

CFA/VISHNO 2016

Analyse du comportement vibratoire d'une structure sandwich éco-compositeA. Monti^a, A. El Mahi^b, Z. Jendli^c et L. Guillaumat^d^aLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France^bUniversité de Maine, Laboratoire d'Acoustique de l'UM UMR CNRS 6613-Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France^cESTACA LAB, Parc Universitaire Laval Changé, Rue George Charpak, 53000 Laval, France^dLAMPA - Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Arts et Métiers Paris Tech CER Angers 2. Boulevard du Ronceray, 49035 Angers Cedex 01, France
arthur.monti.etu@univ-lemans.fr

LE MANS

Cette étude présente la caractérisation vibratoire d'une structure éco-composite sandwich. Les peaux sont en polymère thermoplastique renforcé de fibres de lin et l'âme est en balsa. Des essais d'analyse modale ont été réalisés sur différents type de poutres en configuration encastrée-libre. Dans un premier temps, les peaux en composites stratifiés ont été caractérisées afin de déterminer l'évolution des propriétés mécaniques et de l'amortissement en fonction de la fréquence pour différentes séquences d'empilement. Par la suite, le même type de caractérisation a été mené sur des poutres sandwichs avec différentes épaisseurs de l'âme en balsa. Enfin, les caractéristiques de l'âme seule ont été déduites des essais précédents. Les mécanismes responsables de l'amortissement vibratoire aux différentes échelles de la structure ont été discutés et ont permis d'expliquer les propriétés amortissantes observées.

1 Introduction

Depuis quelques années, les matériaux éco-composites prennent une place de plus en plus importante dans le paysage de la recherche internationale [1]. En effet, dans le contexte actuel d'allègement des structures visant à réduire la consommation de pétrole et les émissions de CO₂, ces matériaux offrent de nouvelles perspectives pour les industriels du transport (automobile, aéronautique, ferroviaire, naval). Parmi ces matériaux, on trouve les composites à matrice polymère renforcés de fibres végétales. Ces fibres issues de l'agriculture (lin, chanvre, sisal, ramie, etc.), présentent en effet des propriétés spécifiques (propriétés mécaniques rapportées à la masse) très intéressantes. Les fibres de lin par exemple, constituent un bon concurrent des fibres de verre synthétiques. D'autre part, l'utilisation de fibres végétales dans l'industrie du composite représente un excellent moyen de valorisation des ressources locales et d'utilisation de matériaux naturels et renouvelables à court terme.

Pour accroître encore plus les performances spécifiques des matériaux, les structures sandwichs sont couramment utilisées. L'insertion d'une âme légère (mousse, nid d'abeille, etc.) entre deux peaux en composite résulte en une augmentation très importante de la rigidité et de la résistance en flexion avec un impact très faible sur la masse totale de la structure. Pour ces raisons, les sandwichs éco-composites apparaissent eux aussi comme de très bons candidats aux problématiques actuelles.

Enfin, les éco-composites s'avèrent être des matériaux intéressants en termes d'amortissement vibratoire. En effet, la microstructure des fibres végétales permet d'accroître la quantité d'énergie vibratoire dissipée par frottements internes. La structure cellulaire de l'âme en balsa peut aussi contribuer à l'amortissement. Ces capacités intrinsèques des matériaux à dissiper l'énergie est actuellement très recherchée pour les structures composites, à l'heure où la réduction de leur masse et la disparition des éléments d'assemblages structuraux au profit de collage tendent plutôt à dégrader les caractéristiques vibratoires globales.

Dans ce contexte, cette étude porte sur l'analyse du comportement vibratoire d'une structure sandwich éco-composite. Les peaux sont en polymère thermoplastique renforcé de fibres de lin continues et l'âme est en balsa. L'évolution des propriétés mécaniques ainsi que du facteur d'amortissement en fonction de la fréquence seront étudiés.

