

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**Prédiction de la Performance Acoustique de Parois incluant des Matériaux Biosourcés**

T. Blinet<sup>a</sup>, P. Glé<sup>b</sup> et C. Guigou Carter<sup>c</sup>

<sup>a</sup>CSTB, 84, Avenue Jean Jaurès, 77420 Champs-Sur-Marne, France

<sup>b</sup>CEREMA - Laboratoire de Strasbourg, 11, rue Jean Mentelin, 67035 Strasbourg, France

<sup>c</sup>CSTB, 24 Rue Joseph Fourier, 38400 Saint Martin D'Hères, France

thibaut.blinet@cstb.fr

Dans ce travail, la performance acoustique de parois incluant des matériaux biosourcés est évaluée. Les paramètres de matériaux biosourcés ont été caractérisés en laboratoire ; les caractéristiques à l'échelle matériau sont principalement issues de mesures au tube de Kundt, suivant la méthode des trois microphones. Ces paramètres matériaux peuvent ensuite être injectés dans un logiciel de prédiction pour évaluer la performance acoustique d'un système. Dans le cas présent, le logiciel AcouSYS, basé sur une méthode de matrice de transfert (TMM) intégrant la prise en compte des dimensions finies des systèmes par une approche de fenêtrage spatial, associée à des méthodes SEA, pour la prise en compte des courts circuits vibratoires (deux améliorations déjà bien éprouvées), est principalement utilisé. Plusieurs types de matériaux biosourcés sont considérés en remplissage ou comme isolant, comme par exemple des laines de lin ou de chanvre, etc. Les performances prédites de systèmes constitués de ces matériaux biosourcés (cloisons, plafond en combles perdus, murs supports...) sont, dans un premier temps, comparées aux mêmes systèmes incluant des matériaux plus standards en laine minérale, et dans un deuxième temps, comparées, pour quelques cas, à des résultats issus de mesures en laboratoire. La prise en compte de la variabilité des caractéristiques des matériaux biosourcés est également abordée.

## 1 Introduction

À ce jour, le déploiement de solutions à base de matériaux biosourcés est pénalisé, sur le plan acoustique, par une faible connaissance de leurs performances (à l'échelle des matériaux comme des systèmes), ce qui complique le travail de la maîtrise d'œuvre lors de la phase de conception, celle-ci ne disposant pas des éléments susceptibles d'intégrer correctement ce type de solutions dans le bâtiment. De plus, les acteurs sont généralement de petite taille, peu structurés syndicalement et n'ont pas toujours une grande connaissance des problématiques technico-réglementaires et/ou des moyens nécessaires à la caractérisation et la certification de leurs produits.

Les matériaux biosourcés sont caractérisés par une définition réglementaire, précisée dans l'Arrêté du 19 décembre 2012 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « bâtiment biosourcé » [1]. Ce sont des matériaux issus du vivant, d'origine animale (ex. : laine de mouton) ou végétale (ex. : lin, chanvre, paille). Une étude de réactualisation réalisée en 2013 par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) définit ces matériaux biosourcés comme « l'ensemble des matériaux issus de la biomasse en opposition aux matériaux traditionnels issus des hydrocarbures. Ils sont soit présents dans les organismes vivants (végétaux ou animaux), soit synthétisés par ces derniers, soit issus des produits et sous-produits des céréales, oléagineux et protéagineux, des plantes fibreuses ou du bois. »

Dans ce papier, nos analyses portent sur deux grandes familles de matériaux biosourcés : les fibreux (souvent sous forme de laines à base de fibres végétales) et les granulaires (sous forme de vrac ou de mélanges stabilisés particules et liant appelés bétons végétaux). Des caractérisations ont été menées à l'échelle matériau et permettent d'alimenter la modélisation de différents types de systèmes (parois avec remplissage, plafonds en combles perdus, murs supports), dans le but in fine de prédire le comportement acoustique de systèmes intégrant des matériaux biosourcés.

## 2 Échelle matériau

On parle de caractérisation à l'échelle matériau lorsque des mesures sont réalisées indépendamment du système de montage qui pourrait être mis en œuvre *in situ* (suspentes de faux plafond, fixation à des rails ou montants métalliques pour des cloisons, renfort éventuels...). L'idée

de l'échelle matériau fait aussi écho ici à des dimensions limitées, de l'ordre d'une dizaine de centimètre de côté, et donc particulièrement réduites par rapport à l'échelle d'un système du bâtiment telle une paroi.

