

# Absorption acoustique d'enveloppes végétalisées

**Bertrand Dubus<sup>1</sup>, Emmanuel Attal<sup>1,2</sup>, Nicolas Côté<sup>3</sup>**

*1) IEMN ISEN, UMR CNRS 8520, Lille*

*2) Université Bourgogne-Franche Comté, Institut FEMTO-ST UMR 6174, Besançon*

*3) Wavely SAS, Villeneuve d'Ascq, France*



11-12 Mars 2020 Lille



# Contexte et objectifs

- Les bâtiments et les chaussées sont constituées de matériaux rigides et peu absorbants sur le plan acoustique (béton, brique, bitume, verre...).
- L'abondance de ces matériaux en ville contribue notablement à l'environnement sonore urbain.
- L'absorption acoustique des enveloppes végétalisées peut permettre d'améliorer la qualité sonore perçue quand elle est mise en œuvre sur une échelle suffisamment grande.

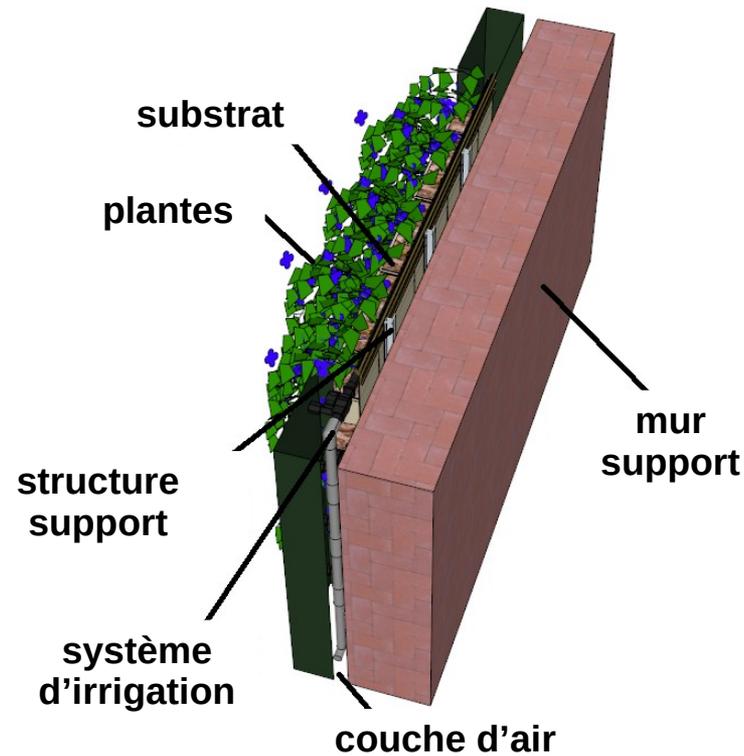
*N.H. Wong et al, Build Environ. 45, 2010.*

*T. van Renterghem et al, Proc. Euronoise, 2012.*

*T. van Renterghem et al, Build Environ. 61, 2013.*



# Contexte et objectifs



## Schéma d'un mur végétalisé

# Contexte et objectifs

- Caractérisations acoustiques des plantes et substrats en laboratoire :
    - L'absorption acoustique des plantes est faible
    - L'absorption acoustique des substrats peut être élevée  
Elle dépend de la fréquence
    - La présence de plantes peut améliorer dans certains cas l'absorption acoustique par le substrat
- K.V. Horoshenkov et al, J. Acoust. Soc. Am. 133, 2013.*

# Contexte et objectifs

- Caractérisations acoustiques des plantes et substrats en laboratoire :

- L'absorption acoustique des plantes est faible
- L'absorption acoustique des substrats peut être élevée  
Elle dépend de la fréquence
- La présence de plantes peut améliorer dans certains cas l'absorption acoustique par le substrat

*K.V. Horoshenkov et al, J. Acoust. Soc. Am. 133, 2013.*

- Effet de l'humidité sur les propriétés acoustiques des substrats :

- L'absorption acoustique des substrats organiques est réduite en présence d'humidité
- L'humidité a peu d'effet sur les propriétés acoustiques des substrats minéraux

*C. Cheal et al, Forum Acusticum, 2011.*

*H. Benkreira et al, Eurodrying, 2011.*

*H.-S. Yang et al, Acta Acust. Acust. 99, 2013.*

*M. Connelly, M. Hodgson, Build. Environ. 92, 2015.*

# Sommaire

- Contexte et objectifs
- Outils et méthodes
  - . Préparation des échantillons
  - . Méthode de mesure
  - . Méthode de simulation
- Résultats
  - . Absorption acoustique des plantes
  - . Absorption acoustique de substrats minéraux et organiques secs et humides
  - . Absorption acoustique des enveloppes végétalisées
- Conclusion

# Outils et méthodes

## Préparation des échantillons



plante : fusain japonais  
porosité entre 95 et 99%



substrat organique :  
tourbe de coco  
sèche ou humide



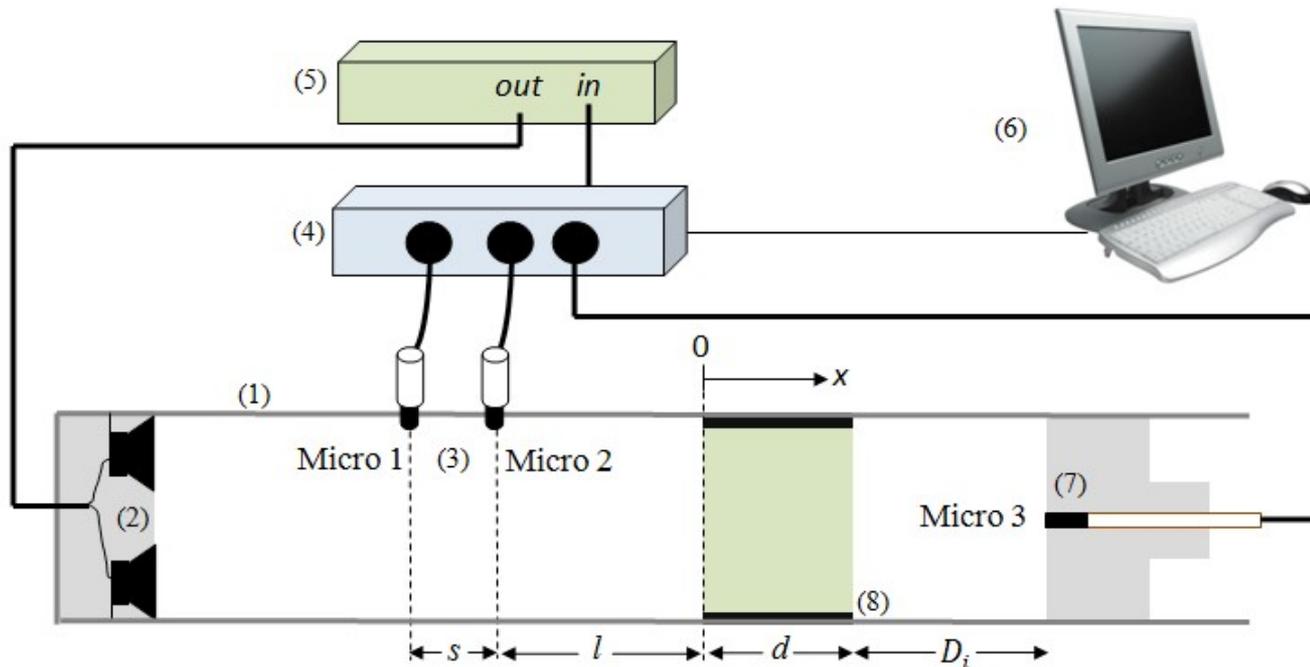
substrat minéral :  
perlite  
sèche ou humide

