



HAL
open science

Evolution des paramètres acoustiques des bétons de chanvre sous l'effet du compactage

Philippe Glé, Emmanuel Gourdon, Laurent Arnaud

► **To cite this version:**

Philippe Glé, Emmanuel Gourdon, Laurent Arnaud. Evolution des paramètres acoustiques des bétons de chanvre sous l'effet du compactage. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422621

HAL Id: hal-03422621

<https://hal.science/hal-03422621>

Submitted on 9 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evolution des paramètres acoustiques des bétons de chanvre sous l'effet du compactage

P. GLÉ^a, E. GOURDON^a, L. ARNAUD^a

a. DGCB FRE CNRS 3237, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État,
Membre de l'Université de Lyon, Rue Maurice Audin, 69518 VAULX-EN-VELIN Cedex

Résumé :

Le béton de chanvre est un béton poreux qui apparaît aujourd'hui comme une alternative très intéressante aux matériaux traditionnellement utilisés dans le bâtiment. Afin de contrôler et d'optimiser son comportement acoustique, il est important de pouvoir prédire les performances de ce matériau en fonction des paramètres qui entrent en jeu lors de sa fabrication. Les travaux qui vont être présentés ont été réalisés afin de déterminer les relations qui existent entre les paramètres des modèles acoustiques et des paramètres intrinsèques aux constituants et au mode de fabrication utilisés.

Abstract :

Hemp concrete is a porous concrete that can be used as an interesting alternative to traditional materials used in buildings. To control and optimise its acoustical behavior, it is important to predict the performance of this material as a function of the main parameters of its fabrication process. The study presented here aimed at determining the relationships between the acoustical parameters used in the models and the intrinsic parameters of the constituents and of the fabrication process.

Mots clefs : Béton de chanvre ; Matériaux multi-échelles ; Paramètres acoustiques

1 Introduction

Dans le domaine du bâtiment, afin de limiter la forte consommation énergétique du secteur (qui représentait en 2007 plus de 40% de la consommation énergétique française), et afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre dues à la fabrication des matériaux structurels traditionnels, des matériaux plus performants et respectueux de l'environnement sont de plus en plus utilisés. Si la priorité est aujourd'hui l'isolation thermique des matériaux, on recherche aussi en parallèle, par soucis d'optimisation multifonctionnelle, à améliorer leurs propriétés acoustiques.

Ainsi, de nouveaux types de matériaux, tels que certains matériaux recyclés sont l'objet d'un vif intérêt, étant doués de propriétés acoustiques intéressantes à la fois en absorption et en isolation, comme par exemple des matériaux fabriqués à partir de morceaux de pneus ou de morceaux de moquette. Dans ce contexte, des matériaux d'origine naturelle présentent des avantages considérables, utilisés sous forme brute ou sous forme de fibres ou de particules végétales, leur intérêt principal est d'être renouvelable et de stocker du dioxyde de carbone sur de longues périodes. De plus, les propriétés acoustiques de ces matériaux " durables ", tels que les particules de bois, ou les particules de bois de paille de riz, sont similaires à celles des matériaux synthétiques traditionnellement utilisés.

Nous nous concentrons dans le cadre de cet article, sur les propriétés acoustiques du béton de chanvre, un matériau constitué de particules de chanvre consolidées par un liant de type chaux ou ciment. Des études ont d'ores et déjà permis de souligner les bonnes propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques de ce matériau [5, 7]. De plus, une Analyse de Cycle de Vie a montré que 1 m² de mur banché de béton de chanvre avec ossature bois permet de stocker 35,5 kg de dioxyde de carbone sur une période de référence de 100 ans [1].

A des fins de contrôle et d'optimisation de son comportement acoustique, il est important de pouvoir prédire les performances de ce matériau en fonction des paramètres qui entrent en jeu lors de sa fabrication, tels que sa mise en oeuvre (mode de fabrication, formulation et finition) et la nature des constituants utilisés (granulométrie et origine du chanvre, nature du liant). Hors, en acoustique, sous les hypothèses de squelette rigide, on peut considérer que les seuls effets de dissipation ayant lieu dans le matériau sont de nature visco-inertielle et thermique [2]. Des modèles semi-phénoménologiques permettent alors de modéliser les deux grandeurs qui caractérisent ces effets, respectivement la densité dynamique et le module d'incompressibilité dynamique.

Les différentes échelles de porosité existant au sein du matériau rendent cette approche relativement compliquée. En effet, on peut noter la présence de pores à la fois entre les particules de chanvre, dans les particules de chanvre et au sein du liant. La difficulté est de déterminer quelles échelles participent réellement à la dissipation.

