

Propriétés acoustiques et thermiques d'un matériau bio-sourcé

Le béton de chanvre

P. Glé & E. Gourlay

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir



Centre d'Études techniques de l'Équipement de l'Est

Vers des matériaux écologiques et multifonctionnels dans le bâtiment

Constats et mesures

- ▶ Bâtiment : plus grand consommateur d'énergie ($\approx 44\%$ en 2007)
[\[cgd, 2010\]](#)
- ⇒ Grenelle de l'Environnement, Réglementations thermiques (RT 2012)
- ⇒ 440 milliards € \approx 535 000 emplois [\[Grosselin, 2011\]](#)

De nouvelles exigences pour les matériaux

- ▶ Vers des matériaux de plus en plus isolants en thermique
- ▶ Vers des matériaux respectueux de l'environnement
- ▶ Vers des matériaux multifonctionnels

Les matériaux clés

- ▶ Les éco-matériaux, particulièrement les bio-sourcés



Vers des matériaux écologiques et multifonctionnels dans le bâtiment

Constats et mesures

- ▶ Bâtiment : plus grand consommateur d'énergie ($\approx 44\%$ en 2007)
[\[cgd, 2010\]](#)
- ⇒ Grenelle de l'Environnement, Réglementations thermiques (RT 2012)
- ⇒ 440 milliards € \approx 535 000 emplois [\[Grosselin, 2011\]](#)

De nouvelles exigences pour les matériaux

- ▶ Vers des matériaux de plus en plus isolants en thermique
- ▶ Vers des matériaux respectueux de l'environnement
- ▶ Vers des matériaux multifonctionnels

Les matériaux clés

- ▶ Les éco-matériaux, particulièrement les bio-sourcés

Vers des matériaux écologiques et multifonctionnels dans le bâtiment

Constats et mesures

- ▶ Bâtiment : plus grand consommateur d'énergie ($\approx 44\%$ en 2007)
[\[cgd, 2010\]](#)
- ⇒ Grenelle de l'Environnement, Réglementations thermiques (RT 2012)
- ⇒ 440 milliards € \approx 535 000 emplois [\[Grosselin, 2011\]](#)

De nouvelles exigences pour les matériaux

- ▶ Vers des matériaux de plus en plus isolants en thermique
- ▶ Vers des matériaux respectueux de l'environnement
- ▶ Vers des matériaux multifonctionnels

Les matériaux clés

- ▶ Les éco-matériaux, particulièrement les bio-sourcés



Le béton de chanvre

Problématiques

En acoustique

En thermique

Résultats expérimentaux

Effets des constituants

Effet de la mise en œuvre

Modélisation

En acoustique

En thermique

Conclusion



Plan de la présentation

Le béton de chanvre

Problématiques

- En acoustique
- En thermique

Résultats expérimentaux

- Effets des constituants
- Effet de la mise en œuvre

Modélisation

- En acoustique
- En thermique

Conclusion



Un matériau écologique

Les sous produits du chanvre



Plante

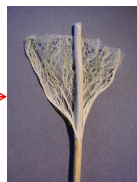


Un matériau écologique

Les sous produits du chanvre



Plante



Tige

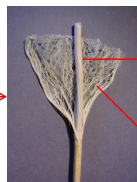


Un matériau écologique

Les sous produits du chanvre



Plante



Tige



Chènevotte



Fibres

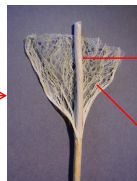


Un matériau écologique

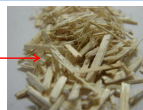
Les sous produits du chanvre



Plante



Tige



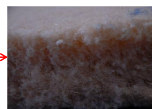
Chènevotte



Béton de chanvre



Fibres

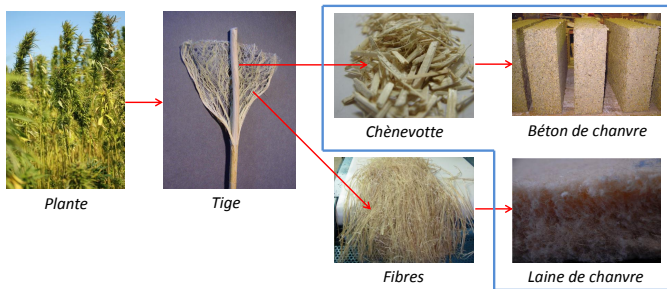


Laine de chanvre



Un matériau écologique

Les sous produits du chanvre



Réalisations en béton de chanvre



⇒ 1 m² stocke 35 kg de CO₂ sur 100 ans (ACV [Boutin et al., 2005])