$$\text{porosité} = \frac{\text{volume de plantes mesuré par variation de hauteur d'eau dans une éprouvette graduée}}{\text{volume interne du porte échantillon}}$$

$$\text{taux d'humidité} = \frac{\text{masse d'eau ajoutée}}{\text{masse du substrat sec}}$$

# Outils et méthodes

## Caractérisation des échantillons



### Tube d'impédance (100-1000 Hz) – méthode 3-microphones 2-cavités

*H. Utsuno et al, J. Acoust. Soc. Am. 86, (1989)*

*O. Doutres et al, Appl. Acoust. 71, (2010)*

*Y. Salissou et al, J. Acoust. Soc. Am. 131, (2012)*

# Outils et méthodes

6 mesures de pression → matrice de transfert de l'échantillon [  $T$  ]

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11}(\omega) & T_{12}(\omega) \\ T_{21}(\omega) & T_{22}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kd) & jZ_c \sin(kd) \\ \frac{j \sin(kd)}{Z_c} & \cos(kd) \end{bmatrix}$$

# Outils et méthodes

6 mesures de pression → matrice de transfert de l'échantillon [  $T$  ]

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11}(\omega) & T_{12}(\omega) \\ T_{21}(\omega) & T_{22}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kd) & jZ_c \sin(kd) \\ \frac{j \sin(kd)}{Z_c} & \cos(kd) \end{bmatrix}$$

**Vitesse du son effective  
du milieu**

$$c(\omega) = \frac{\omega d}{\arccos(T_{21}(\omega d))}$$

**Coefficient d'absorption de l'échantillon  
en condition arrière rigide**

$$\alpha(\omega) = 1 - \left| \frac{T_{11}(\omega) - Z_0 T_{21}(\omega)}{T_{11}(\omega) + Z_0 T_{21}(\omega)} \right|^2$$

**Impédance caractéristique effective  
du milieu**

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{T_{12}(\omega)}{T_{21}(\omega)}}$$

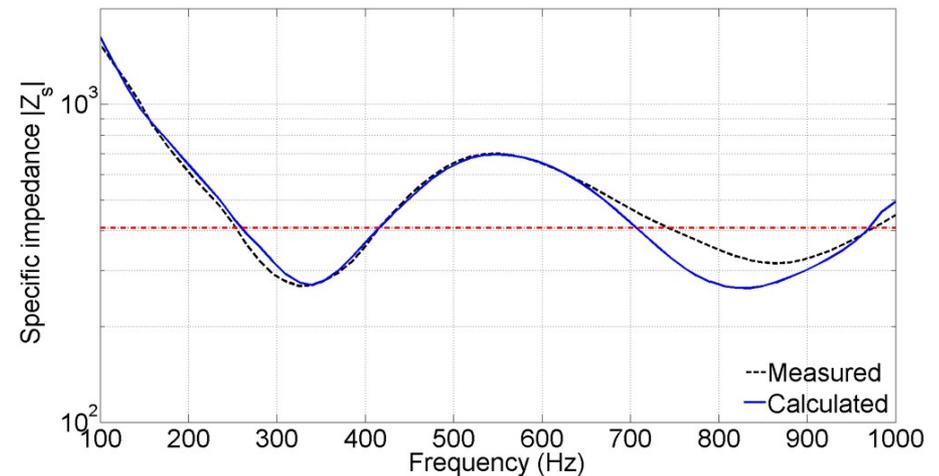
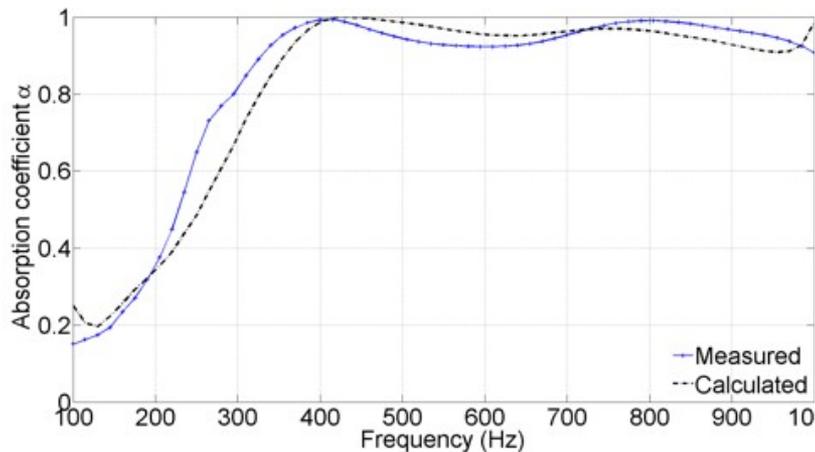
**Impédance de surface de l'échantillon  
en condition arrière rigide**

$$Z_s(\omega) = \frac{T_{11}(\omega)}{T_{21}(\omega)}$$

# Outils et méthodes

## Simulation d'enveloppes végétalisées multicouches

- 1) Matrices [ T ] des couches de plantes ou de substrats mesurées
- 2) Matrice [ T<sub>tot</sub> ] du multicouche calculée par produit des matrices
- 3) Coefficient d'absorption et impédance de surface calculée à partir de [ T<sub>tot</sub> ]