L'article s'appuie sur des résultats expérimentaux obtenus sur des particules de chanvre en vrac (appelées chènevotte), et est décliné en deux parties. Dans la première, les modèles et paramètres acoustiques utilisés afin de décrire ces matériaux sont présentés. Ensuite, l'évolution de ces paramètres acoustiques est étudiée en fonction du compactage des matériaux.

2 Modélisation des propriétés acoustiques de la chènevotte

2.1 Le béton de chanvre et la chènevotte, des matériaux multi-échelles

Le béton de chanvre est issu d'un mélange entre des particules de chanvre et un liant. La microstructure de chacun de ses constituants procure à ce matériau une porosité relativement importante, et distribuée à différentes échelles. On peut ainsi distinguer trois catégories de pores au sein du matériau, avec les pores inter-particules présents entre les particules de chanvre d'une dimension de l'ordre de 1mm , les pores intra-particules au sein des particules de chanvre d'une dimension variant entre 10 et $100\ \mu\text{m}$, et les pores intra-liant existant au sein du liant avec des dimensions de l'ordre de $1\ \mu\text{m}$. Des images d'un bloc de béton de chanvre, d'une section d'une particule de chanvre et d'un liant illustrent ces différentes échelles de porosité Figure 1. Dans le cadre de cette étude, l'effet du liant n'est pas pris en compte. Les échantillons étudiés sont donc uniquement constitués de particules de chanvre en vrac.

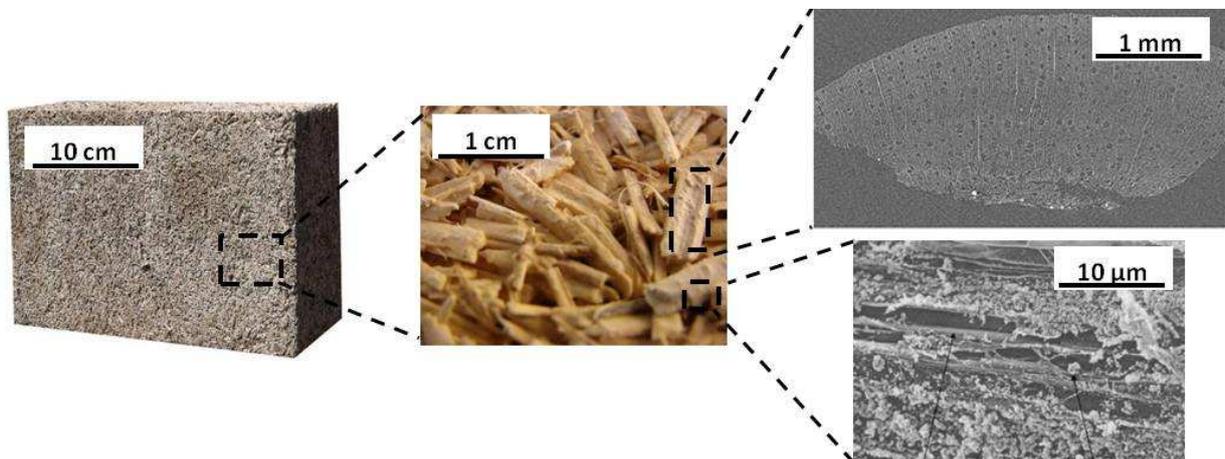


FIGURE 1 – Les différentes échelles de porosité du béton de chanvre

2.2 Modèle utilisé

Nous nous plaçons sous l'hypothèse de squelette rigide, et ne prenons donc pas en compte les effets de dissipation mécanique dans le matériau. De nombreux modèles acoustiques existent et permettent de décrire, grâce à des approches empiriques ou phénoménologiques, les effets de dissipation visco-inertiels et thermiques se produisant au sein de ces matériaux poreux. Leur complexité est variable, puisqu'ils peuvent faire intervenir de un à huit paramètres [2].

Il a été montré que dans les cas de la chènevotte et du béton de chanvre [7], seulement quatre paramètres sont nécessaires. Les modèles utilisés sont celui de Johnson et al. [9] pour décrire les effets visco-inertiels via la densité dynamique équivalente ρ_{eq} , et celui de Zwikker et Kosten [12] afin de décrire les effets thermiques avec le module d'incompressibilité dynamique équivalent K_{eq} . Les modèles sont rappelés dans les équations (1) et (2).

$$\rho_{eq}(\omega) = \frac{\alpha_{\infty}\rho_0}{\phi} \left[1 - \frac{j\sigma\phi}{\omega\rho_0\alpha_{\infty}} \sqrt{1 + j\frac{4\alpha_{\infty}^2\eta\rho_0\omega}{\sigma^2\Lambda^2\phi^2}} \right] \quad (1)$$

$$K_{eq}(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left[1 + 2(\gamma - 1) \frac{T(\sqrt{N_{Pr}}\lambda\sqrt{-j})}{\sqrt{N_{Pr}}\lambda\sqrt{-j}} \right]^{-1} \quad \text{avec } \lambda = s\sqrt{\frac{8\alpha_{\infty}\rho_0\omega}{\sigma\phi}} \quad (2)$$

et avec T le rapport entre les fonctions de Bessel d'ordre zero et d'ordre un.