Formulations & applications

Modes de mise en œuvre



Banchage



Préfabrication



Projection

[Bevan & Woolley, 2008]

Dosages et applications

Formulation		Toit	Mur	Enduit	Sol
Dosages ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Chanvre	100	100	100	100
	Eau	100	220	800	275
	Liant	200	350	500	500
ρ_{stab} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		250	420	800	500
E_{28j} (MPa)		>3	>15	>20	>15
Rc_{28j} (MPa)		>0,05	>0,2	>0,3	>0,3

Formulations règles professionnelles [reg, 2006]

Plan de la présentation

Le béton de chanvre

Problématiques

En acoustique

En thermique

Résultats expérimentaux

Effets des constituants

Effet de la mise en œuvre

Modélisation

En acoustique

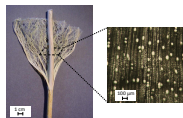
En thermique

Conclusion



Spécificités du béton de chanvre

Des particules poreuses



Un matériau anisotrope

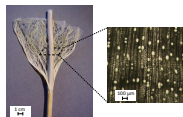
Données de [\[Ceyte, 2008\]](#) :

Longueur (<i>mm</i>)	4-9
Largeur (<i>mm</i>)	1-2.5
Épaisseur (<i>mm</i>)	≈0.5

Distribution de taille de particules

Spécificités du béton de chanvre

Des particules poreuses



Un matériau anisotrope



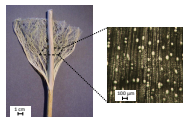
Données de [Ceyte, 2008] :

Longueur (<i>mm</i>)	4-9
Largeur (<i>mm</i>)	1-2.5
Epaisseur (<i>mm</i>)	≈0.5

Distribution de taille de particules

Spécificités du béton de chanvre

Des particules poreuses



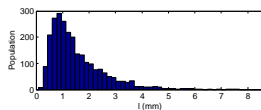
Un matériau anisotrope



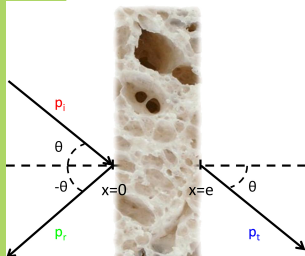
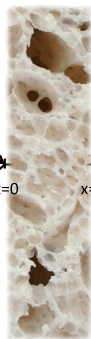
Données de [Ceyte, 2008] :

Longueur (mm)	4-9
Largeur (mm)	1-2.5
Epaisseur (mm)	≈0.5

Distribution de taille de particules



Approche acoustique pour les matériaux poreux



Phase solide : Dissipation mécanique

- ▶ Squelette élastique : ondes de Biot [Biot, 1956a, Biot, 1956b]
- ▶ Squelette rigide : $f > f_{dec}$ [Zwikker & Kosten, 1949]

Phase fluide : Dissipation visco-inertielle (ρ) et thermique (K)

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

- ▶ Niveaux d'observation

Pores

[Johnson et al., 1987,

Allard, 1993,

Laforge et al., 1997]

Squelette

[Tarnow, 1996,

Umnova et al., 2000,

Boutin & Geindreau, 2010]

- ▶ Cas d'un matériau multi-échelle

Double porosité

[Olny & Boutin, 2003,

Venegas & Umnova, 2011]

Distribution de taille de pores

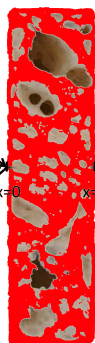
[Yamamoto & Turgut, 1998,

Horoshenkov et al., 2007]

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

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

Approche acoustique pour les matériaux poreux



Phase solide : Dissipation mécanique

- ▶ Squelette élastique : ondes de Biot [Biot, 1956a, Biot, 1956b]
- ▶ Squelette rigide : $f > f_{dec}$ [Zwikker & Kosten, 1949]

Phase fluide : Dissipation visco-inertielle (ρ) et thermique (K)

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

- ▶ Niveaux d'observation

Pores

[Johnson et al., 1987,

Allard, 1993,

Laforge et al., 1997]

Squelette

[Tarnow, 1996,

Umnova et al., 2000,

Boutin & Geindreau, 2010]

- ▶ Cas d'un matériau multi-échelle

Double porosité

[Olry & Boutin, 2003,

Venegas & Umnova, 2011]

