de la dégradation du végétal
 - Mise en évidence de l'effet de la prise



Travaux de [Abbas et al 2021]

Conductivité thermique et porosité 'acoustique'

Perméabilités à la vapeur d'eau et à l'air



[Lichtenecker's formula]

$$\lambda = \left(\Phi_{inter} \cdot \lambda_{air}^\alpha + (1 - \Phi_{inter}) \cdot \lambda_{solid}^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

[Zakri et al., 1998]

Relation non linéaire en évidence: $k_a = 2 \cdot 10^{-5} \cdot e^{3 \cdot 10^{10} \cdot \delta p}$

- Perm. vapeur d'eau: Loi de Fick (diffusion)
- Perm. air: Loi de Darcy (écoulement)

⇒ $\lambda \approx \Phi_{inter}^{\frac{1}{\alpha}} \lambda_{air}$ avec $\alpha = -0,54 \in [-1, 1]$

⇒ Prédominance de l'effet des plus larges pores

⇒ Prédominance de l'effet des plus larges pores
[Walker et al, 2014]

○ 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

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

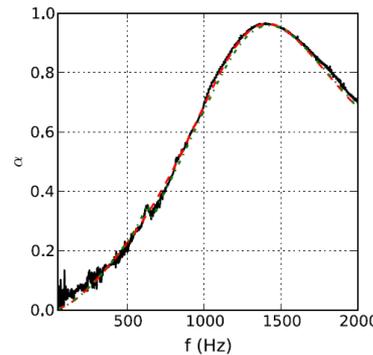
■ Fréquence ¼ (et ½) onde :

- Compression du solide

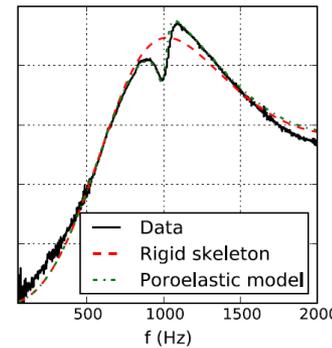
$$f_r = \frac{1}{4e} \sqrt{\frac{\Re(K_c)}{\rho_v}} \quad \text{avec} \quad K_c = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

○ En pratique

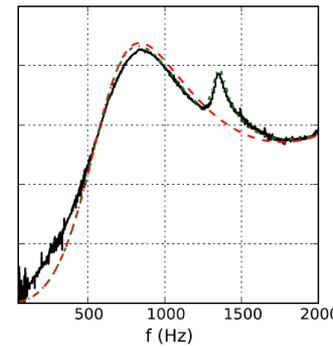
- Estimation du module d'Young par mesure d'abs.



a) 219 kg.m⁻³



b) 290 kg.m⁻³



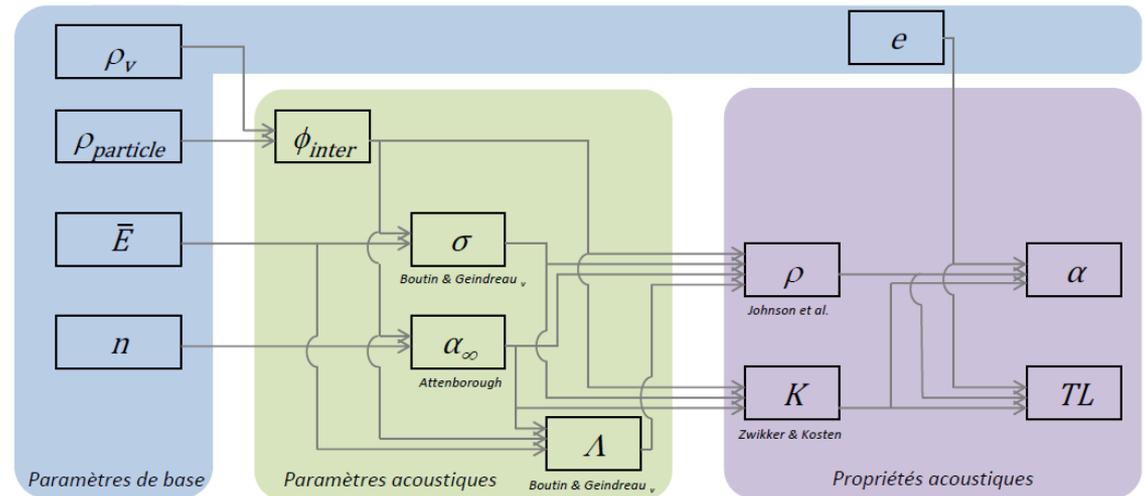
c) 330 kg.m⁻³

Quels leviers d'optimisation?