Cette approche est intéressante dans la mesure où elle permet de caractériser très finement les phénomènes dissipatifs qui peuvent exister dans ces matériaux poreux (dissipations visco-inertielle, thermique et mécanique) et qui sont souvent combinés, dans des caractérisations à plus grande échelle, à d'autres effets (couplage multicouche, comportement mécanique de la paroi, transmissions parasites...). Pour autant, la caractérisation à l'échelle d'une paroi reste une étape indispensable dans le but d'évaluer les performances de ces systèmes en situation réelle. La caractérisation à l'échelle matériau est pour sa part très importante vis-à-vis des simulations à mener étant donné que les paramètres mesurés font office de données d'entrée aux outils de simulation.

### 2.1 Caractérisation des matériaux

Dans le cadre de cette étude, les caractéristiques présentées à l'échelle matériau sont principalement issues de mesures au tube de Kundt, suivant une méthode décrite dans la référence [2]. A l'heure actuelle, cette méthode n'est pas normalisée mais constitue une amélioration de la norme américaine ASTM E-2611-17 [3]. Des discussions sont actuellement en cours au niveau ISO pour élargir la norme ISO 10534-2 [4] en vigueur à cette technique.

Le tube utilisé est un tube AFD AcoustiTube de 10 cm de diamètre permettant de couvrir un domaine fréquentiel allant de 50 à 2000 Hz. Cette dimension permet d'assurer une certaine représentativité des matériaux caractérisés et un rapport aux dimensions des hétérogénéités (granulats, fibres) suffisamment important pour limiter les effets de bords.

### 2.2 Spécificités et modèles employés

L'origine naturelle des biosourcés leur confère un grand nombre de spécificités dont il faut tenir compte pour comprendre et prédire leur comportement acoustique à l'échelle matériau. Ces spécificités sont principalement :

- leur **forte anisotropie**, liée à la forme allongée des fibres et particules s'organisant dans des plans successifs parallèles et amenant dans la plupart des cas à un comportement orthotrope ;
- leur **distribution granulométrique étalée**, qui pose la question de la dimension caractéristique à retenir dans des modélisations type micro-macro ;

- leur **porosité multi-échelle**, répartie en trois niveaux et selon différentes dimensions entre et au sein des fibres ou particules, et éventuellement dans le liant.

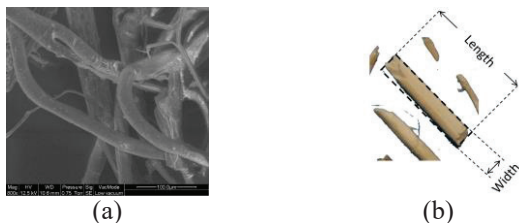


Figure 1 : Exemple de fibres (a) et particules (b) végétales, mettant en évidence les formes allongées responsables de l'anisotropie des matériaux biosourcés associés [5, 6].

Ces spécificités ont été prises en compte afin de déterminer les modèles les plus pertinents pour chaque matériau ainsi que pour évaluer les paramètres associés. Sur ce sujet, de très nombreux développements existent dans la littérature [7].

Des modèles à différents niveaux de complexité sont utilisés aujourd'hui, utilisant de 1 à 9 paramètres, voire plus, afin de décrire la microstructure des matériaux. Nous avons cherché dans le cadre de ce travail à utiliser des modèles suffisamment raffinés pour prendre correctement en compte les comportements des matériaux biosourcés, tout en s'appuyant sur un nombre limité de paramètres.

Enfin, étant donné le nombre important d'échantillons en jeu et l'absence de méthodes de mesure directe pour certains paramètres nécessaires à la modélisation, des méthodes de caractérisation indirectes ont été privilégiées [8, 9]. Au final, pour les matériaux considérés, deux approches ont été employées :

- le modèle Johnson-Champoux-Allard-Lafarge dit JCAL [10, 11], pour les matériaux fibreux ;
- un modèle 'hybride' Johnson-Zwikker-Kosten [10, 12], pour les matériaux granulaires.

Suivant l'approche, entre 4 et 6 paramètres ont donc été évalués :

- La **porosité**  $\Phi$ , ne correspondant pas systématiquement à la porosité ouverte, du fait du caractère multi-échelle du matériau ;
- La **résistivité**  $\sigma$  ;
- La **tortuosité**  $\alpha_\infty$  (pouvant être relativement élevée dans le cas des granulaires, du fait de la forme et de l'allongement des particules),
- La **longueur caractéristique visqueuse**  $\Lambda$  ;
- La **longueur caractéristique thermique**  $\Lambda'$  (uniquement pour les laines végétales) ;
- La **perméabilité thermique**  $k_0'$  (uniquement pour les laines végétales).

## 2.3 Résultats

Les caractéristiques (épaisseur, masse volumique, paramètres acoustiques) de 41 matériaux biosourcés ont été évaluées, et sont présentées dans le Tableau 1. Pour tous ces matériaux, les données sont issues de moyennes

calculées sur au moins trois échantillons. Des précisions sont données dans la suite du papier pour chaque catégorie.