Distribution de taille de pores

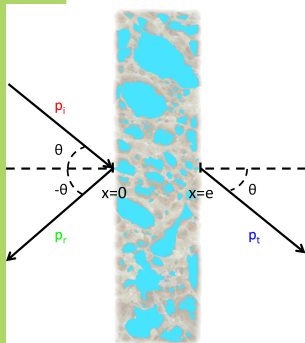
[Yamamoto & Turgut, 1998,

Horoshenkov et al., 2007]

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

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

Approche acoustique pour les matériaux poreux



Phase solide : Dissipation mécanique

- ▶ Squelette élastique : ondes de Biot [Biot, 1956a, Biot, 1956b]
- ▶ Squelette rigide : $f > f_{dec}$ [Zwikker & Kosten, 1949]

Phase fluide : Dissipation visco-inertielle (ρ) et thermique (K)

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

▶ Niveaux d'observation

Pores

[Johnson et al., 1987,

Allard, 1993,

Lafarge et al., 1997]

Squelette

[Tarnow, 1996,

Umnova et al., 2000,

Boutin & Geindreau, 2010]

▶ Cas d'un matériau multi-échelle

Double porosité

[Olny & Boutin, 2003,

Venegas & Umnova, 2011]

Distribution de taille de pores

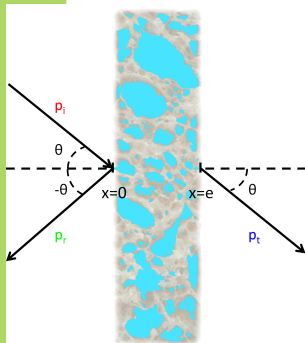
[Yamamoto & Turgut, 1998,

Horoshenkov et al., 2007]

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

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

Approche acoustique pour les matériaux poreux



Phase solide : Dissipation mécanique

- ▶ Squelette élastique : ondes de Biot [Biot, 1956a, Biot, 1956b]
- ▶ Squelette rigide : $f > f_{dec}$ [Zwikker & Kosten, 1949]

Phase fluide : Dissipation visco-inertielle (ρ) et thermique (K)

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

▶ Niveaux d'observation

Pores

[Johnson et al., 1987,

Allard, 1993,

Lafarge et al., 1997]

Squelette

[Tarnow, 1996,

Umnova et al., 2000,

Boutin & Geindreau, 2010]

▶ Cas d'un matériau multi-échelle

Double porosité

[Olny & Boutin, 2003,

Venegas & Umnova, 2011]

Distribution de taille de pores

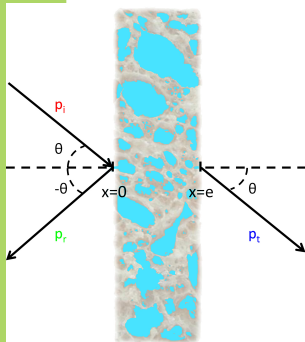
[Yamamoto & Turgut, 1998,

Horoshenkov et al., 2007]

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

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

Approche acoustique pour les matériaux poreux



Phase solide : Dissipation mécanique

- ▶ Squelette élastique : ondes de Biot [Biot, 1956a, Biot, 1956b]
- ▶ Squelette rigide : $f > f_{dec}$ [Zwikker & Kosten, 1949]

Phase fluide : Dissipation visco-inertielle (ρ) et thermique (K)

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

- ▶ Niveaux d'observation

Pores

[Johnson et al., 1987,

Allard, 1993,

Lafarge et al., 1997]

Squelette

[Tarnow, 1996,

Umnova et al., 2000,

Boutin & Geindreau, 2010]

- ▶ Cas d'un matériau multi-échelle

Double porosité

[Olny & Boutin, 2003,

Venegas & Umnova, 2011]

Distribution de taille de pores

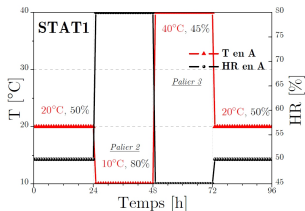
[Yamamoto & Turgut, 1998,

Horoshenkov et al., 2007]

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

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

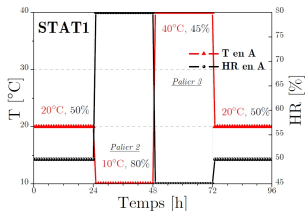
Comportement hygrothermique du béton de chanvre



Matériaux soumis à des sollicitations statiques [Samri, 2008]