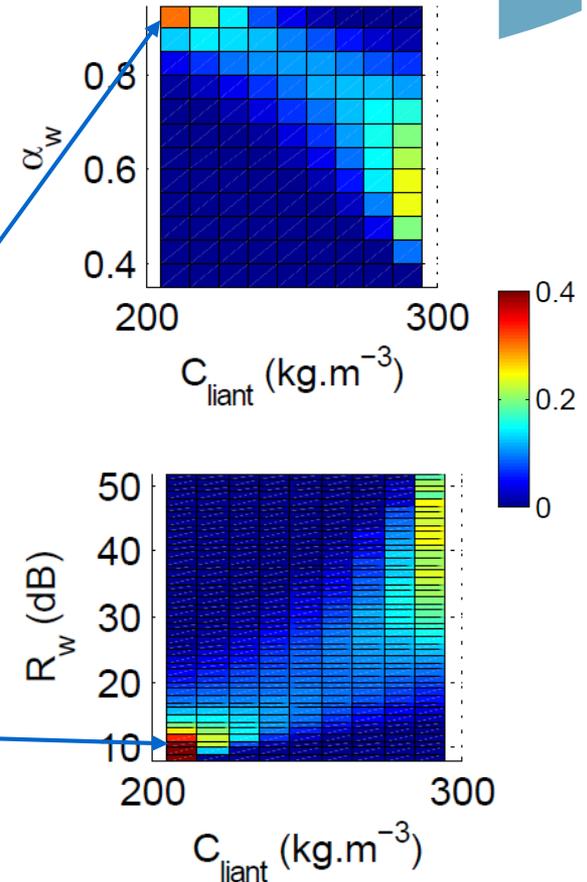
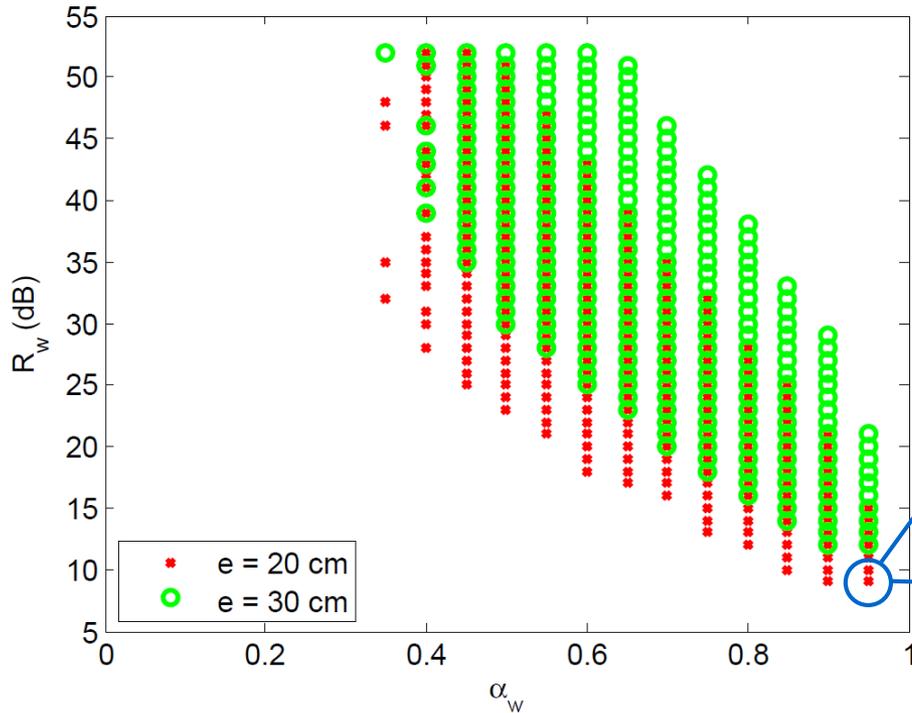
- Choix des matières premières
 - Granulométrie chanvre
 - Type de liant
- Choix de la mise en œuvre
 - Compacité
 - Dosage en liant