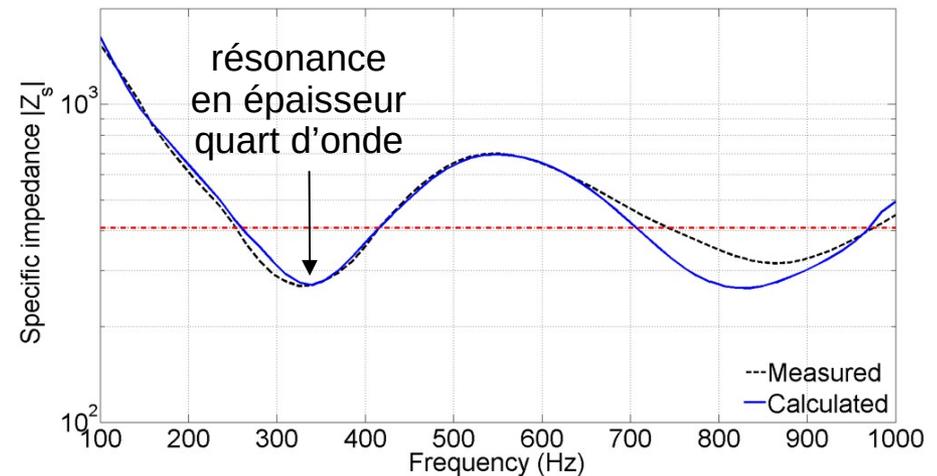
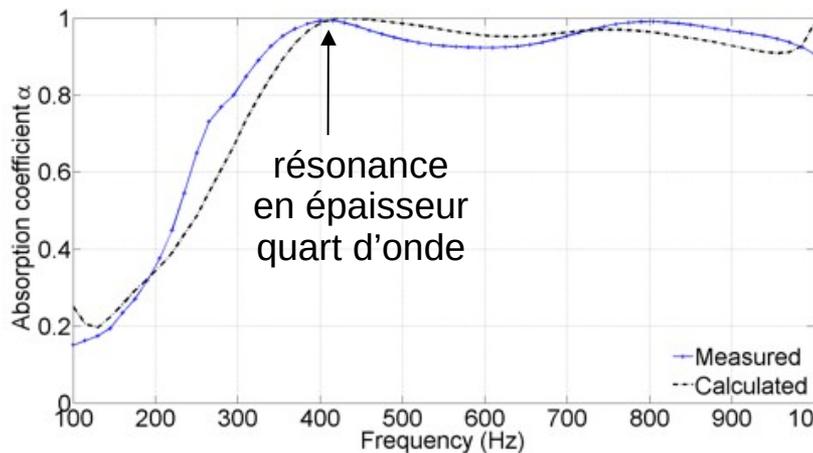


Enveloppe végétalisée : fusain (8 cm) – perlite (8 cm)

# Outils et méthodes

## Simulation d'enveloppes végétalisées multicouches

- 1) Matrices [ T ] des couches de plantes ou de substrats mesurées
- 2) Matrice [ T<sub>tot</sub> ] du multicouche calculée par produit des matrices
- 3) Coefficient d'absorption et impédance de surface calculée à partir de [ T<sub>tot</sub> ]

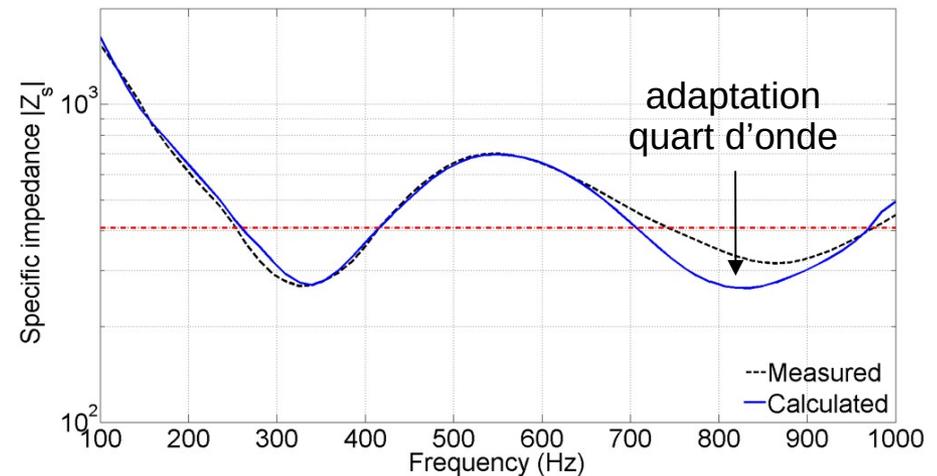
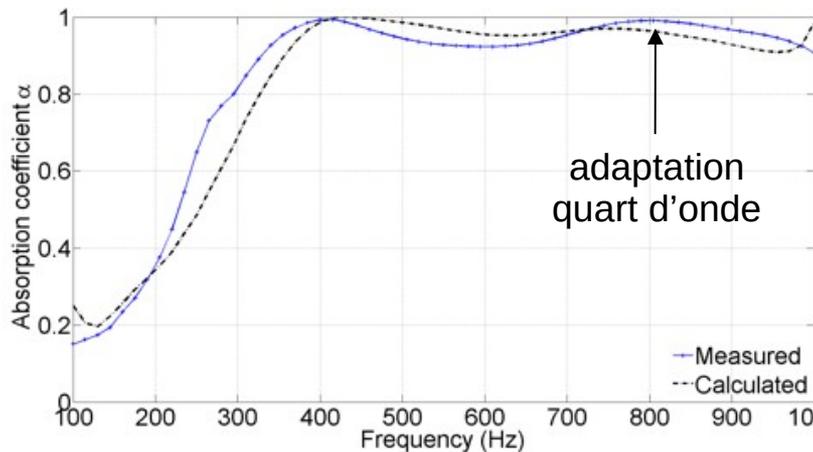


Enveloppe végétalisée : fusain (8 cm) – perlite (8 cm)

# Outils et méthodes

## Simulation d'enveloppes végétalisées multicouches

- 1) Matrices [  $T$  ] des couches de plantes ou de substrats mesurées
- 2) Matrice [  $T_{\text{tot}}$  ] du multicouche calculée par produit des matrices
- 3) Coefficient d'absorption et impédance de surface calculée à partir de [  $T_{\text{tot}}$  ]