⇒ Changements de phase au sein du béton de chanvre

Comportement hygrothermique du béton de chanvre

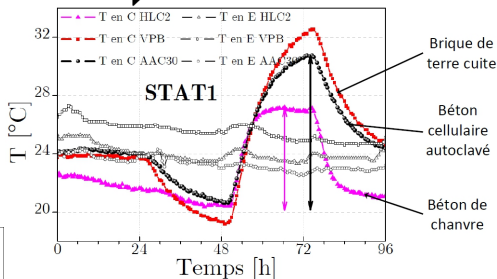
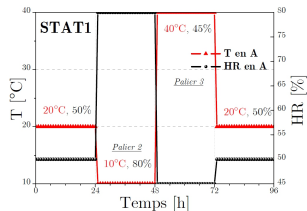


Matériaux soumis
à des sollicitations
statiques [Samri, 2008]

⇒ Changements de
phase au sein du
béton de chanvre



Comportement hygrothermique du béton de chanvre

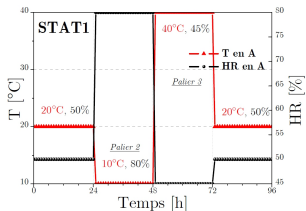


Matériaux soumis à des sollicitations statiques [Samri, 2008]

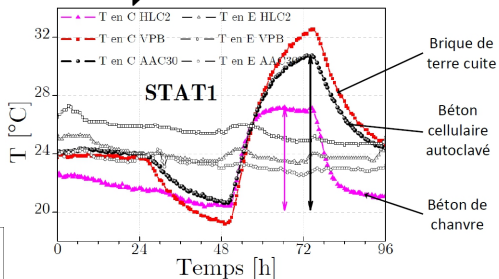
⇒ Changements de phase au sein du béton de chanvre



Comportement hygrothermique du béton de chanvre

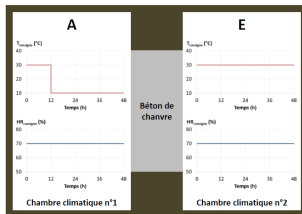


Matériaux soumis à des sollicitations statiques [Samri, 2008]



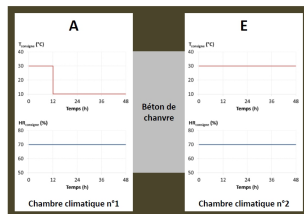
⇒ Changements de phase au sein du béton de chanvre

Comportement hygrothermique du béton de chanvre



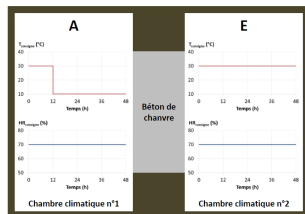
Choc thermique sur
une face du mur

Comportement hygrothermique du béton de chanvre

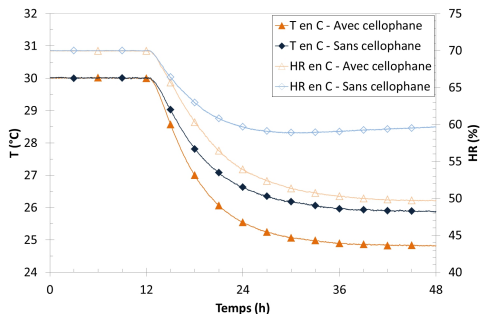


Choc thermique sur
une face du mur

Comportement hygrothermique du béton de chanvre



Choc thermique sur
une face du mur



Plan de la présentation

Le béton de chanvre

Problématiques

En acoustique

En thermique

Résultats expérimentaux

Effets des constituants

Effet de la mise en œuvre

Modélisation

En acoustique

En thermique

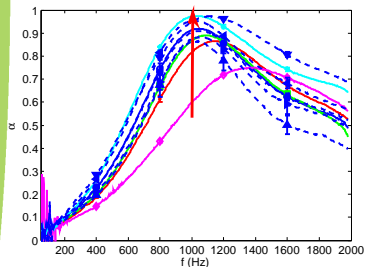
Conclusion



Effets des constituants : Origine et granulométrie de la chènevotte

Acoustique

Thermique



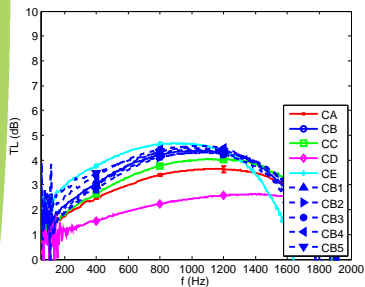
⇒ α augmente avec les petites particules