Paramètres	Gamme [min ; max]	Unité
$C_{chanvre}$	[100 ; 150]	$kg.m^{-3}$
$\rho_{particule}$	[400 ; 600]	$kg.m^{-3}$
\bar{E}	[0,2 ; 0,5]	mm
n	[2 ; 3]	
C_{liant}	[0 ; 900]	$kg.m^{-3}$
$\rho_{apparent\ liant}$	[1000 ; 2000]	$kg.m^{-3}$

→ Conception de matériau sur mesure

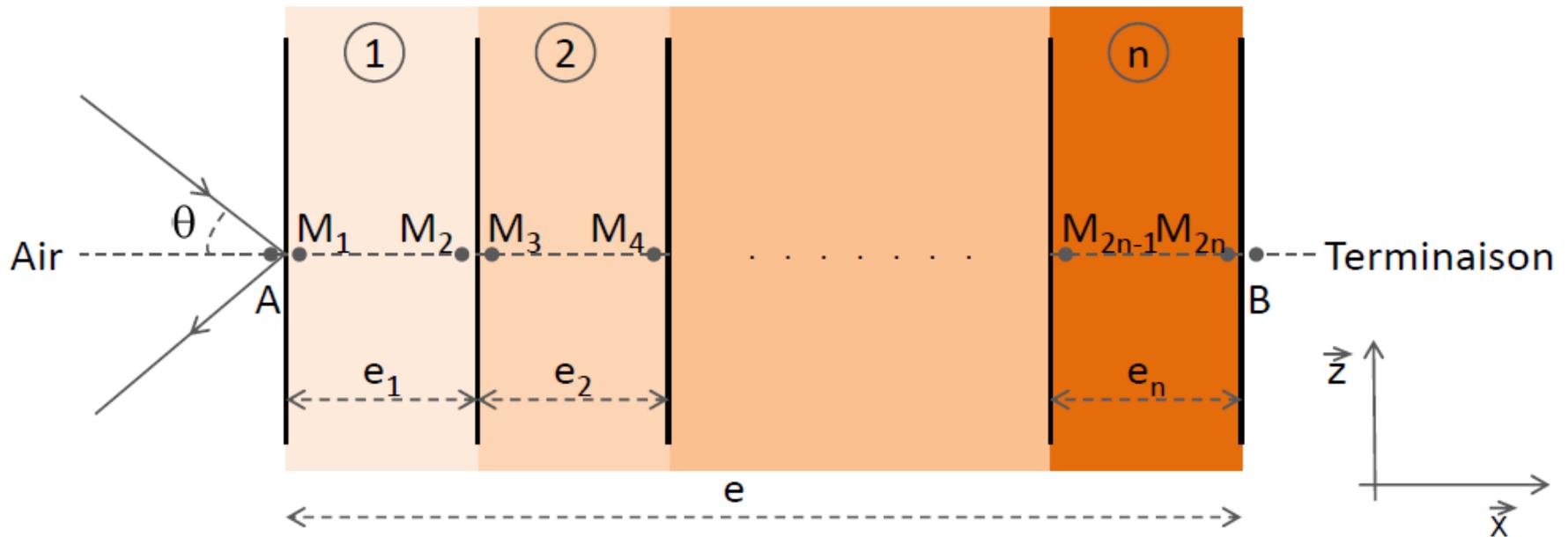


○ Gamme de performances et jeux de associés



Théorie: méthode TMM

$$\mathbf{V}(M_{2i-1}) = [T_i] \mathbf{V}(M_{2i})$$



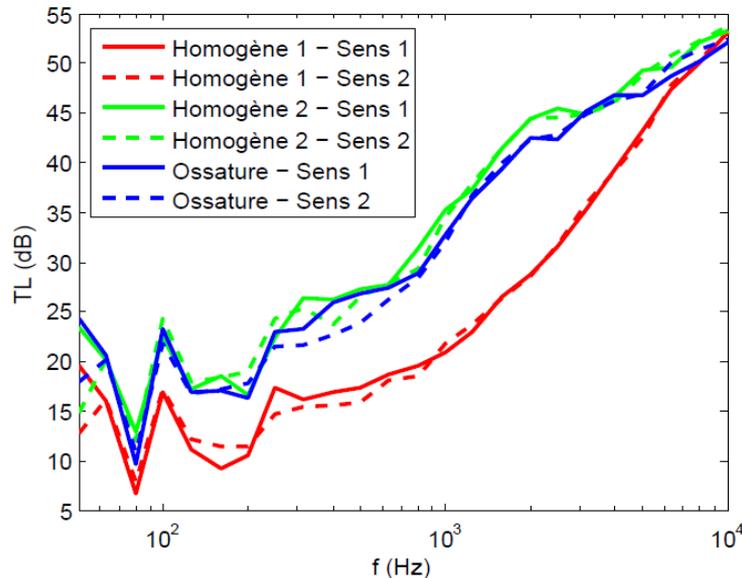
V : description des champs de vitesse, pression et/ou contrainte en un point donné