Dans ces équations, des constantes décrivent les propriétés de l'air, ρ_0 la densité de l'air (1.2 kg/m^3), η la viscosité de l'air ($1.84 \cdot 10^{-5} \text{ Pl}$), γ l'indice adiabatique de l'air (1.4), P_0 la pression de l'air à l'équilibre (10^5 Pa) et N_{Pr} le nombre de Prandtl de l'air (0.71). Un facteur de forme $s = 1$ est utilisé dans le cadre des matériaux de cette étude, ainsi, les quatre paramètres acoustiques qui décrivent le milieu poreux sont :

- ϕ : la porosité ouverte du matériau
- σ : la résistivité (Nm^{-4}s)
- α_{∞} : la limite hautes fréquences de la tortuosité
- Λ : la longueur caractéristique visqueuse (m).

Connaissant ρ_{eq} et K_{eq} , on peut calculer l'impédance caractéristique Z_c et le nombre d'onde k du matériau afin de remonter à l'impédance de surface Z et au coefficient d'absorption acoustique α plus couramment utilisés en acoustique. La modélisation de l'absorption acoustique d'une chènevotte de densité $\rho = 130 \text{ kg/m}^3$ est présentée à la Figure 2.

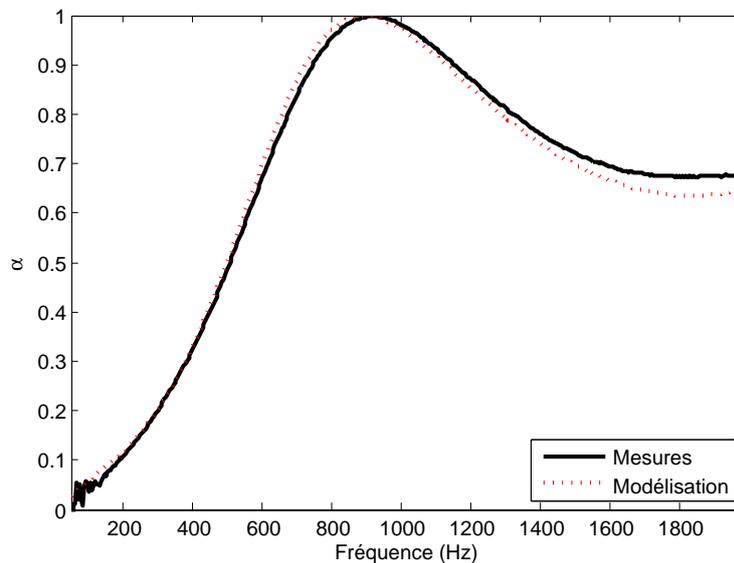


FIGURE 2 – Absorption acoustique de la chènevotte, modélisation et mesure

2.3 Détermination des paramètres

Les quatre paramètres ont été déterminés en suivant la même démarche pour l'ensemble des échantillons testés.

Pour commencer, la porosité ouverte a été évaluée par mesure directe en utilisant un porosimètre à air [6].

Ensuite, les échantillons ont été caractérisés sur une épaisseur de 5cm dans un tube de Kundt B&K type 4106 placé verticalement, et en utilisant une méthode à trois microphones [8] qui permet de mesurer la densité dynamique et le module d'incompressibilité dynamique du matériau.

La résistivité de l'échantillon a été estimée à basses fréquences à partir de la partie imaginaire de la densité dynamique [10].