⇒ La chènevotte de granulométrie médiane est optimale

⇒ TL ne dépend pas de la granulométrie pour une chènevotte donnée

Effets des constituants : Origine et granulométrie de la chènevotte

Acoustique



⇒ α augmente avec les petites particules

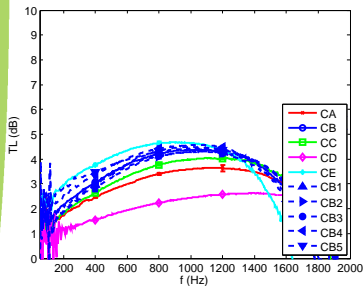
⇒ TL ne dépend pas de la granulométrie pour une chènevotte donnée

Thermique

⇒ La chènevotte de granulométrie médiane est optimale

Effets des constituants : Origine et granulométrie de la chènevotte

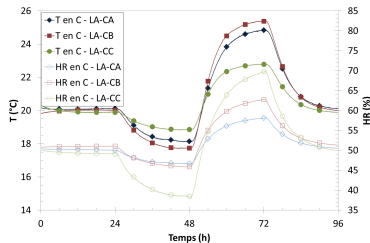
Acoustique



⇒ α augmente avec les petites particules

⇒ TL ne dépend pas de la granulométrie pour une chènevotte donnée

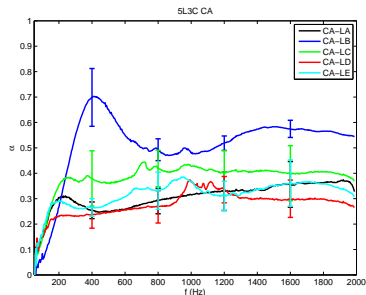
Thermique



⇒ La chènevotte de granulométrie médiane est optimale

Effets des constituants : Type de liant

Acoustique



⇒ Contrôle par la résistivité σ
 -LD $\mapsto \sigma$ important,
 -LA, LC et LE $\mapsto \sigma$ moyen,
 -LB $\mapsto \sigma$ faible

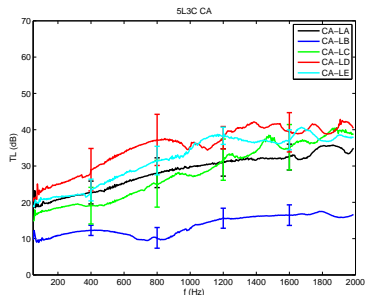
Thermique

⇒ Compromis nécessaire entre diffusion de vapeur d'eau, inertie et isolation thermique



Effets des constituants : Type de liant

Acoustique



⇒ **Contrôle par la résistivité σ**
 -LD $\rightarrow \sigma$ important,
 -LA, LC et LE $\rightarrow \sigma$ moyen,
 -LB $\rightarrow \sigma$ faible

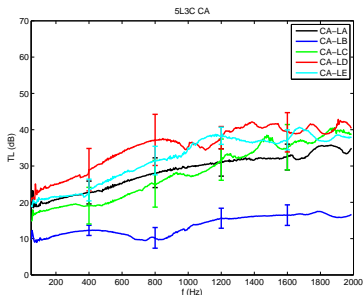
Thermique

⇒ Compromis nécessaire entre diffusion de vapeur d'eau, inertie et isolation thermique



Effets des constituants : Type de liant

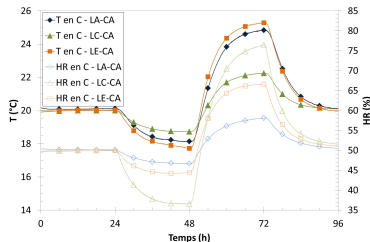
Acoustique



⇒ Contrôle par la résistivité σ

- LD $\rightarrow \sigma$ important,
- LA, LC et LE $\rightarrow \sigma$ moyen,
- LB $\rightarrow \sigma$ faible

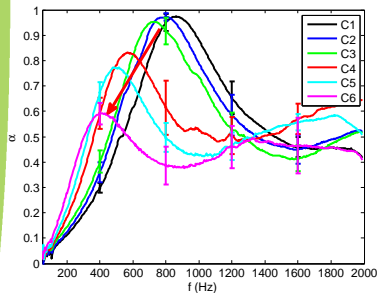
Thermique



⇒ Compromis nécessaire entre diffusion de vapeur d'eau, inertie et isolation thermique

Effet de la mise en œuvre : Compacité

Acoustique



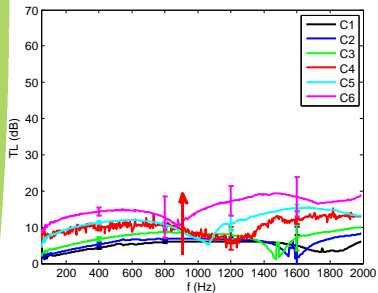
Thermique

- ⇒ Baisse d' α et gain de TL sur la gamme testée
- ⇒ Déplacement du pic d' α vers BF