T_i : matrice de transfert de la couche i (différente forme selon nature solide, fluide équivalent, poroélastique, ...)

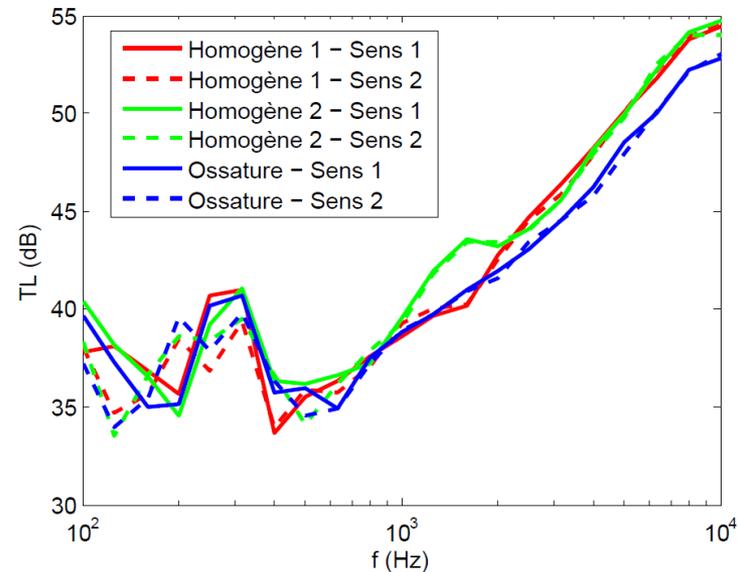
Pratique: Application aux bétons de chanvre enduits: [Bütschi et al., 2004], [Glé, 2013]



$R_w \approx 30$ dB



$R_w \approx 40$ dB



→ Possibilité de mettre en œuvre un gradient de propriétés [De Ryck et al., 2008]

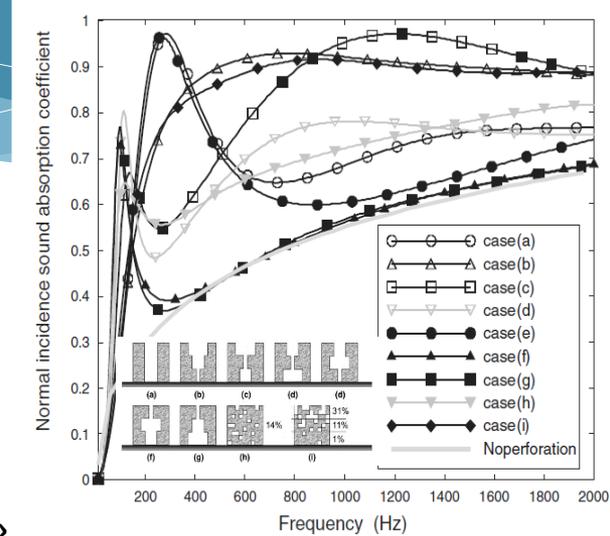
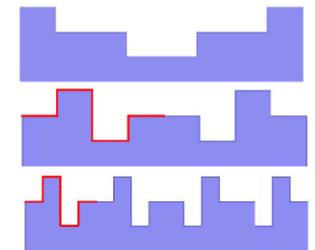
- Perforations: [Olny & Boutin, 2003], [Sgard *et al.*, 2005]
« Diffusion de pression des mesopores vers les micropores »