2 Matériaux et mise en œuvre

Les fibres utilisées se présentent sous la forme d'un voile de fibres de lin unidirectionnelles (FLAXTAPE, LINEO) [2]. Il est ainsi possible de réaliser des composites stratifiés, en variant l'orientation des plis pour obtenir la séquence d'empilement souhaitée. L'âme en balsa est

fournie sous forme de panneaux assemblés, ayant subi une découpe régulière en blocs élémentaires. Ceux-ci sont maintenus sur leur face inférieure par une fine couche de fibre de verre permettant la manipulation de la plaque et la réalisation de courbures particulières. La matrice est une résine acrylique activée par du peroxyde (ELIUM, Arkema). Elle est initialement à l'état liquide. Sa viscosité très faible permet de la mettre en œuvre par infusion de résine liquide ou par procédé RTM (Resin Transfert Molding), des procédés usuellement utilisés pour des résines thermodurcissables (vinylester, polyesters, etc.). Les caractéristiques mécaniques des plis composites unidirectionnels en contraintes planes, déterminées lors d'une étude précédente [3], sont présentées dans le Tableau 1. La direction principale (celle des fibres) est notée L , la direction transverse T , les modules d'Young et de cisaillement sont notés respectivement E et G , la masse volumique ρ et le taux de fibre volumique ϕ_v^f .

Tableau 1 : Principales propriétés élastiques du composite unidirectionnel

E_L (GPa)	E_T (GPa)	ν_{LT} (-)	G_{LT} (GPa)	ρ (kg.m ⁻³)	ϕ_v^f (%)
23.3	3.22	0.35	1.53	1100	35-45

3.1 Dispositif expérimental

Dans cette étude, les caractéristiques vibratoires des poutres composites et sandwichs ont été mesurées par des essais d'analyse modale en configuration encastrée-libre. Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM E 756-98 [4]. Les poutres sont encastrées à une de leurs extrémités au moyen d'un dispositif de fixation approprié. L'excitation à proximité de l'encastrement est réalisée au moyen d'un marteau d'impact. La réponse de la structure à son extrémité libre est mesurée par un vibromètre laser. L'ensemble du dispositif est présenté en Figure 1.

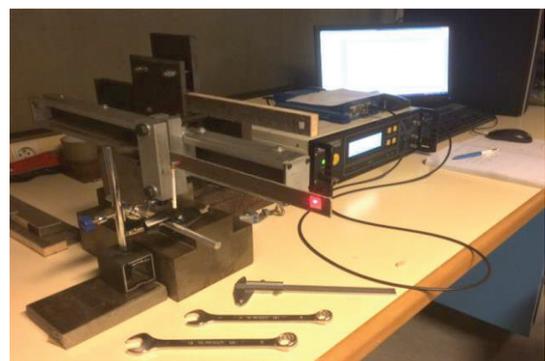


Figure 1 : Dispositif expérimental d'analyse modale

Pour éviter d'endommager les structures sandwichs au moment du serrage de l'encastrement, des talons métalliques de 40mm de longueur sont insérés au niveau de l'extrémité encastrée. Le serrage de l'encastrement est progressivement augmenté jusqu'à ce que la fonction de réponse en fréquence mesurée ne varie plus avec le serrage.

Différentes catégories d'éprouvettes ont été préparées. Pour étudier les propriétés dynamiques des peaux du sandwich, trois configurations de composites stratifiés ont été analysées. Dans chaque cas, les poutres de dimensions 250x20x1.6 sont constituées de 4 plis unidirectionnels dont les séquences d'empilement sont respectivement $[0/0]_s$, $[0/90]_s$ et $[+45/-45]_s$, l'indice s indiquant la symétrie miroir de la séquence d'empilement. Les poutres sandwichs de longueur 250mm et d'épaisseur 40mm ont toutes été réalisées avec des peaux stratifiées à $[0/90]_s$, présentant une épaisseur de 1.6 mm, et avec des âmes en balsa de densité nominale 150 kg.m^{-3} . L'influence de l'épaisseur de l'âme a été étudiée en utilisant des épaisseurs de balsa de 6.4mm, 12.7mm, 15.9mm et 19.1mm. Dans chaque configurations, six poutres ont été testées, afin de prendre en compte les différentes sources de variabilité des résultats (matériaux, mesures, etc.).

3.2 Méthode de mesure de l'amortissement

La fonction de réponse en fréquence (FRF) est ensuite enregistrée et post-traitée afin d'identifier les modes de flexion et de mesurer les fréquences de résonance ainsi que les amortissements modaux. La Figure 2 montre une représentation de l'amplitude et de la phase de la FRF d'une poutre sandwich. On constate que les modes obtenus sont bien séparés et symétriques.