- ⇒ Augmentation quasi linéaire de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique

Effet de la mise en œuvre : Compacité

Acoustique



- ⇒ Baisse d' α et gain de TL sur la gamme testée
- ⇒ Déplacement du pic d' α vers BF

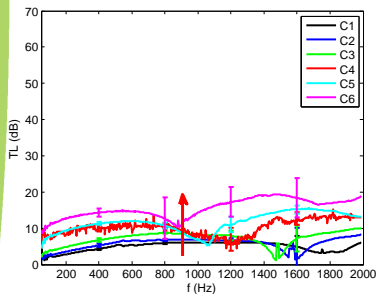
Thermique

- ⇒ Augmentation quasi linéaire de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique



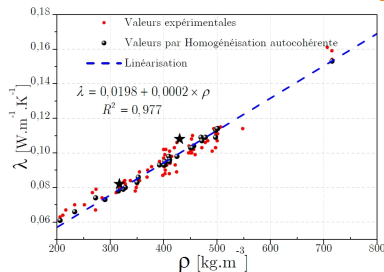
Effet de la mise en œuvre : Compacité

Acoustique



- ⇒ Baisse d' α et gain de TL sur la gamme testée
- ⇒ Déplacement du pic d' α vers BF

Thermique



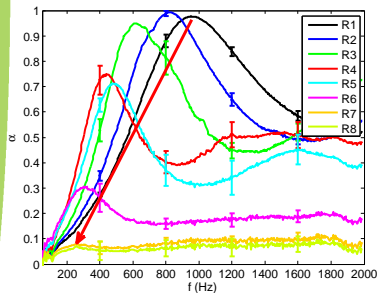
[Samri, 2008]

- ⇒ Augmentation quasi linéaire de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique

Effet de la mise en œuvre : Concentration en liant

Acoustique

Thermique



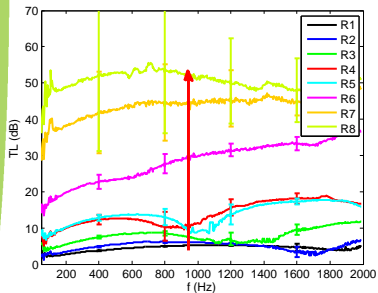
⇒ Passage de (α important, faible TL) à (faible α , TL important)

⇒ Conductivité thermique croît avec la concentration en liant



Effet de la mise en œuvre : Concentration en liant

Acoustique



⇒ Passage de (α important, faible TL) à (faible α , TL important)

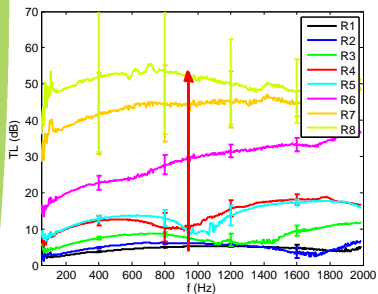
Thermique

⇒ Conductivité thermique croît avec la concentration en liant



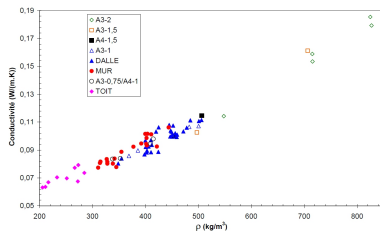
Effet de la mise en œuvre : Concentration en liant

Acoustique



⇒ Passage de (α important, faible TL) à (faible α , TL important)

Thermique



[Cerezo, 2005]

⇒ Conductivité thermique croît avec la concentration en liant

Plan de la présentation

Le béton de chanvre

Problématiques

En acoustique

En thermique

Résultats expérimentaux

Effets des constituants

Effet de la mise en œuvre

Modélisation

En acoustique

En thermique

Conclusion



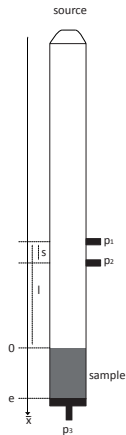
Acoustique : De la caractérisation à la modélisation

Modèles

- ▶ Double porosité avec fort contraste :
[Olry & Boutin, 2003]
- ▶ Hypothèse de squelette rigide ($f_{dec} < 20 \text{ Hz}$)
 - ▶ Effets visco-inertiels : [Johnson et al., 1987]
 - ▶ Effets thermiques : [Zwikker & Kosten, 1949]