- Localisation: [Sapoval *et al.*, 1997], [Félix *et al.*, 2007]
« Localisation de modes acoustiques au niveau des irrégularités »

→ Application au béton de bois: [Colas, 2004]

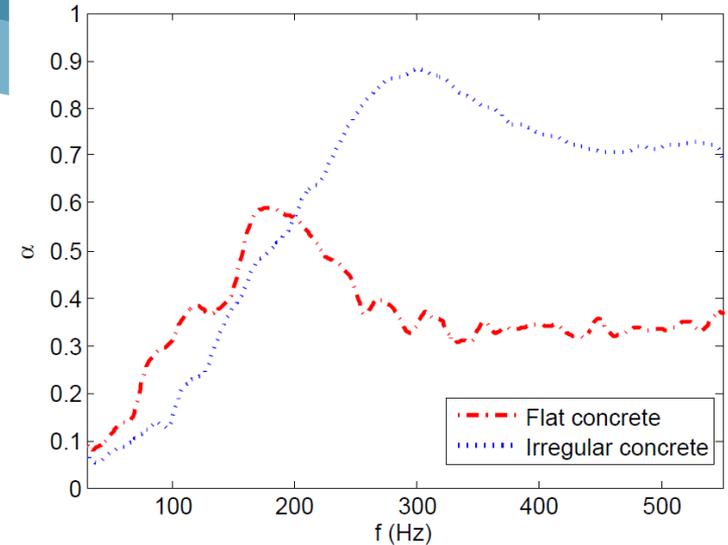


→ Application au béton de chanvre: [Debrabant, 2010]



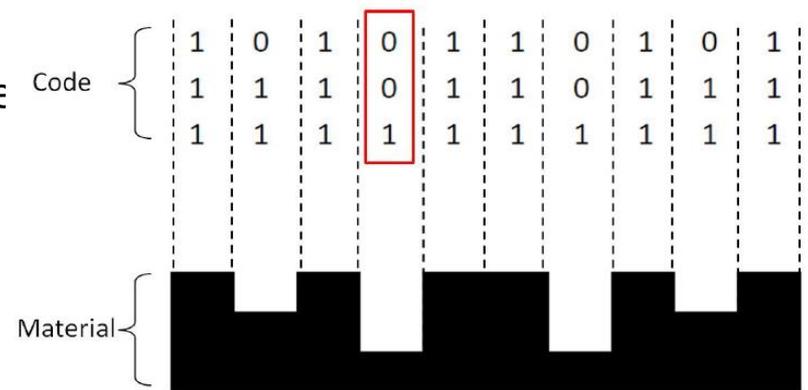
- Bétons de chanvre irréguliers [Debrabant, 2010]