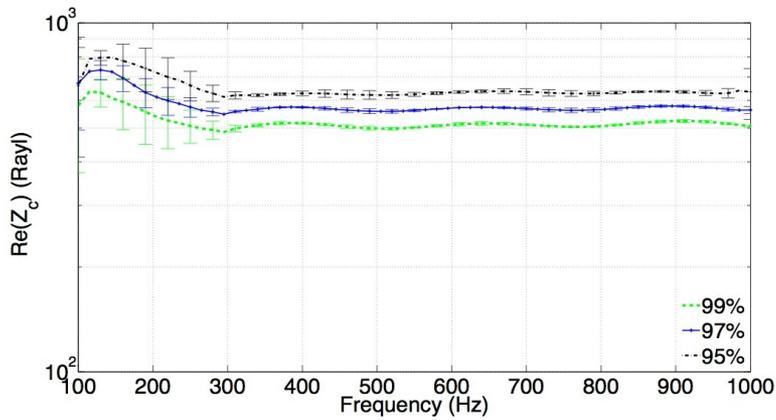
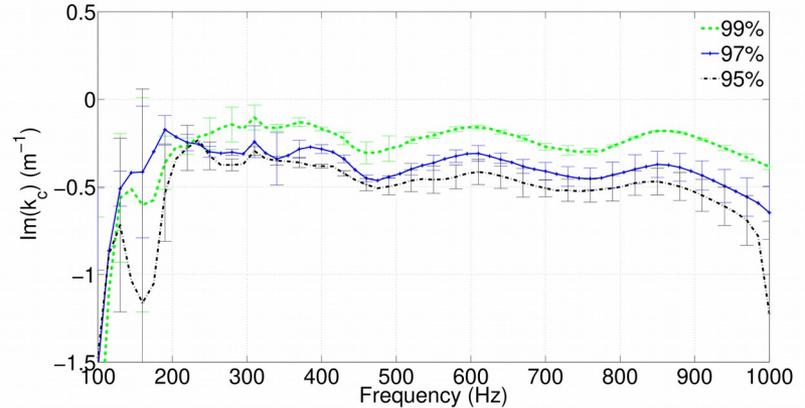
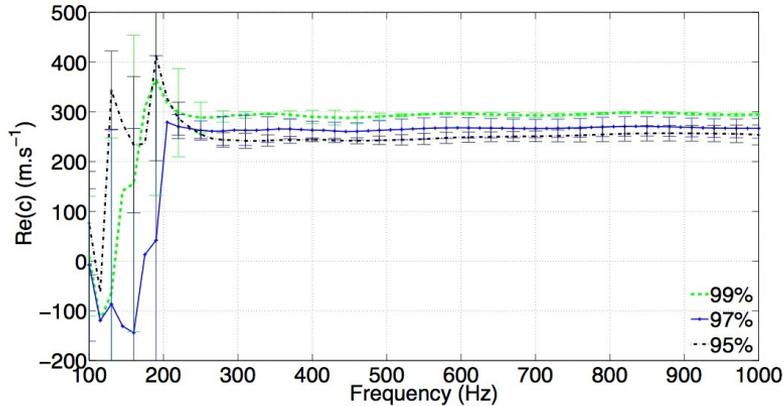
Enveloppe végétalisée : fusain (8 cm) – perlite (8 cm)

# Sommaire

- Contexte et objectifs
- Outils et méthodes
  - . Préparation des échantillons
  - . Méthode de mesure
  - . Méthode de simulation
- Résultats
  - . Absorption acoustique des plantes
  - . Absorption acoustique de substrats minéraux et organiques secs et humides
  - . Absorption acoustique des enveloppes végétalisées
- Conclusion

# Résultats (plantes)

## Effet de la porosité

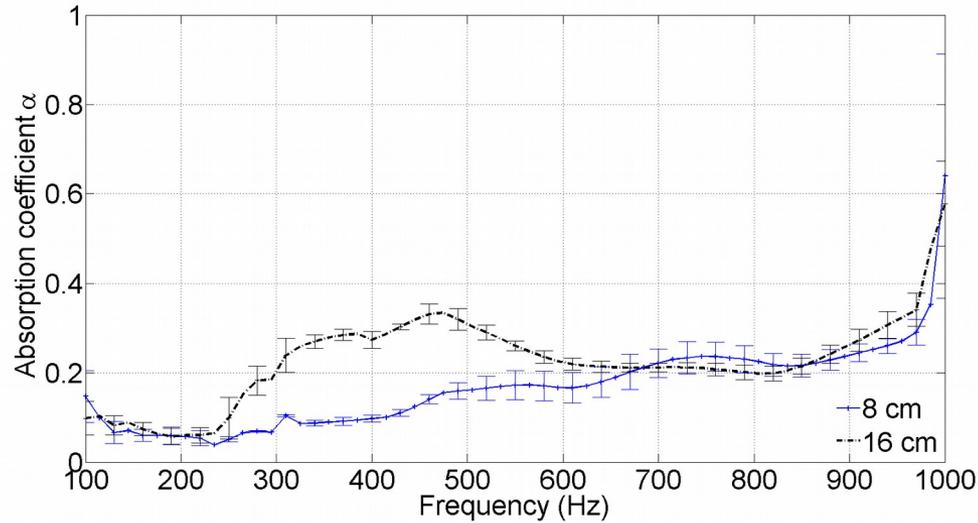


## Fusain japonais

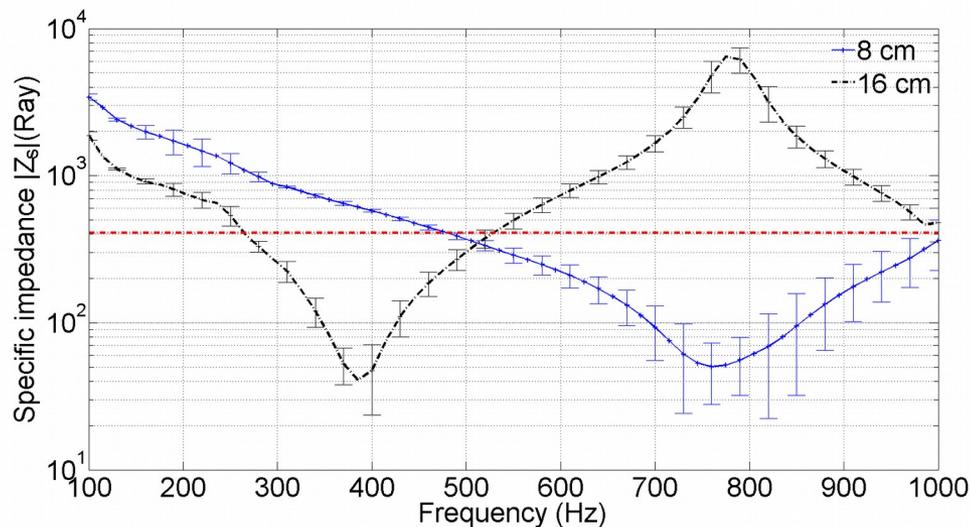


- Milieu non dispersif au dessus de 300 Hz
- Vitesse du son inférieure à celle de l'air augmentant légèrement avec la porosité
- Impédance caractéristique supérieure à celle de l'air diminuant avec la porosité
- Atténuation inférieure à  $1 m^{-1}$