### 2.3.1 Laines végétales

Concernant les laines végétales, 18 matériaux ont été éprouvés : des laines très courantes comme le lin, le chanvre et le bois, mais également des laines plus exotiques à base de coco, jute et kéraf.

Les laines caractérisées offrent une bonne vision d'ensemble du spectre de performance pour ce type de matériaux, avec des épaisseurs allant de 8 à 100 mm et des masses volumiques atteignant  $250 \text{ kg/m}^3$ .

On constate que ces matériaux sont, quasi-systématiquement, très poreux ( $\Phi > 95\%$ ) et caractérisés par une tortuosité de l'ordre de 1, ce qui est aussi typique des matériaux fibreux plus conventionnels. La résistivité augmente naturellement avec la densité pour généralement atteindre des valeurs inférieures à  $50\,000 \text{ N.m}^{-4}.\text{s}$ . Enfin, les longueurs caractéristiques et la perméabilité thermique se situent dans les gammes usuelles des matériaux poreux acoustiques.

Les performances caractérisées sont présentées Figure 2 pour une sélection de laines de diverses natures (L'épaisseur est ici différente d'un matériau à l'autre). L'absorption acoustique atteint des niveaux très intéressants et sur un spectre relativement large pour plusieurs matériaux. L'affaiblissement reste pour sa part à la fois corrélé à l'épaisseur et à la résistivité des matériaux.

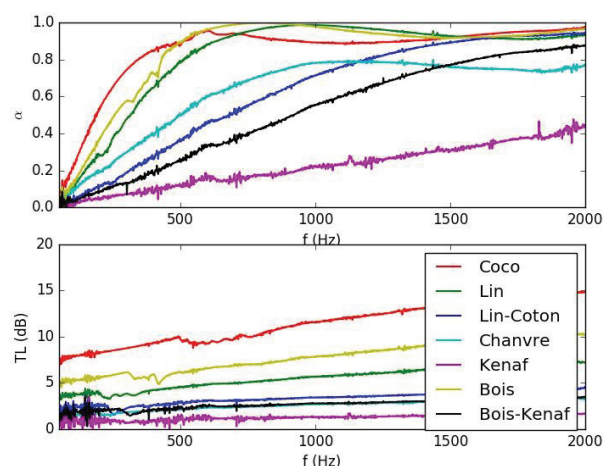


Figure 2 : Propriétés acoustiques de laines végétales en incidence normale, absorption  $\alpha$  et affaiblissement TL (épaisseurs variables d'un échantillon à l'autre).

### 2.3.2 Granulaires en vrac

Six types de granulats en vrac ont également été caractérisés, et déclinés suivant 3 densités pour une même épaisseur de 5 cm, soit 18 mélanges.

Le Tableau 1 souligne des porosités allant de 70 à 90% selon le matériau. Ces porosités, plus faibles que dans le cas des fibreux, correspondent aux porosités interparticules des matériaux, les pores, dits intraparticules, ne participant pas à la dissipation dans ce cas [6]. Ces granulats en vrac sont très perméables ( $\sigma < 10\,000 \text{ N.m}^{-4}.\text{s}$ ), du fait de l'existence des pores de grandes dimensions entre les particules, ce qui se traduit par des longueurs caractéristiques inférieures à celles des laines. La caractéristique la plus marquante reste néanmoins la tortuosité importante des matériaux, directement liée à la forme parallélépipédique des particules (Figure 1(b)).



Des courbes d'absorptions et d'affaiblissements acoustiques de ces granulats sont présentées Figure 3. Elles soulignent un comportement relativement similaire d'un granulat à l'autre, le type de granulat et sa densité influant légèrement sur la position et l'amplitude du pic d'absorption et sur le niveau d'affaiblissement.

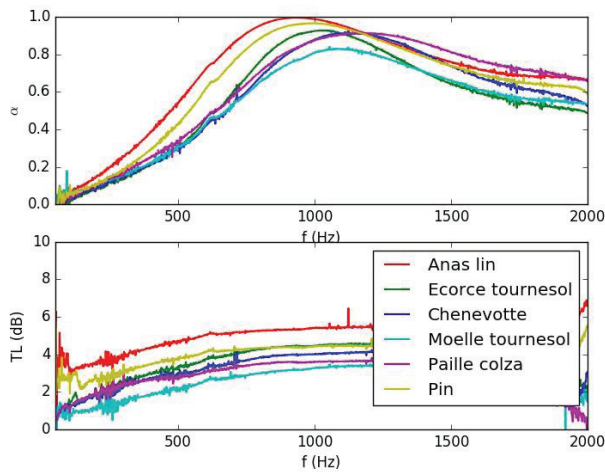


Figure 3 : Propriétés acoustiques de granulats végétaux en vrac en incidence normale, absorption  $\alpha$  et affaiblissement TL (pour la densité intermédiaire des échantillons figurant dans le Tableau 1).