→ Test de formes arbitraires



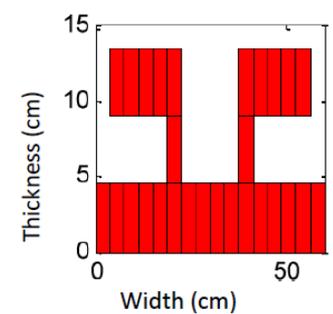
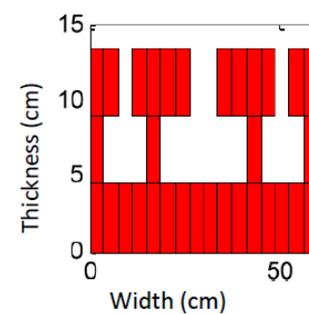
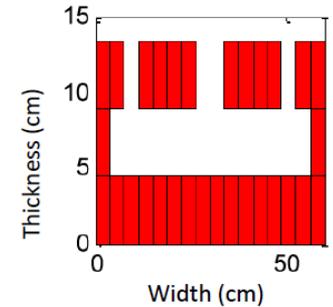
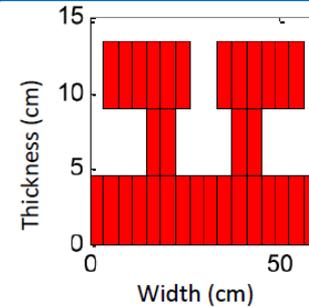
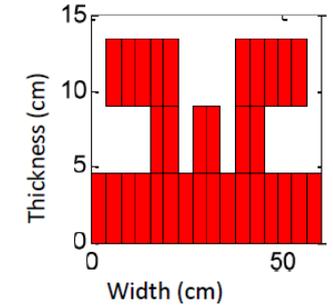
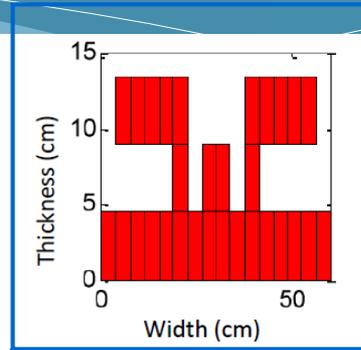
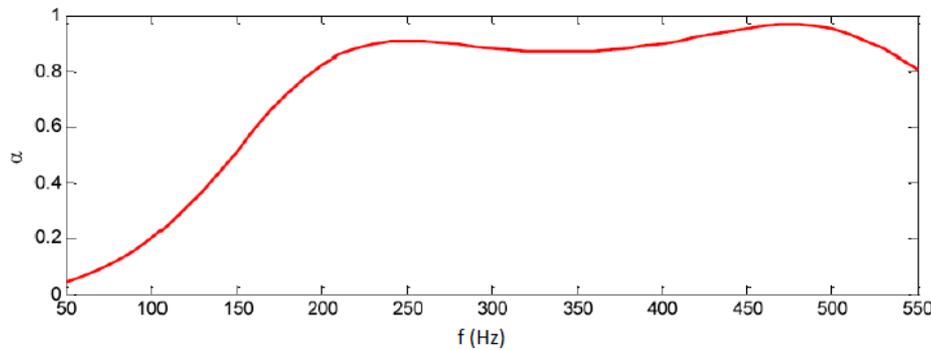
→ Recherche d'optimaux par algo. génétique

- Incidence normale
- $\max(\int_{50\text{Hz}}^{550\text{Hz}} \alpha(f) df)$
- Contraintes:
 - Symétrie axiale
 - Forme créneaux, ou libre

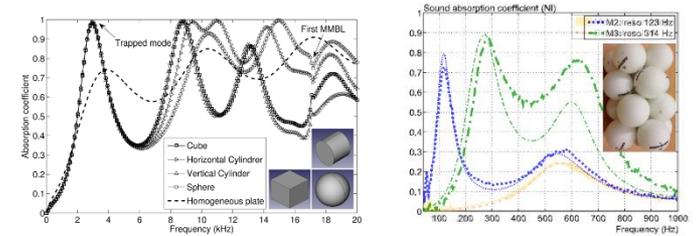


→ Géométries optimales

- Apparition de résonateurs
- Plage d'absorption BF très performante



- Potentiel gain de performance (absorption, affaiblissement) par ajout d'inclusions solides ou résonantes
 - [Groby et al., 2013]
 - [Boutin et Bécot, 2014]



- Les « bétons végétaux », des matériaux hôtes pertinents (fabrication, propriétés)

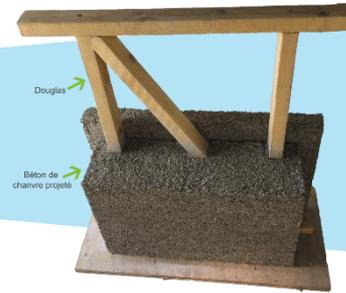
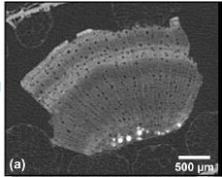
- Des métamatériaux / des cristaux phononiques naturels?
 - Bambou: [Lagarigue, 2013]
 - Roseaux: [Oldham et al., 2011]
- La souplesse d'un domaine en pleine évolution



Et c'est fini !

Merci pour votre attention...

... et si vous cherchez des sujets d'études: en voici qqs uns ;-)



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

- 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,