Démarche

1. Caractérisation en tube de Kundt (Méthode 3 positions sans cavité [Jwase et al., 1998])
[100; 2000 Hz]
2. Mesure de ϕ [Beranek, 1942] et σ (ISO9053)
3. Caractérisation indirecte de α_∞ et Λ via ρ
[Panneton & Olry, 2006]
4. Estimation de ϕ_{inter} via $\Re(K)$ selon le modèle de Zwikker et Kosten



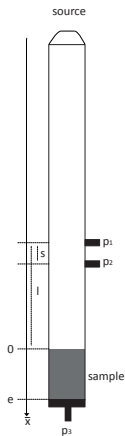
Acoustique : De la caractérisation à la modélisation

Modèles

- ▶ Double porosité avec fort contraste :
[Olny & Boutin, 2003]
- ▶ Hypothèse de squelette rigide ($f_{dec} < 20 \text{ Hz}$)
 - ▶ Effets visco-inertiels : [Johnson et al., 1987]
 - ▶ Effets thermiques : [Zwikker & Kosten, 1949]

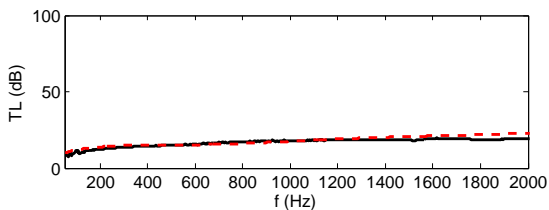
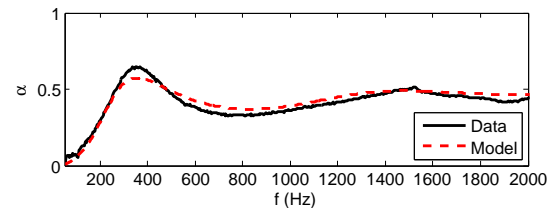
Démarche

1. Caractérisation en tube de Kundt (Méthode 3 positions sans cavité [Iwase et al., 1998])
[100; 2000 Hz]
2. Mesure de ϕ [Beranek, 1942] et σ (ISO9053)
3. Caractérisation indirecte de α_∞ et Λ via ρ
[Panneton & Olny, 2006]
4. Estimation de ϕ_{inter} via $\Re(K)$ selon le modèle de Zwikker et Kosten



Acoustique : Résultats pour le béton de chanvre

Formulation Mur : Ratio Liant/Chanvre = 2



Modélisation des transports couplés de chaleur et de masse

Modèle de KÜNZEL (WUFI®) [Künzel, 1994]

$$\begin{cases} \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \\ \frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \end{cases}$$

T – température [°C]; ϕ – humidité relative [-]; t – temps [s]

ρ – masse volumique [kg/m³]; λ – conductivité thermique [W/m.K]

c – capacité thermique massique [J/kg.K]

L_v – chaleur latente massique de vaporisation de l'eau [J/kg]

δ_p – perméabilité à la vapeur d'eau [kg/m.s.Pa]

p_{sat} – pression de vapeur saturante de l'eau [Pa]

w – teneur en eau [kg/m³]

D_ϕ – coefficient de conduction liquide [kg/m.s]

Plan de la présentation

Le béton de chanvre

Problématiques

En acoustique

En thermique

Résultats expérimentaux

Effets des constituants

Effet de la mise en œuvre

Modélisation

En acoustique

En thermique

Conclusion



Conclusions & Perspectives

- ✓ Comportements atypiques en acoustique et en thermique
 - ✓ Contrôle des performances *via* densité et perméabilité
 - ✓ Premiers résultats de modélisation encourageants
- Etude croisée acoustique / thermique après vieillissement
 - Extension à d'autres granulats végétaux
 - Optimisation conjointe acoustique / thermique

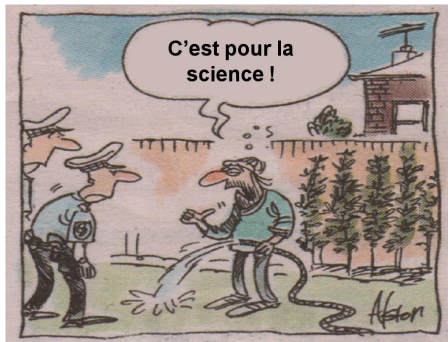
Conclusions & Perspectives

- ✓ Comportements atypiques en acoustique et en thermique
 - ✓ Contrôle des performances *via* densité et perméabilité
 - ✓ Premiers résultats de modélisation encourageants
- Etude croisée acoustique / thermique après vieillissement
 - Extension à d'autres granulats végétaux
 - Optimisation conjointe acoustique / thermique

Merci de votre attention



Centre d'Études techniques de l'Équipement de l'Est



Merci de votre attention

Contacts :

philippe.gle@developpement-durable.gouv.fr
etienne.gourlay@developpement-durable.gouv.fr

Resources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



Centre d'Études techniques de l'Équipement de l'Est

Bibliographie I



(2006).