### 2.3.3 Bétons végétaux

Les résultats relatifs à des bétons végétaux et enduits sont enfin présentés. Les bétons de chanvre sont ici de densité moyenne et correspondent à une formulation type « MUR ». Ils se caractérisent par une porosité assez faible ( $\Phi < 50\%$ ), le liant saturant une partie des pores interparticules, ce qui a aussi pour effet une augmentation de la résistivité et une baisse de la longueur caractéristique visqueuse. Leurs résistivités restent modérées.

Les enduits caractérisés ici sont des matériaux très chargés en liant et sont particulièrement fermés en surface, et en conséquence très résistifs malgré une porosité modérée.

Les performances des bétons de chanvre sont données à la Figure 4, soulignant un effet significatif du liant dans le béton de chanvre, et entraînant une absorption dégradée, ainsi qu'un gain d'affaiblissement par rapport à la chenevotte brute.

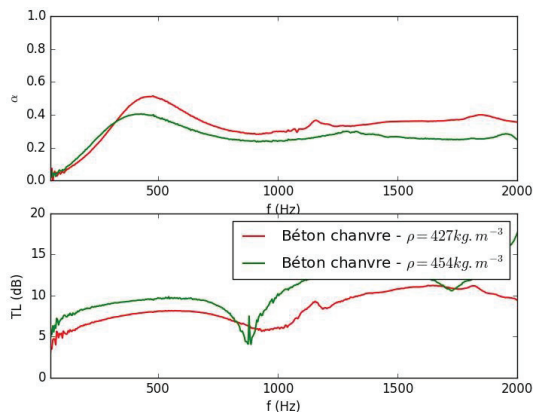


Figure 4 : Propriétés acoustiques de bétons de chanvre en incidence normale, absorption  $\alpha$  et affaiblissement TL.

## 3 Échelle système

### 3.1 Modélisation

Les performances acoustiques sont prédites en utilisant une méthode par matrice de transfert (TMM Transfert Matrix Method) [7,13] implémentée dans le logiciel AcouSYS. Les différentes couches (planes et d'épaisseur constante) constituant la structure peuvent être de type solide, fluide, poreux (suivant la théorie de Biot-Allard généralisée [14]) ou viscoélastique. Cet outil peut être utilisé pour prédire l'indice d'affaiblissement acoustique, le niveau de bruit de choc, l'absorption acoustique, le bruit de pluie, les constantes de propagation et le bruit dû à une couche limite turbulente. Une méthode de fenêtrage spatiale est utilisée pour prendre en compte les dimensions finies des systèmes étudiés [15], lorsqu'ils sont soumis à une excitation d'origine aérienne.

La prise en compte des « courts-circuits » vibratoires dus à la présence d'éléments d'ossature est effectuée par une méthode énergétique SEA [16] en moyennes et hautes fréquences pour des raisons de temps de calculs. En basses fréquences, une approche par onde considérant les éléments d'ossature comme des ressorts modélisés par des forces linéiques normales est utilisée.

Une approche FEM (non appliquée ici) peut aussi être utilisée pour améliorer la prédiction basses fréquences avec la prise en compte des comportements modaux [17].

### 3.2 Cloison sur ossature

Dans cette section, l'exemple d'une cloison sur ossature est pris en compte. Cette cloison est constituée d'une ossature métallique M48/R48 et d'une simple couche de plaques de plâtre de 12,5 mm de part et d'autre. La cavité est remplie d'un matériau absorbant en 45 mm d'épaisseur.

Dans un premier temps, le modèle (sous AcouSYS) est calé sur des mesures en laboratoire pour ce type de cloison intégrant un isolant en laine de verre standard de 30 kg/m<sup>3</sup> (autres paramètres issus de la base de données AcouSYS). Dans un second temps, divers matériaux biosourcés de type laine végétale, présentés Tableau 1 (soit 18 matériaux), sont utilisés en remplissage de cavité. On considère que le matériau de remplissage est sans contact avec les plaques de plâtre. Ainsi, on peut faire l'hypothèse que les caractéristiques mécaniques des matériaux (non mesurées à ce jour) ont une influence négligeable.

La Figure 5 montre l'indice d'affaiblissement acoustique calculé par bande de tiers d'octave pour la cloison avec différentes laines végétales en remplissage. On note que l'influence du matériau dans la cavité est relativement faible. En effet, l'effet de l'ossature métallique liant les plaques de plâtre est primordial. Cependant, des différences sont visibles dans les hautes fréquences autour de la fréquence critique des plaques de plâtre (~2600 Hz).