Enfin, la tortuosité et la longueur caractéristique visqueuse ont été caractérisées indirectement à partir des relations analytiques (3) et (4) données par Panneton et Olny [10].

$$\alpha_{\infty} = \frac{\phi}{\rho_0} \left[\operatorname{Re}(\rho_{eq}(\omega)) - \sqrt{\operatorname{Im}(\rho_{eq}(\omega))^2 - \left(\frac{\sigma}{\omega}\right)^2} \right] \quad (3)$$

$$\Lambda = \frac{\alpha_{\infty}}{\phi} \sqrt{\frac{2\rho_0\eta}{\omega \operatorname{Im}(\rho_{eq}(\omega)) \left(\rho_0 \frac{\alpha_{\infty}}{\phi} - \operatorname{Re}(\rho_{eq}(\omega))\right)}} \quad (4)$$

3 Évolution des paramètres acoustiques en fonction du compactage

3.1 État de l'art

Le compactage des matériaux poreux a des effets très prononcés sur les propriétés acoustiques de ces derniers. Cet effet peut d'ailleurs constituer un biais important lors de la caractérisation d'échantillons en tube d'impédance, puisqu'il est alors nécessaire qu'ils épousent parfaitement la section du tube afin de garantir une étanchéité entre les parois du tube et les bords de l'échantillon.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse d'avantage au compactage en tant que levier capable de donner au béton de chanvre une gamme relativement étendue de propriétés acoustiques. Pour des matériaux de type fibreux, l'effet de la compression sur les propriétés acoustiques a été étudié par Castagnede et al. [4], et des relations ont été proposées afin de modéliser l'évolution de la porosité, de la résistivité, de la tortuosité et des longueurs caractéristiques à partir d'une situation de référence non comprimée. Cependant, ces relations ne sont ni adaptées à la chènevotte ni au béton de chanvre, ces matériaux étant granulaires.

En revanche, les modèles développés par Boutin et Geindreau [3] et par Umnova et al. [11] sont basés sur une géométrie granulaire. Ils proposent tous les deux des relations entre les paramètres acoustiques et deux paramètres descriptifs du milieu granulaire : ϕ la porosité du matériau et r le rayon des granulats.

3.2 Présentation de la démarche

Des mesures des propriétés acoustiques de différentes chènevottes ont été réalisées en tube de Kundt. Les différents états de compactage ont été obtenus en réarrangeant les particules de chanvre positionnées dans leur orientation naturelle, perpendiculairement à la direction de propagation des ondes acoustiques. Dans ces conditions, on peut donc considérer que les particules ne sont pas comprimées, et que seule la porosité inter-particule varie sous l'effet du compactage. Les mesures ont alors été réalisées avec trois échantillons différents dans chaque configuration afin d'évaluer l'incertitude de mesure liée à la position des particules.

Une fois les paramètres acoustiques des chènevottes caractérisés, des optimisations au sens des moindres carrés ont été réalisées sur l'ensemble de la gamme de compactage afin de déterminer le couple porosité - rayon des granulats qui donne les prédictions les plus proches des paramètres caractérisés.

3.3 Résultats obtenus

L'évolution de la porosité ouverte de la chènevotte en fonction du compactage étant une fonction linéaire de la densité déjà bien connue [7], il nous reste uniquement à étudier l'évolution des trois autres paramètres acoustiques qui sont la résistivité, la tortuosité et la longueur visqueuse caractéristique. Pour cela, le modèle de Umnova et al. a été utilisé. A titre d'exemple, la résistivité σ est modélisée par la relation (5).

$$\sigma = \frac{9\eta(1-\phi)(1-\theta)\Omega}{2\phi^2 R^2} \text{ avec } \Omega = \frac{5}{5 - 9\theta^{\frac{1}{3}} + 5\theta - \theta^2} \text{ et } \theta = \frac{3(1-\phi)}{\pi\sqrt{2}} \quad (5)$$

Pour la chènevotte, étant donné la petite taille des pores intra-particules relativement aux pores inter-particules, on peut considérer que la résistivité peut se calculer uniquement en fonction de la porosité inter-particule. Or, on peut montrer que cette porosité inter-particule ϕ_p s'exprime en fonction de la porosité ouverte ϕ et de la porosité intra-particule ϕ_m par la relation (6).

$$\phi_p = \frac{\phi - \phi_m}{1 - \phi_m} \quad (6)$$

Etant donné que la porosité intra-particule est supposée constante en fonction du compactage, on a donc recherché dans le cas de l'étude de la résistivité, à trouver le couple porosité intra-particule - rayon des granulats optimal au sens des moindres carrés. La Figure 3 compare les résultats expérimentaux à la modélisation optimale. On voit que le modèle permet d'approcher de façon très satisfaisante l'évolution de la résistivité observée puisque le coefficient de détermination calculé par rapport aux moyennes expérimentales vaut $R^2 = 0.97$. De plus, la porosité intra-particule optimale obtenue $\phi_m = 59\%$, est très proche d'une valeur mesurée par tomographie sur une chènevotte semblable ($\phi_m = 57\%$) [7]. Pour finir, le rayon des granulats optimal obtenu est $r = 0.33mm$, ce qui donne un diamètre du même ordre de grandeur que l'épaisseur des particules qui est d'environ $0.5mm$ [7]. La relation utilisée pour décrire la résistivité semble donc être très bien adaptée à la chènevotte.