Règles professionnelles d'exécution de murs en béton de chanvre.
RP2C - Commission Règles Professionnelles Construction Chanvre.



(2010).

Bilan énergétique de la France pour 2009.
Technical report, Commissariat général au développement durable.



Allard, J.-F. (1993).

Propagation of sound in porous media.
Applied Science, page 284.



Beranek, L. (1942).

Acoustic impedance of porous materials.
Journal of the Acoustical Society of America, 13 :248–260.



Bevan, R. & Woolley, T. (2008).

Hemp lime construction, A guide to building with hemp lime composites.
IHS BRE Press.



Biot, M.-A. (1956a).

Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I Low-frequency range.
Journal of the Acoustical Society of America, 28 :168–178.



Biot, M.-A. (1956b).

Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II High-frequency range.
Journal of the Acoustical Society of America, 28 :179–191.



Bibliographie II



Boutin, C. & Geindreau, C. (2010).

Periodic homogenization and consistent estimates of transport parameters through sphere and polyhedron packings in the whole porosity range.

Physical Review E, 82-036313 :18.



Boutin, M.-P., Flamin, C., Quinton, S., & Gosse, G. (2005).

Analyse du cycle de vie : Compounds thermoplastiques chargés fibres de chanvre et Mur en béton de chanvre banché sur ossature bois.

Rapport d'Étude INRA Lille, Réf. MAP 04 B1 0501., page 32.



Cerezo, V. (2005).

Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique.

PhD thesis, Ecole doctorale MEGA, Lyon.



Ceyte, I. (2008).

Béton de chanvre, définition des caractéristiques mécaniques de la chènevotte, Travail de Fin d'Études.

ENTPE, page 155.



Grosselin, J.-M. (2011).

Le développement industriel des filières stratégiques de l'économie verte. la filière "matériaux bio-sourcés & construction".

In *Premières Assises Constructions & Bioressources*.



Horoshenkov, K.-V., Attenborough, K., & Chandler-Wilde, S.-N. (2007).

Padé approximants for the acoustical properties of rigid frame porous media with pore size distributions.

Journal of the Acoustical Society of America, 104(3) :1198–1209.



Bibliographie III



Iwase, T., Izumi, Y., & Kawabata, R. (1998).

A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material.

Internoise 98, Christchurch, New Zealand, page 4.



Johnson, D.-L., Koplik, J., & Dashen, R. (1987).

Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media.

Fluid Mechanics, 176 :379–402.



Künzel, H. M. (1994).

Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten.

Dissertation, Stuttgart : Universität Stuttgart, 104 p.



Lafarge, D., Lemarinié, P., Allard, J.-F., & Tarnow, V. (1997).

Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies.

Journal of the Acoustical Society of America, 102(4) :1995–2006.



Olny, X. & Boutin, C. (2003).

Acoustic wave propagation in double porosity media.

Journal of the Acoustical Society of America, 114(1) :73–89.



Panneton, R. & Olny, X. (2006).

Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media.

Journal of the Acoustical Society of America, 119(4) :2027–2040.



Samri, D. (2008).

Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique.

PhD thesis, Ecole doctorale MEGA, Lyon.

Bibliographie IV



Tarnow, V. (1996).

Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials.
Journal of the Acoustical Society of America, 100(6) :3706–3713.



Umnova, O., Attenborough, K., & Li, K.-M. (2000).

Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres.
The Journal of the Acoustical Society of America, 107(6) :3113–3119.



Venegas, R. & Umnova, O. (2011).

Acoustical properties of double porosity granular materials.
Journal of the Acoustical Society of America, 130 (5) :2765–2776.



Yamamoto, T. & Turgut, A. (1998).

Acoustic wave propagation through porous media with arbitrary pore size distributions.
Journal of the Acoustical Society of America, 83 (5) :1744–1751.



Zwikker, C. & Kosten, C.-W. (1949).

Sound absorbing materials.
Elsevier, New-York, page 174.