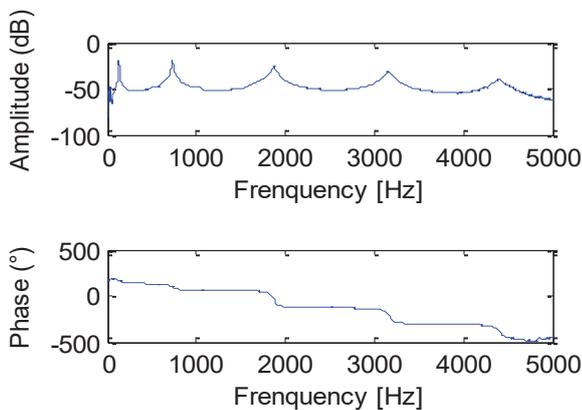


Figure 2: Représentation de Bode de la Fonction de Réponse en Fréquence d'une poutre sandwich

Les caractéristiques vibratoires ont été déterminées au moyen d'un algorithme de « circle-fitting ». A partir du module et de la phase, la FRF au voisinage de chaque mode est projetée dans le plan de Nyquist [5]. Dans cet espace, les pics d'un mode de résonance s'apparentent à un cercle. Il est alors possible d'interpoler les points de la FRF par un cercle dont les caractéristiques présentées sur la Figure 3 permettent de déduire la fréquence de résonance et l'amortissement modal (Eq. (1)).

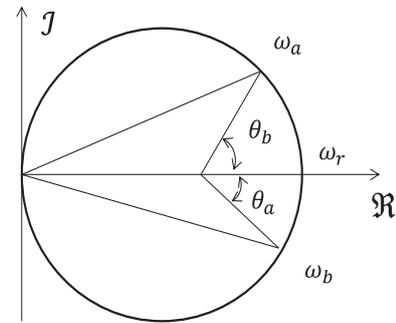


Figure 3 : Caractéristiques du cercle modal dans le plan de Nyquist

$$\zeta = \frac{\eta}{2} = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{2\omega_r(\omega_a \tan(\frac{\theta_a}{2}) + \omega_b \tan(\frac{\theta_b}{2}))} \quad (1)$$

La

Figure 4 présente les résultats d'interpolation du second mode présenté sur la FRF de la Figure 2. On constate une bonne qualité d'interpolation (Figure 4 (a)), ainsi qu'une bonne reconstruction de la FRF locale

(Figure 4 (b)) à partir des données mesurées.

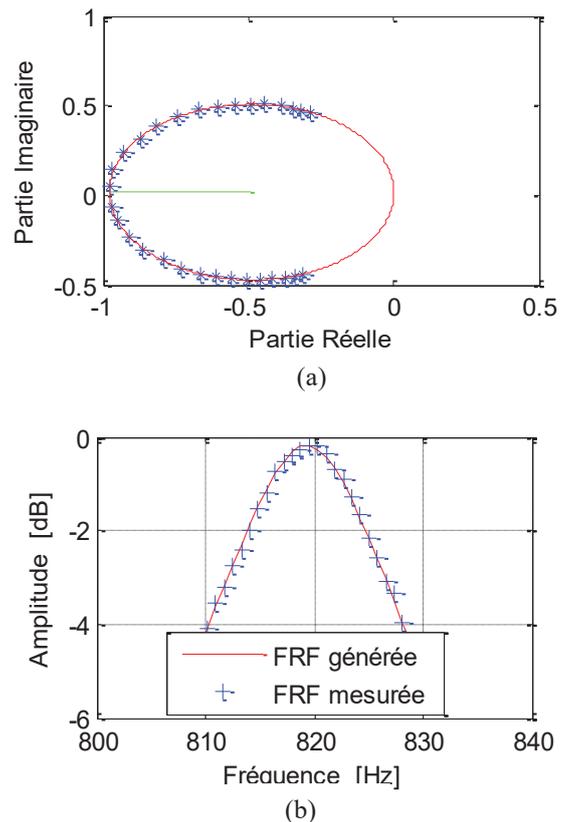


Figure 4 : Méthode du "Circle-Fitting" : a) Interpolation d'un mode par un cercle de la plan de Nyquist et b) Comparaison de la FRF mesurée et générée

4 Résultats et discussion

4.1 Comportement vibratoire des poutres composites

Dans un premier temps, les fréquences de résonances des différentes poutres ont été mesurées. Pour les poutres composites, on peut en déduire le module d'Young longitudinal E_{11} homogénéisé par l'équation Eq. (2) :

$$E_{11} = \frac{12\rho l^4 f_n^2}{e^2 C_n^2} \quad (2)$$

où l est la longueur de la poutre, f_n la fréquence de résonance du mode n , e son épaisseur et C_n un coefficient modal dont la valeur est précisée dans le Tableau 1. Ainsi, on peut déterminer l'évolution des modules longitudinaux des trois catégories de poutres composites en fonction de la fréquence. La Figure 5 présente les résultats obtenus.