Une étude précédente réalisée sur un même système, mais ne tenant pas compte de l'influence de l'ossature [18], avait montré que la tortuosité et la résistivité avait une influence au-dessus du tiers d'octave 800 Hz et les longueurs caractéristiques au-dessus de la fréquence critique ; la porosité ayant un impact sur tout la bande de fréquence étudiée.

Une performance  $R_w+C$  entre 38 et 39 dB est obtenue sauf pour le système intégrant le 18<sup>e</sup> matériau (lin aiguilleté) à 41 dB. Ce matériau a des caractéristiques assez différentes des autres matériaux considérés en termes de

densité, de résistivité, de porosité et de tortuosité, mais c'est sa forte densité (251 kg/m<sup>3</sup>) qui ici marque cette différence.

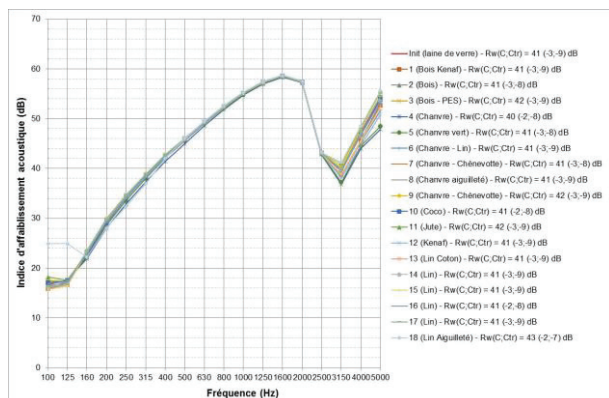


Figure 5 : Indices d'affaiblissement acoustique simulés d'une cloison sur ossature métallique remplie de laines végétales (comparés à un remplissage en laine minérale).

### 3.3 Plafond en combles perdus

Dans cette section, l'exemple d'un plafond en combles perdus est considéré. Ce plafond est constitué d'une plaque de plâtre de 12,5 mm d'épaisseur fixée sur une ossature bois (pannes de 160 mm x 60 mm, espacées de 500 mm) et une couche d'isolant de 200 mm.

Dans un premier temps, le modèle est calé sur des mesures en laboratoire pour un plafond intégrant un isolant en laine minérale standard de 30 kg/m<sup>3</sup> (autres paramètres issus de la base de données AcouSYS). L'effet de l'ossature bois est négligé étant donné qu'elle influence seulement la performance dans les hautes fréquences et ne modifie pas l'indice global de performance. Dans un second temps, divers matériaux biosourcés de type laine végétale ou granulaire en vrac de 200 mm d'épaisseur sont considérés (voir Tableau 1).

On notera que le matériau isolant est en contact direct avec la plaque de plâtre ce qui implique que le squelette du matériau poreux est excité. Les propriétés mécaniques de laines végétales, n'ayant pas encore été mesurées, elles sont déduites principalement sur la base de la densité et de la résistivité d'autres matériaux plus standards, et celles des granulaires en vrac, ont été considérées identiques et représentatives de ces types de matériaux ( $E = 0,25$  MPa) [19].

Les Figure 6 et Figure 7 illustrent respectivement l'indice d'affaiblissement acoustique calculé par bande de tiers d'octave pour le plafond avec différentes laines végétales et avec différents matériaux granulaires en vrac. Dans ces exemples, l'influence du matériau apparaît clairement de par le couplage entre la plaque de plâtre et l'isolant. Ainsi, la performance globale  $R_w+C$  varie entre 31 et 41 dB (soit 10 dB de variation), pour une isolation réalisée avec les laines végétales, et entre 31 et 39 dB (soit 7 dB de variation), pour une isolation réalisée avec les matériaux granulaires en vrac.

Une étude paramétrique a été réalisée rapidement sur ce type de système (non présentée ici). Elle met en avant que la performance acoustique est aussi bien influencée par les paramètres mécaniques qu'acoustiques de l'isolant ; les premiers impactent l'allure générale de la courbe (positionnement des fréquences de résonance spécifiques du matériau et du système), alors que les seconds impactent principalement la pente de la courbe. Ainsi, d'un point de vue général, les matériaux les plus lourds, les moins

résistifs et les plus poreux (donc généralement les plus « souples ») correspondent aux meilleures performances.

Néanmoins, il est important de rappeler ici que les hypothèses concernant les propriétés mécaniques des matériaux (module de Young  $E$  et facteur d'amortissement  $\eta$ ) restent à lever et qu'il est fondamental de les caractériser afin de s'assurer de la pertinence des prédictions. Ces propriétés pourront être évaluées sur la base de la norme EN 29052-1 [20], bien que, pour les matériaux en vrac, la méthode proposée risque d'être délicate.