En ce qui concerne les autres paramètres acoustiques, des relations semblables ont été utilisées et permettent de mettre en évidence l'effet de la porosité des particules sur la tortuosité et sur la longueur caractéristique visqueuse des chènevottes.

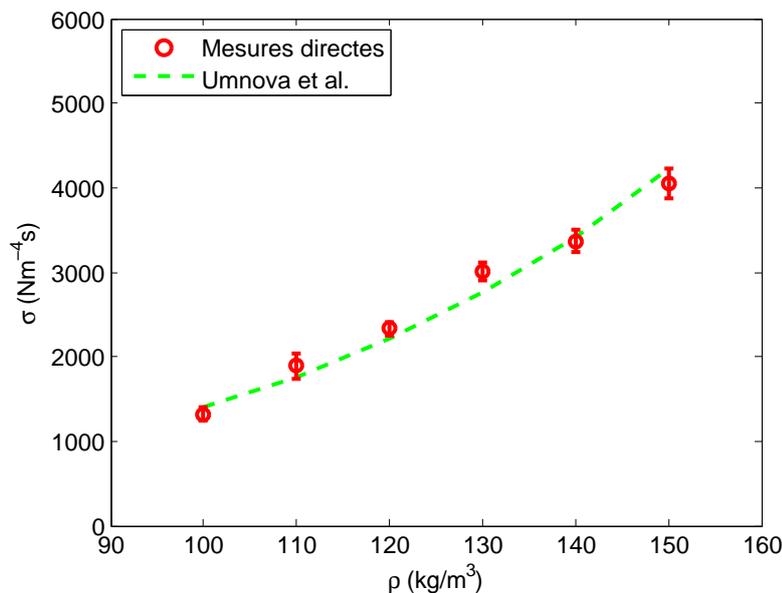


FIGURE 3 – Evolution de la résistivité de la chènevotte en fonction du compactage, modélisation et mesures (moyennes et écart-types)

4 Conclusions

L'évolution des paramètres acoustiques (résistivité, tortuosité, longueur caractéristique visqueuse) de particules de chanvre en vrac a été étudiée en fonction du compactage. Des relations issues de modèles granulaires ont alors été utilisées afin de modéliser cette évolution et de déterminer les paramètres descriptifs du milieu granulaire : une porosité et un rayon de granulat.

Les résultats montrent que les relations de ces modèles sont bien adaptées à notre matériau, et que la porosité et le rayon de granulat ainsi déterminés sont du même ordre de grandeur que les porosités et dimensions caractéristiques évaluées sur le matériau. Ces modèles pourraient donc être utilisés à deux fins, pour prédire les propriétés acoustiques de la chènevotte en fonction de ces paramètres s'ils sont connus à priori, ou dans l'objectif de les caractériser par inversion et ainsi de pouvoir retrouver grâce à une méthode accessible des paramètres clés de la chènevotte, comme sa porosité intra-particule.

Références

- [1] 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*. 32 p.
- [2] Allard, J.F., Atalla, N. 2009 Propagation of sound in porous media : Modelling sound absorbing materials, Second edition. *Wiley* 358 p.
- [3] Boutin, C., Geindreau, C. 2008 Estimates and bounds of dynamic permeability of granular media. *J. Acoust. Soc. Am.* **124** (6) 3576-3593
- [4] Castagnede, B., Aknine, A., Brouard, B., Tarnow, V. 2000 Effects of compression on the sound absorption of fibrous materials. *Applied Acoust.* **61** 173-182
- [5] Cerezo, V. 2005 Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. *Thèse Ecole doctorale MEGA, Lyon* 240 p.
- [6] Champoux, Y., Stinson, M.R., Daigle, G.A. 1990 Air-based system for the measurement of porosity. *J. Acoust. Soc. Am.* **89** (2) 910-916
- [7] Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L. 2011 Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoust.* **72** 249-259
- [8] 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*
- [9] Johnson, D.L., Koplik, J., Dashen, R. 1987 Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* **176** 379-402
- [10] Panneton, R., Olny, X. 2006 Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media. *J. Acoust. Soc. Am.* **119** (4) 2027-2040
- [11] Umnova, O., Attenborough, K., Li, K.M. 2006 Cell model calculations of dynamic drag parameters in packings of spheres. *J. Acoust. Soc. Am.* **107** (6) 3113-3119
- [12] Zwikker, C., Kosten, C.W. 1949 Sound Absorbing Materials. 174 p., Elsevier, New-York.