# Résultats (plantes)



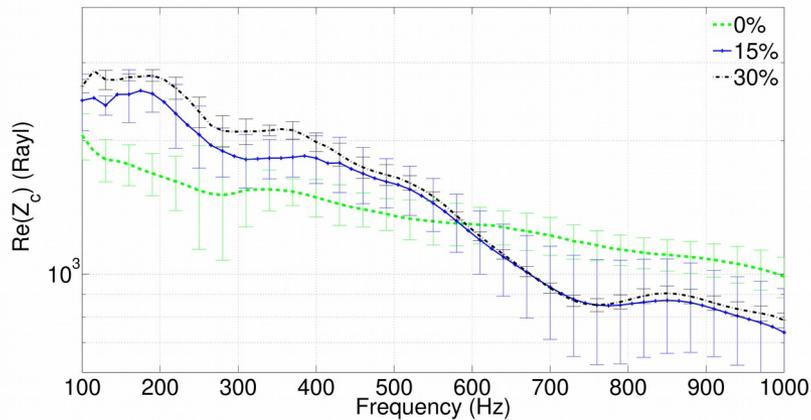
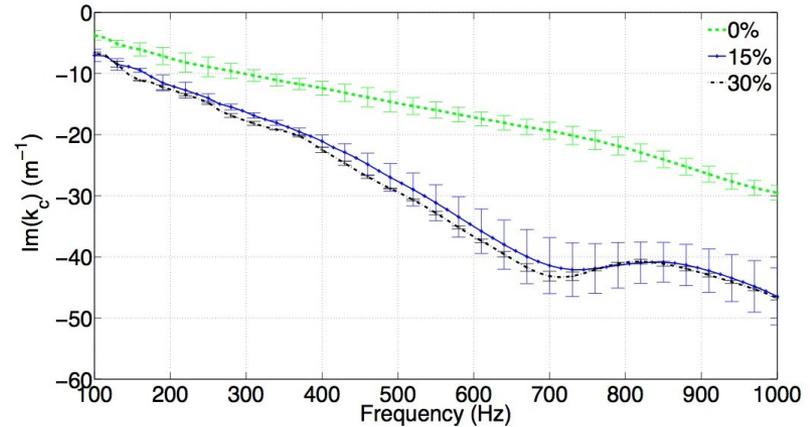
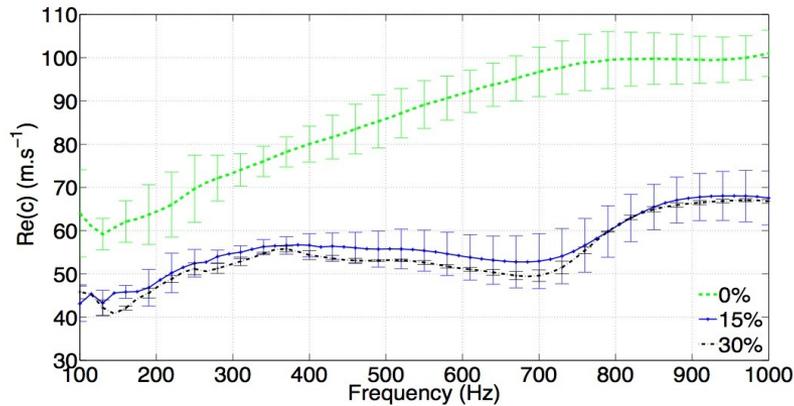
**Fusain japonais**  
porosité de 95 %



- Coefficient d'absorption inférieur à 0,4
- Maxima du coefficient d'absorption coïncidant avec des minima de l'impédance de surface (résonance en épaisseur de l'échantillon)

# Résultats (substrat organique)

## Effet de l'humidité



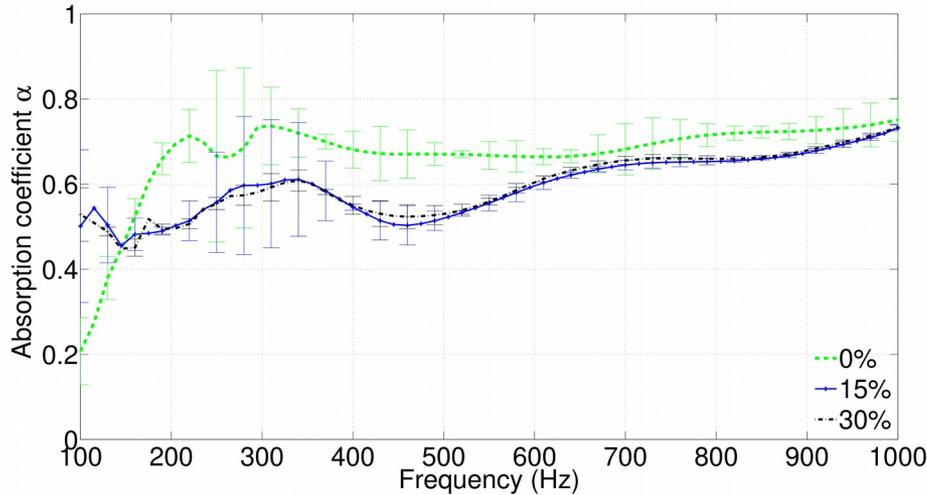
## Tourbe de coco



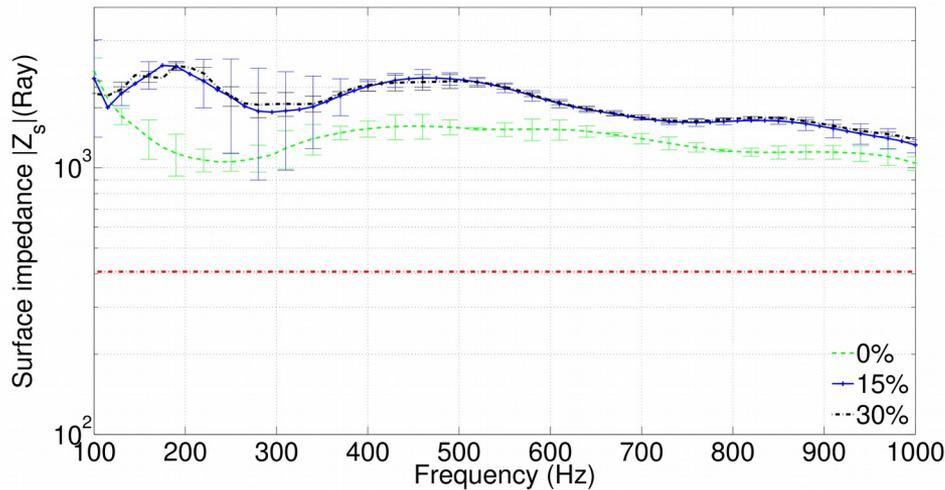
- Milieu dispersif de vitesse du son très inférieure à celle de l'air ou des plantes
- Diminution de la vitesse du son en présence d'humidité
- Augmentation de l'atténuation en présence d'humidité
- Impédance caractéristique très supérieure à celle de l'air
- L'effet de l'humidité dépend de la fréquence