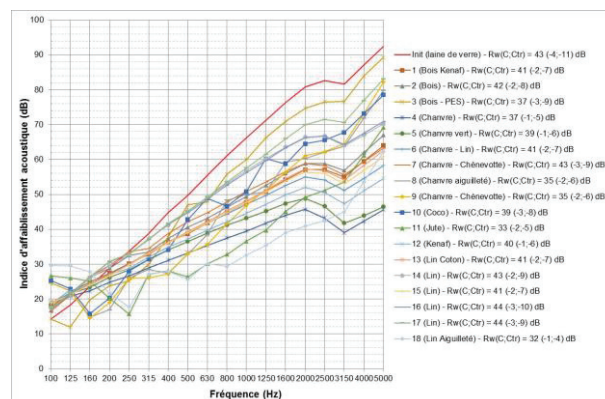


Figure 6 : Indices d'affaiblissement acoustique simulés d'un plafond en combles perdus isolé de laines végétales (comparés à une isolation en laine minérale).

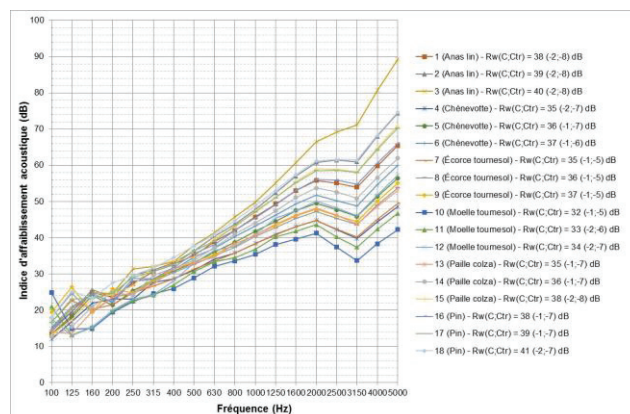


Figure 7 : Indices d'affaiblissement acoustique simulés d'un plafond de combles perdus isolé de granulats en vrac.

### 3.4 Mur en béton de chanvre

Des murs en béton de chanvre, d'épaisseur 200 mm et de dimensions 1320 mm x 920 mm, ont été testés au laboratoire de l'ENTPE [6] en configurations sans et avec enduits de 20 mm appliqués sur les deux faces. Les propriétés acoustiques des éléments sont données Tableau 1 (type bétons végétaux). Des simulations ont été effectuées sur ces différentes configurations en considérant, dans un premier temps, le mur support comme un matériau poreux, puis comme un élément solide. Il est à noter, encore une fois, que les modules d'élasticité des composants n'ont pas été mesurés mais déduits d'autres travaux en étant néanmoins modifiés par rapport à [19] pour une meilleure corrélation calcul/mesure ( $E_{\text{béton de chanvre}}$  utilisé  $\sim 500$  MPa).

Les Figure 8 et Figure 9 présentent respectivement les comparaisons des indices d'affaiblissement acoustique mesurés et simulés sur les deux murs en béton de chanvre.

D'après les résultats, mis à part le mur de type 1 sans enduit qui pose encore problème (vraisemblablement du fait des niveaux mesurés faibles), les comparaisons



calcul/mesure sont relativement satisfaisantes lorsque le mur support seul est considéré comme un matériau poreux (ici encore, les paramètres mécaniques et acoustiques ne doivent pas être négligés). Lorsque les enduits sont pris en compte (modélisés comme un matériau solide, vu la forte résistivité mesurée), le système complet peut être modélisé comme un seul et même matériau de type solide d'épaisseur équivalente.

Les différences observées en basses fréquences sont principalement dues au comportement modal du système non pris en compte par l'outil de calcul, d'autant plus que les dimensions des systèmes mesurés sont faibles. Les phénomènes observés autour des tiers d'octave 400 – 500 Hz et 2000 – 2500 Hz correspondent respectivement à la fréquence critique du mur support et à la fréquence de résonance de l'onde de compression se propageant au sein du mur, cette dernière se couplant à la fréquence de résonance du système « masse/ressort/masse » (~2800 Hz) lorsqu'il y a présence des enduits.

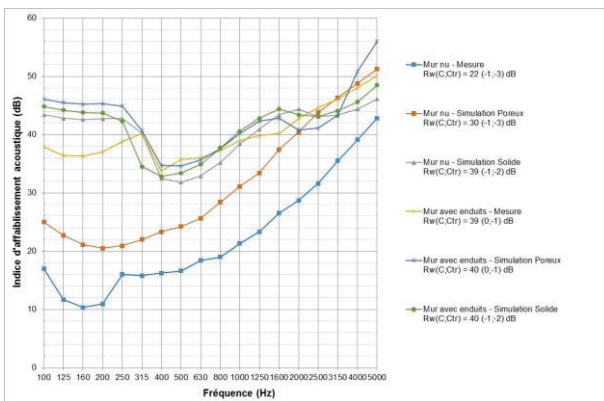


Figure 8 : Comparaison des indices d'affaiblissement acoustique du mur en béton de chanvre type 1 avec et sans enduit mesurés et simulés (modélisations solide / poreuse).