Tableau 2: Coefficients modaux pour des poutres uniformes encastrées libres

Mode	1	2	3	4	$\forall n > 3$
C_n	0.55959	3.5069	9.8194	19.242	$\left(\frac{\pi}{2}\right)(n - 0.5)^2$

On remarque que les trois modules évoluent assez peu avec la fréquence. L'augmentation du module dans la configuration $[+45/-45]_s$ est un peu plus marquée, en raison de la sollicitation de la matrice principalement. Dans les deux autres configurations, la présence de fibres dans l'axe longitudinal rigidifie nettement les poutres et diminue leur caractère viscoélastique. D'autre part, les valeurs des modules en très basse fréquence correspondent bien aux valeurs mesurées par des essais de traction quasi-statique dans le cas de la configuration $[0/0]_s$ [3], ou déduites des caractéristiques du pli unidirectionnel d'après la théorie des stratifiés [6], pour les deux autres configurations.

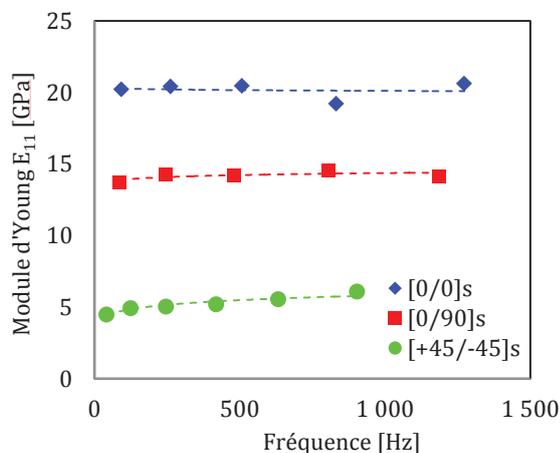


Figure 5 : Evolution des modules d'Young des poutres composites

La Figure 6 présente l'évolution de l'amortissement en fonction de la fréquence pour les trois catégories d'éprouvettes. Quelle que soit la séquence d'empilement, l'amortissement apparaît plus important pour les basses fréquences et décroît ensuite rapidement jusqu'à une valeur quasiment stabilisée. Cette évolution est beaucoup plus marquée pour les composites $[0/90]_s$, qui s'avère être beaucoup plus amortissante que les deux autres.

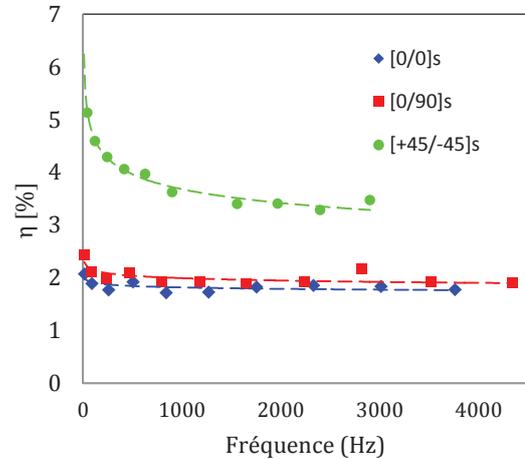


Figure 6 : Influence de la séquence d'empilement sur l'amortissement des poutres composites

Il existe plusieurs mécanismes à différentes échelles expliquant ces valeurs d'amortissement. D'une part, la matrice elle-même a un comportement viscoélastique. L'utilisation d'une résine thermoplastique permet d'obtenir des coefficients d'amortissement plus élevés que dans le cas des thermodurcissables, en raison d'une plus grande liberté de mouvement et donc de friction des chaînes de polymères. D'autre part, les fibres de lin utilisées présentent des caractéristiques viscoélastiques que l'on ne retrouve pas dans les fibres de synthèse (carbone, aramides, verre). En effet, les fibres végétales ont une microstructure particulière [7], présentée en Figure 7. Elles se présentent comme un assemblage de couches concentriques composées de différents constituants organiques (lignine, hémicellulose, etc.), ayant par nature un comportement viscoélastique. De plus, ces différentes parois sont renforcées par des microfibrilles de cellulose orientées. Ainsi, les fibres elles même peuvent dissiper de l'énergie vibratoire, soit grâce à la viscoélasticité de ses différents constituants, soit par des mécanismes de frictions entre les différentes parois ou entre les microfibrilles.