# Résultats (substrat organique)

## Effet de l'humidité



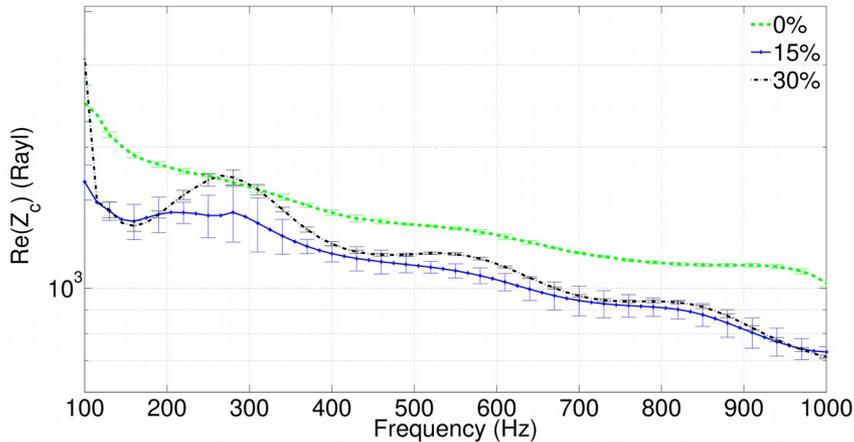
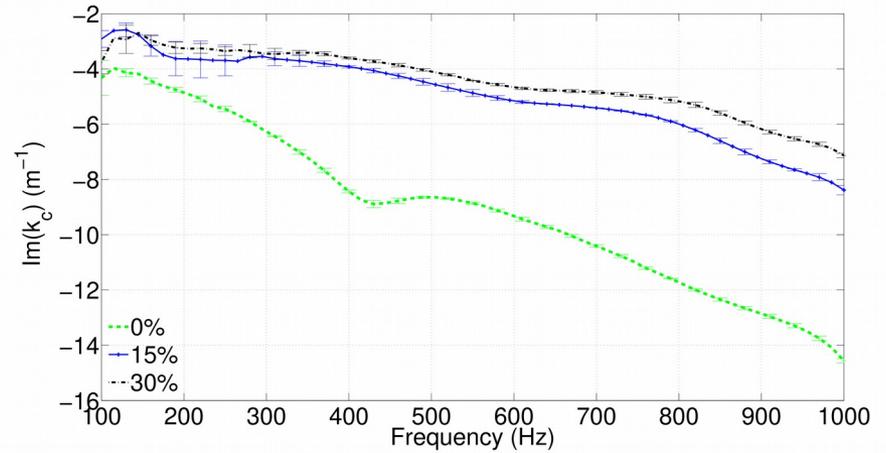
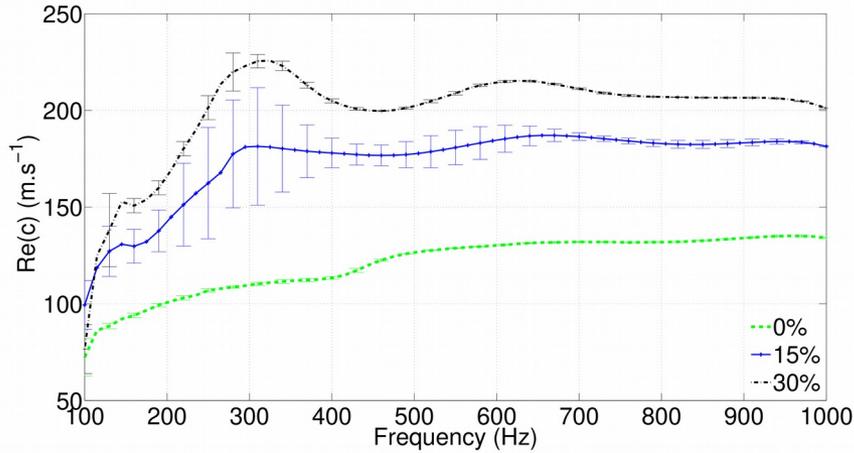
**Tourbe de coco**  
épaisseur 8 cm



- Coefficient d'absorption voisin de 0,6-0,7 variant peu entre 200 et 1000 Hz
- L'humidité réduit légèrement le coefficient d'absorption acoustique
- Pas de résonance marquée sur la courbe d'impédance