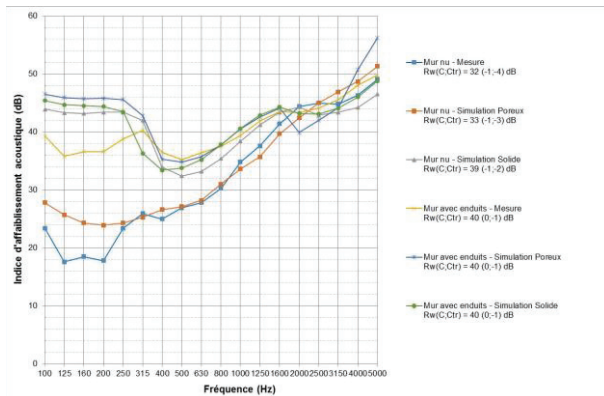


Figure 9 : Comparaison des indices d'affaiblissement acoustique du mur en béton de chanvre type 2 avec et sans enduit mesurés et simulés (modélisations solide / poreuse).

## 4 Conclusion

L'intégration de matériaux biosourcés dans des systèmes de construction standards du bâtiment est traitée dans cette étude. Après la caractérisation des paramètres acoustiques sur un large panel de matériaux biosourcés, sous forme de laines végétales ou de matériaux granulaires en vrac, les données caractéristiques ont été injectées dans un modèle de calcul (AcouSYS) afin d'estimer les performances acoustiques de quelques systèmes (cloisons sur ossature, plafonds en combles perdus, murs supports).

Même si les paramètres mécaniques des matériaux étudiés ne sont pas primordiaux dans le cas d'une cloison sur ossature, leur prise en compte s'avère fortement nécessaire pour d'autres systèmes du fait de leur contribution au comportement « masse/ressort/masse » de ceux-ci.

Par la suite, la démarche utilisée doit être affinée par la caractérisation des données mécaniques des différents matériaux biosourcés, puis être finalisée et validée par la réalisation d'essais en laboratoire sur des maquettes à l'échelle du système constituées de ces matériaux biosourcés.

## Remerciements

Les auteurs remercient la DHUP pour le financement de ces travaux ainsi que l'ensemble des personnes qui ont contribué à cette pré-étude.

## Références

- [1] [https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/12/19/E\\_TLL1239803A/jo](https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/12/19/E_TLL1239803A/jo)
- [2] T. Iwase, Y. Izumi et R. Kawabata, "A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material", *Internoise 98*, New Zealand, (1998).
- [3] ASTM E-2611-17: Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method.
- [4] ISO 10534-2 :1998 : Acoustique - Détermination du facteur d'absorption acoustique et de l'impédance des tubes d'impédance - Partie 2: Méthode de la fonction de transfert.
- [5] C. Piégay, P. Glé, E. Gourdon, E. Gourlay, S. Marceau, "Acoustical model of vegetal wools including two types of fibers", *Applied Acoustics*, 129 C, p. 36-46, (2018).
- [6] P. Glé, « Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation », Thèse ENTPE - Université de Lyon, (2013).
- [7] J.F. Allard, N. Attala, "Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials", John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom, (2009).
- [8] X. Olny, R. Panneton, "Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 2, p. 814–824, (2008).
- [9] R. Panneton, X. Olny, "Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 119, no. 4, p. 2027–2040, (2006).
- [10] D-L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media", *Fluid Mechanics*, vol. 176, p. 379–402, (1987).
- [11] D. Lafarge, P. Lemarinier, J-F. Allard et V. Tarnow, "Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102, no. 4, p. 1995–2006, (1997).

- [12] C. Zwikker et C-W. Kosten, "Sound Absorbing Materials", Elsevier, New-York, 174 p., (1949).
- [13] M. L. Munjal, "Response of a multi-layered infinite plate to an oblique plane wave by means of transfer matrices", *Journal of Sound and Vibration*, 162, p. 333-343, (1993).
- [14] M.A. Biot, "Theory of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range, II. Higher frequency range", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 28, p. 168-91, (1956).
- [15] M. Villot, C. Guigou-Carter, L. Gagliardini, "Predicting the acoustical radiation of finite size multi-layered structures by applying spatial windowing on infinite structures", *Journal of Sound and Vibration*, 245(3), p. 433-455, (2001).
- [16] C. Guigou-Carter, M. Villot, "Analytical and experimental study of single frame double wall", Euronoise 2006, Finland, (2006).
- [17] C. Coguenanff, "Robust design of lightweight wood based systems in linear vibroacoustics", Thèse CSTB - Université de Paris-Est, (2015).
- [18] R. Foret, C. Guigou-Carter, J.-B. Chéné, "Porous material parameters influencing the acoustic performances of buildings construction systems", Internoise 2010, Portugal, (2010).
- [19] V. Cerezo, « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique », Thèse de doctorat, Ecole doctorale MEGA, Lyon, (2005).
- [20] EN 29052-1 :1992 : Acoustique - Détermination de la raideur dynamique - Partie 1: Matériaux utilisés sous les dalles flottantes dans les bâtiments d'habitation.