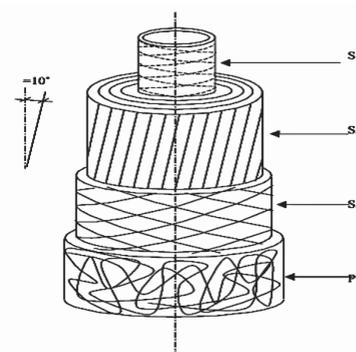


Figure 7 : Microstructure d'une fibre végétale, d'après [7].

Il existe aussi des mécanismes dissipatifs à l'échelle de la structure composite (fibres + matrice). En effet, comme présenté sur la Figure 8, les fibres unitaires ne sont pas toutes parfaitement séparées et peuvent être assemblées en faisceau au cœur desquels la matrice peut avoir du mal à pénétrer pendant le processus de mise en œuvre. Des frottements peuvent ainsi avoir lieu entre les différentes fibres constituant un faisceau, ou encore à l'interface entre les fibres et la matrice, là où la cohésion entre les différents constituants est la moins bonne.

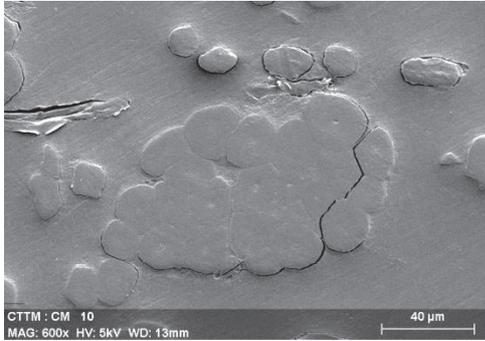


Figure 8 : Coupe microscopique d'un faisceau de fibres sur une section de composite lin/Elium [8]

4.2 Amortissement des poutres sandwichs

Dans un second temps, différentes configurations de sandwichs ont été testées. Les matériaux considérés ici sont constitués de peaux de fibres de lin et résine Elium avec une séquence d'empilement à $[0/90]_s$. L'âme est en balsa, et différentes épaisseurs ont été utilisées.

La Figure 9 présente l'évolution de l'amortissement des poutres en fonction de l'épaisseur h de l'âme utilisée. On constate que l'amortissement modal η_s diminue avec la diminution de l'épaisseur de l'âme et tend vers une tendance proche de celle des stratifiés $[0/90]_s$. A contrario, l'augmentation de l'épaisseur de l'âme tend clairement à augmenter la quantité d'énergie dissipée par la structure.

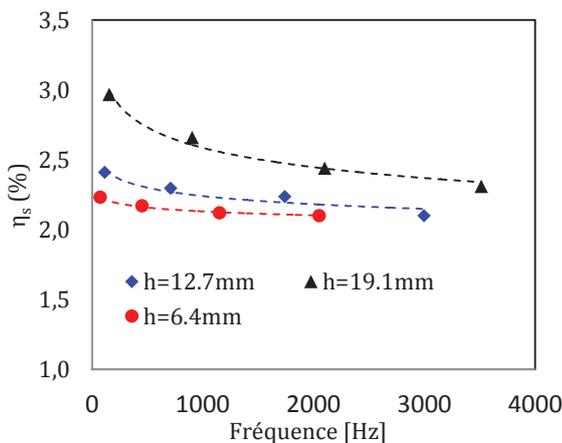


Figure 9 : Influence de l'épaisseur de l'âme sur l'amortissement des structures sandwichs

Là encore, différents phénomènes peuvent expliquer l'amortissement des structures sandwichs. L'amortissement global est en effet une combinaison des amortissements des différents constituants. En termes énergétiques, on a :

$$\eta_s = \frac{1}{U_a} \sum_c \sum_{ij} \eta_{ij}^c U_{ij}^c \quad (3)$$

où η_s est l'amortissement global de la structure sandwich, η_{ij}^c l'amortissement du constituant c (peau ou âme) dans la direction ij , U_{ij}^c l'énergie de déformation élastique dans la direction ij , et U_a l'énergie de déformation élastique globale de la structure.