# Résultats (substrat minéral)

## Effet de l'humidité



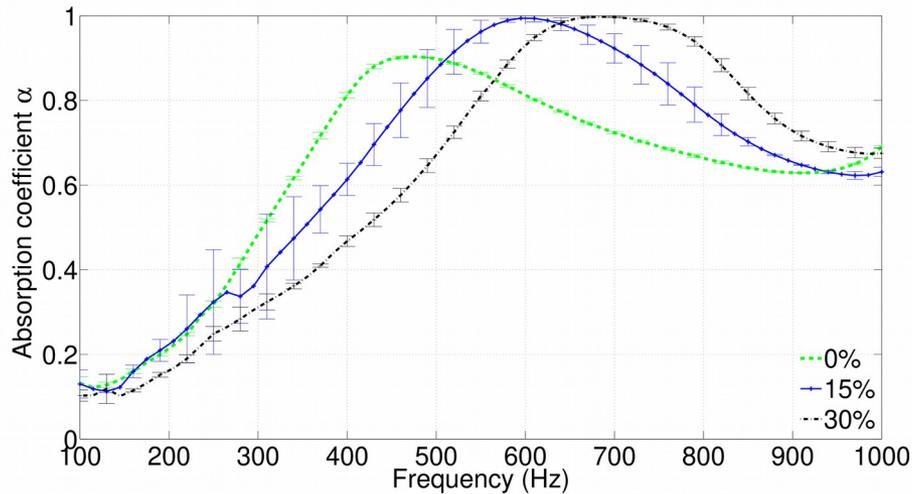
Perlite



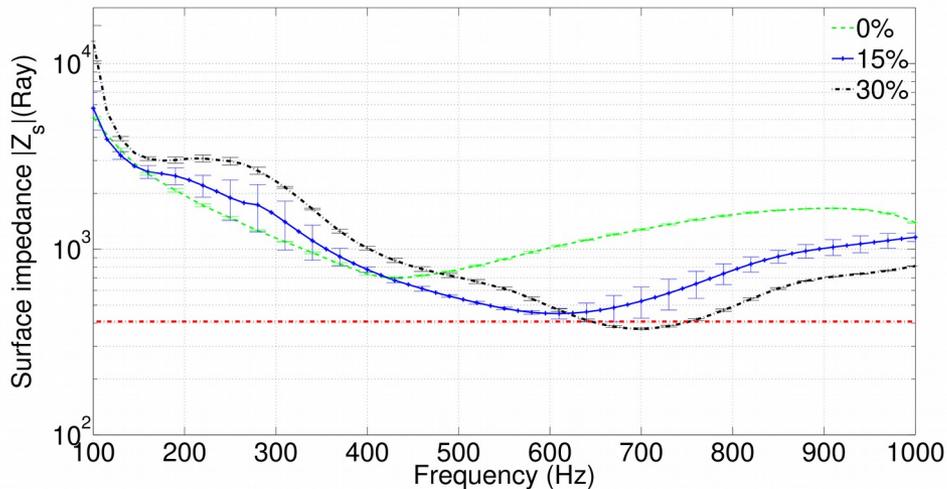
- Milieu dispersif de vitesse du son inférieure à celle de l'air ou des plantes
- Augmentation de la vitesse du son en présence d'humidité
- Diminution de l'atténuation en présence d'humidité
- Impédance caractéristique très supérieure à celle de l'air

# Résultats (substrat minéral)

## Effet de l'humidité



**Perlite**  
épaisseur 8 cm



- Coefficient d'absorption présentant un pic d'absorption voisin de l'ordre de 0,9
- L'humidité décale le pic d'absorption vers les hautes fréquences et améliore l'absorption
- Impédance de surface de l'échantillon adaptée à l'impédance caractéristique de l'air au voisinage de la résonance en épaisseur

# Enveloppes végétalisées

Coefficient d'absorption simulé de différentes architectures

green facade



continuous living wall system



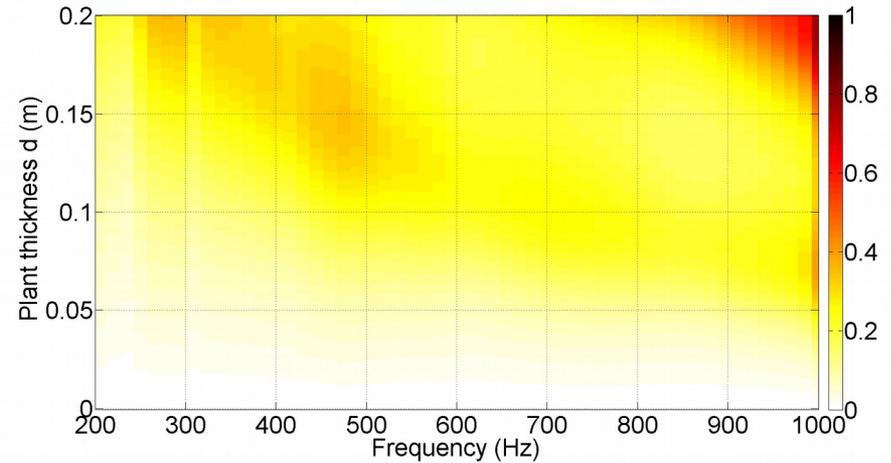
modular living wall system (Type I)



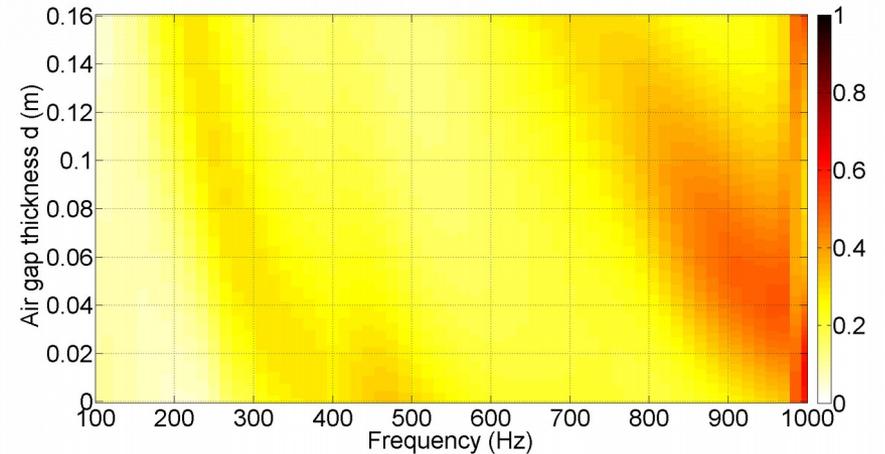
modular living wall system (Type II)



-  plant layer
-  soil layer
-  air layer
-  building wall



« Green facade » épaisseur de fusain variable



« Continuous living wall system » fusain d'épaisseur 16 cm épaisseur du gap d'air variable

# Enveloppes végétalisées

Coefficient d'absorption simulé de différentes architectures

green facade



continuous living wall system



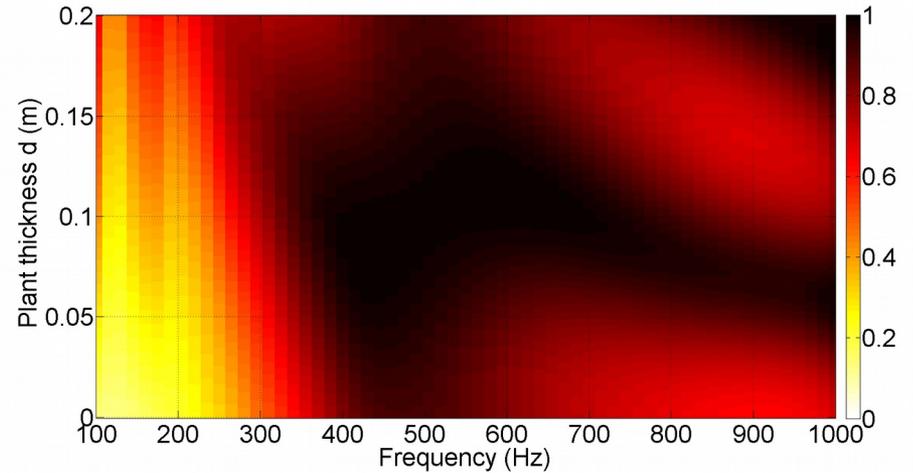
modular living wall system (Type I)