Tableau 1 : Synthèse des caractérisations de paramètres acoustiques des matériaux biosourcés à l'échelle matériau.

Type	Matériau	Composition	e (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (Nm <sup>-4</sup> s)	$\phi$ (%)	$\alpha_{\infty}$	$\Lambda$ ( $\mu$ m)	$\Lambda'$ ( $\mu$ m)	$k_0'$ (10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> )
Laine minérale	Référence	Laine de verre		30	21 000	95,0	1,00	60	150	
Laines végétales	1	Bois – Kenaf	0,040	53	5 030	94,9	1,02	118	211	0,95
	2	Bois	0,085	57	8 222	93,6	1,14	98	351	0,37
	3	Bois – PES	0,050	65	27 709	96,0	1,72	81	202	0,33
	4	Chanvre	0,090	29	1 652	93,5	1,00	335	360	1,66
	5	Chanvre vert	0,090	24	3 300	97,6	1,00	359	453	3,56
	6	Chanvre - Lin	0,100	32	4 900	97,0	1,00	155	252	1,60
	7	Chanvre - Chênevotte	0,050	56	8 100	94,9	1,12	134	272	1,56
	8	Chanvre aiguilleté	0,008	92	11 000	93,6	1,35	58	122	0,97
	9	Chanvre - Chênevotte	0,018	140	33 000	89,5	1,23	31	145	0,61
	10	Coco	0,105	101	11 581	94,5	1,00	68	339	1,68
	11	Jute	0,011	137	57 000	90,7	1,03	34	124	0,59
	12	Kenaf	0,025	40	4 027	96,3	1,05	181	314	1,22
	13	Lin coton	0,050	33	5 234	94,6	1,00	131	187	0,86
	14	Lin	0,050	33	10 400	96,9	1,00	123	179	0,71
	15	Lin	0,090	34	4 785	94,7	1,00	148	176	0,91
	16	Lin	0,050	36	11 800	97,2	1,00	105	311	0,90
	17	Lin	0,100	47	12 000	96,3	1,00	63	161	0,82
	18	Lin aiguilleté	0,008	251	380 000	83,5	2,05	32	89	1,03
Granulaires en vrac	1	Anas lin	0,050	110	4 906	84,5	2,0	156	-	-
	2		0,050	125	6 974	83,3	2,2	126	-	-
	3		0,050	140	9 133	80,9	2,1	90	-	-
	4	Chênevotte	0,050	90	1 459	78,2	1,7	303	-	-
	5		0,050	110	3 143	76,2	2,1	215	-	-
	6		0,050	130	5 761	71,1	2,4	195	-	-
	7	Écorce tournesol	0,050	160	1 842	73,4	2,0	310	-	-
	8		0,050	180	3 088	71,1	2,3	256	-	-
	9		0,050	200	4 539	71,6	2,7	257	-	-
	10	Moelle tournesol	0,050	30	891	88,4	2,0	454	-	-
	11		0,050	35	1 523	85,5	2,3	324	-	-
	12		0,050	40	3 859	77,1	2,3	188	-	-
	13	Paille colza	0,050	60	1 502	88,6	1,6	231	-	-
	14		0,050	80	3 089	85,5	1,8	166	-	-
	15		0,050	100	6 351	84,7	2,2	136	-	-
	16	Pin	0,050	140	3 669	83,6	1,7	147	-	-
	17		0,050	160	5 400	84,9	2,1	140	-	-
	18		0,050	180	8 120	83,3	2,4	132	-	-
Bétons végétaux	1	Béton chanvre 1	0,050	427	27000	49,0	4,4	50	-	-
	2	Béton chanvre 2	0,050	454	40000	46,0	4,7	30	-	-
	3	Enduit sable dégrossi,	0,015	1 660	10 <sup>7</sup>	38,0	-	-	-	-
	4	Enduit chanvre non taloché	0,015	760	10 <sup>7</sup>	66,0	-	-	-	-
	5	Enduit chanvre taloché	0,015	820	10 <sup>7</sup>	62,0	-	-	-	-