Ainsi, on retrouve une part de dissipation due aux peaux composites, dont les mécanismes ont été expliqués précédemment. Une autre part de l'énergie est dissipée par l'âme. Pour rappel, le balsa est un bois dont la microstructure est cellulaire et périodique. Les parois cellulaires sont composées de constituants organiques (cellulose, hémicellulose, etc.) qui ont une fois encore un comportement viscoélastique. D'autre part, la déformation des cellules (creuses), peut induire des frottements internes responsables d'une partie de la dissipation. Enfin, du fait du procédé de mise en œuvre par infusion de résine liquide, une certaine quantité de résine thermoplastique a été absorbée par l'âme, remplissant ainsi les interstices entre les blocs ainsi que les pores du balsa les plus importants. Le comportement viscoélastique de la résine s'exprime donc aussi dans l'âme. Enfin, à l'échelle de la structure sandwich, des mécanismes de frictions peuvent apparaître à l'interface peaux/âme, en cas de problèmes d'adhésion entre ces deux constituants. Ce genre de mécanismes est à éviter absolument, puisqu'il induit une forte dégradation des propriétés mécaniques de la structure.

4.3 Caractéristiques vibratoire de l'âme en balsa.

Afin de mieux comprendre la participation de l'âme en balsa dans la réponse vibratoire des poutres sandwichs, l'évolution du module de cisaillement G_{13} de l'âme en balsa a été déduite des fréquences de résonance des poutres sandwichs et des peaux par la méthode dite de Oberst. Les caractéristiques des peaux étant connues et les fréquences de résonance des peaux et des sandwichs complets vérifiant la relation présentée en Eq. (4), il est alors possible d'en déduire l'évolution du module de cisaillement de l'âme par les équations données en Eq. (5).

$$\left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2 \left(2 + D \frac{h_p}{h_a}\right) \geq 2.01 \quad (4)$$

$$G_c = P_1 P_2 \quad (5)$$

$$P_1 = [A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_s)^2]$$

$$P_2 = \left[\frac{\left(\frac{2\pi C_n E h_p h_a}{l^2}\right)}{\left((1 - 2A + 2B)^2 + 4(A\eta_s)^2\right)} \right]$$

$$A = \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2 \left(2 + D \frac{h_p}{h_a}\right) \left(\frac{B}{2}\right)$$

$$B = \frac{1}{6\left(1 + \frac{h}{h_1}\right)^2}$$

où f_s et f_n sont respectivement les fréquences de résonance du sandwich complet et des peaux, h_a et h_p sont les épaisseurs de l'âme et des peaux du sandwich, η_s le

coefficient d'amortissement du sandwich et $D = \rho_c/\rho_1$ le ratio des masses volumiques de l'âme et des peaux.

La Figure 10 présente l'évolution du module de cisaillement de l'âme en fonction de la fréquence. On constate une augmentation importante de cette valeur avec la fréquence. Les données en très basse fréquence ont été retirées, cette méthode étant peu fiable pour les valeurs déduites du premier mode.

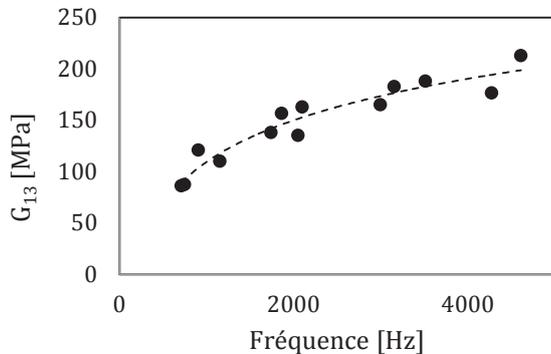


Figure 10 : Evolution du module de cisaillement de l'âme en fonction de la fréquence.