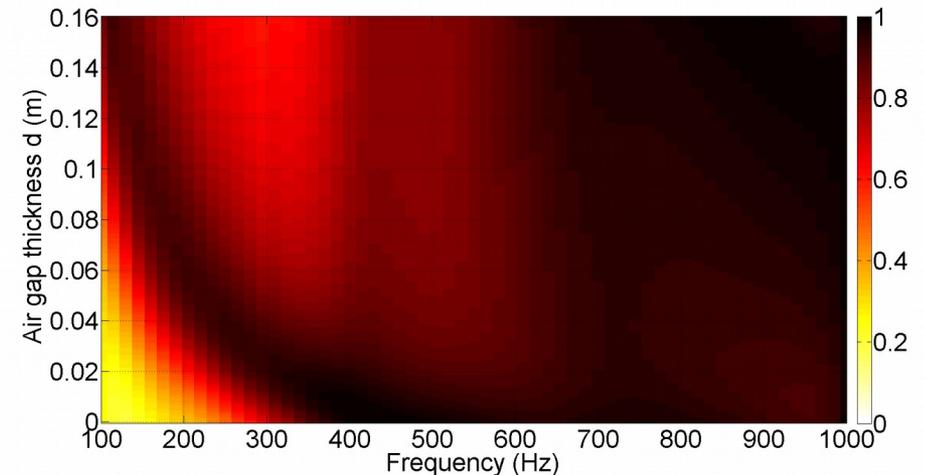
modular living wall system (Type II)



-  plant layer
-  soil layer
-  air layer
-  building wall



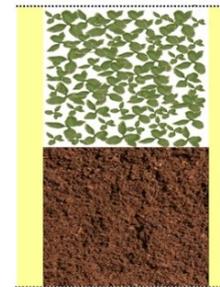
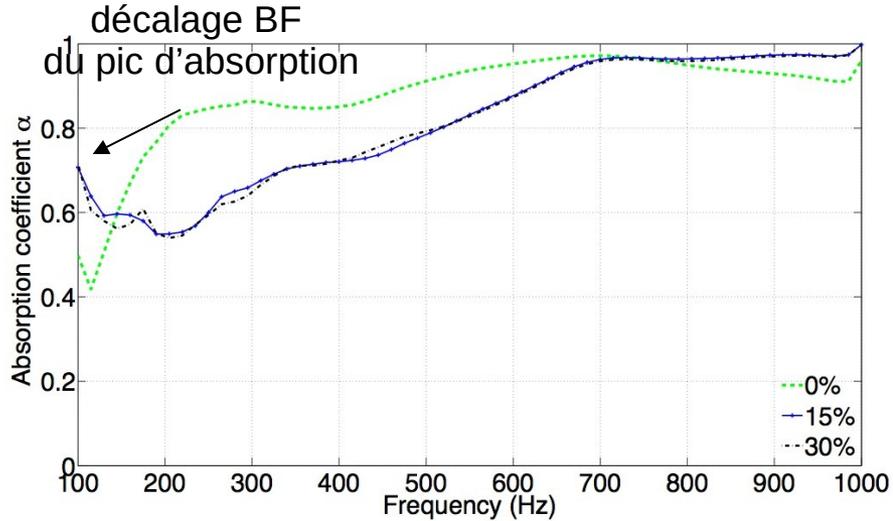
« Modular living wall I » perlite 8cm  
épaisseur de fusain variable



« Modular living wall II » fusain 8 cm perlite 8cm  
épaisseur du gap d'air variable

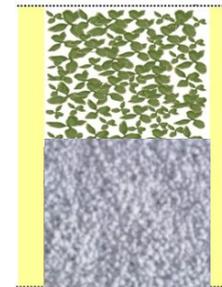
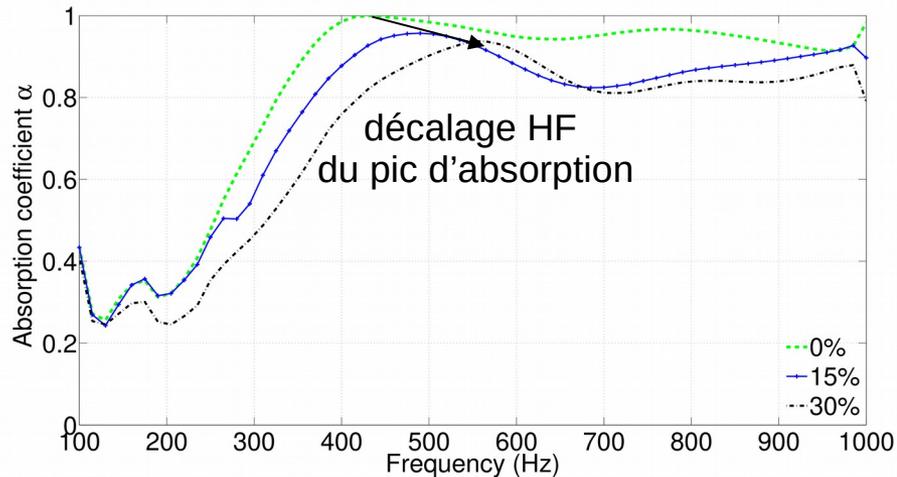
# Enveloppes végétalisées

## Effet de l'humidité



**Fusain (95%)  
épaisseur 8 cm**

**Tourbe de coco  
épaisseur 8 cm**



**Fusain (95%)  
épaisseur 8 cm**

**Perlite  
épaisseur 8 cm**

# Conclusions

- Propriétés effectives des plantes et substrats :
  - plantes : peu de dispersion, faible atténuation, comportement de « gaz lourd »
  - substrats : dispersion importante, atténuation élevée milieux lents et à impédances élevées

# Conclusions

- Propriétés effectives des plantes et substrats :
  - plantes : peu de dispersion, faible atténuation, comportement de « gaz lourd »
  - substrats : dispersion importante, atténuation élevée milieux lents et à impédances élevées
  
- Effet de l'humidité sur les substrats :
  - organiques : atténuation et impédance caractéristiques augmentées absorption acoustique réduite
  - minéraux : atténuation et impédance caractéristique réduites absorption acoustique améliorée

# Conclusions

- Propriétés effectives des plantes et substrats :
  - plantes : peu de dispersion, faible atténuation, comportement de « gaz lourd »
  - substrats : dispersion importante, atténuation élevée milieux lents et à impédances élevées
  
- Effet de l'humidité sur les substrats :
  - organiques : atténuation et impédance caractéristiques augmentées absorption acoustique réduite
  - minéraux : atténuation et impédance caractéristique réduites absorption acoustique améliorée
  
- Absorption acoustique des enveloppes végétalisées :
  - expliquée par les propriétés effectives (plantes, substrats) et les phénomènes d'ondes (résonance, adaptation d'impédance, atténuation)
  - peut être optimisée par une conception spécifique de l'enveloppe

Remerciements : ADEME, Yncréa Hauts-de-France, Région Hauts-de-France