De manière analogue, on peut en déduire l'évolution du coefficient d'amortissement en cisaillement de l'âme par la relation Eq.(6) :

$$\eta_a = \frac{A\eta_s}{[A-B-2(A-B)^2-2(A\eta_s)^2]} \quad (6)$$

La Figure 11 présente l'évolution du coefficient d'amortissement de l'âme η_a en fonction de la fréquence. On constate que l'amortissement de l'âme en balsa est plus élevé en basse fréquence et semble diminuer jusqu'à une valeur quasiment stabilisée. Ces valeurs élevées des coefficients d'amortissement expliquent bien l'augmentation de l'amortissement global η des poutres sandwich lorsque l'on augmente l'épaisseur de l'âme devant celles des peaux, comme présenté en Figure 9.

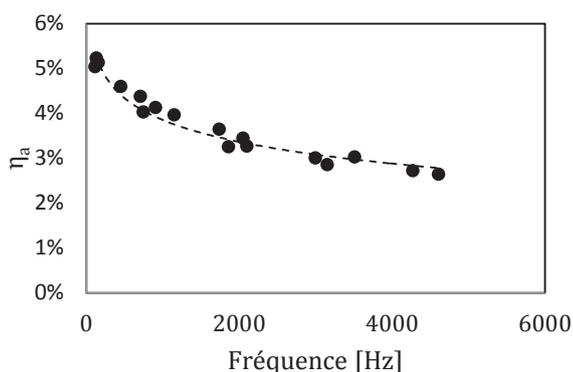


Figure 11 : évolution du coefficient d'amortissement en cisaillement de l'âme en fonction de la fréquence

5 Conclusion

Cette étude présente une caractérisation vibratoire d'une structure éco-composite sandwich à différentes échelles. Le comportement des peaux en composite est

d'abord discuté. L'influence de la séquence d'empilement est étudiée et les mécanismes dissipatifs responsables de l'amortissement sont identifiés. D'autre part, les comportements vibratoires de différentes structure sandwichs ont été analysés. On constate que plus l'épaisseur de l'âme est importante, plus la structure est amortissante. Enfin, la méthode de Oberst est utilisée pour déduire le comportement viscoélastique de l'âme en balsa.

Ainsi, les résultats obtenus ont permis d'obtenir des caractéristiques dynamiques des matériaux constituant la structure sandwich. L'influence du procédé de mise en œuvre a été prise en compte. Les données obtenues peuvent ainsi permettre d'alimenter des modèles numériques prédictifs du comportement vibratoire des structures sandwichs en tenant compte du comportement viscoélastique de ses constituants. Un tel modèle permettrait aussi une compréhension plus fine de l'influence de chaque constituant dans l'amortissement global de la structure, ou encore le dimensionnement optimisant le comportement vibratoire d'une telle structure.

Remerciements

Les auteurs remercient le projet MATIERES et la région Pays de la Loire pour leur support. Les auteurs remercient aussi tout particulièrement Alexandre LEBRUN, Arthur MARTINEZ, Florian RODRIGUES DO VALE, Shinji SAGET et Maëlle TORTEROTOT pour leur aide précieuse dans la réalisation des mesures expérimentales.

Références

- [1] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012.
- [2] M. Khalfallah, B. Abbès, F. Abbès, Y. Q. Guo, V. Marcel, a. Duval, F. Vanfleteren, and F. Rousseau, "Innovative flax tapes reinforced Acrodur biocomposites: A new alternative for automotive applications," *Mater. Des.*, vol. 64, pp. 116–126, 2014.
- [3] A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli and L. Guillaumat, "Manufacturing and mechanical characterization of a bio-based sandwich structure. From the components to the structure .," in *Journées Nationale des Composites 19*, 2015, pp. 1–11.
- [4] "ASTM E756-98 : Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials."
- [5] C. W. De Silva, *Vibration: Fundamentals and Practice*, CRC press. 2006.
- [6] D. Gay, *Matériaux Composites*. 2015.
- [7] A. Lefeuvre, A. Bourmaud, C. Morvan, and C. Baley, "Elementary flax fibre tensile properties: Correlation between stress–strain behaviour and fibre composition," *Ind. Crops Prod.*, vol. 52, pp. 762–769, 2014.
- [8] A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli and L. Guillaumat, "Analyse de l' endommagement d' un composite à matrice thermoplastique renforcée de fibres de lin par émission acoustique .," in *22ème Congrès Français de Mécanique*, 2015.