

Analyse de la réponse dynamique des structures en matériaux composites

M. Assarar¹, A. El Mahi^{1,*}, & J.-M. Berthelot²

¹LAUM, UMR CNRS 6613, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans.

²ISMANS, 44 Avenue F. A. Bartholdi, 72000 Le Mans

*abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr

Résumé

Cette étude présente une analyse numérique par éléments finis des propriétés dynamiques d'une structure de forme quelconque. Elle permet de s'affranchir d'une analyse expérimentale plus longue et difficile à mettre en place. La validation a été effectuée dans le cas d'une structure de forme simple constituée de différents matériaux : un matériau sandwich, un stratifié en verre sergé et un stratifié en verre sergé avec interposition d'une couche viscoélastique. Les propriétés dynamiques des différents constituants ont été identifiées expérimentalement à partir des vibrations en flexion des poutres. La réponse dynamique de la structure considérée a été évaluée à partir de l'analyse par éléments finis en tenant compte des variations en fonction de la fréquence des propriétés dynamiques des constituants. Un très bon accord entre les réponses obtenues à partir de la modélisation et celles obtenues expérimentalement a été observé.

Abstract

The paper presents a numerical analysis of the damping of a structure constituted of laminate materials, laminates with interleaved viscoelastic layers and sandwich materials. Experimental investigation of the damping of the different materials is implemented using beam test specimens and an impulse technique. Modelling of the damping of a structure constituted of these different materials is implemented considering finite element analysis based on the laminate theory taking into account the transverse shear effects. Next, Modelling is applied to the analysis of the damping of a structure constituted of the different materials. The results deduced from modelling are compared with the experimental results for the frequency response of the structure.

Mots-clefs : Composites, vibration, amortissement, modélisation, éléments finis.

1. Introduction

Les matériaux composites à hautes performances mécaniques possèdent des propriétés mécaniques spécifiques (propriétés rapportées à la masse volumique) élevées. Ces matériaux, de nature anisotrope, sont réalisés soit sous forme de matériaux stratifiés, soit sous forme de matériaux sandwichs. L'adaptation de leur architecture permet de moduler leurs propriétés en fonction de leurs utilisations. Dans le cas où ces matériaux sont employés dans des structures soumises à des vibrations permanentes, il est nécessaire de connaître leurs propriétés dynamiques. La maîtrise de ces propriétés exige une information supplémentaire sur l'amortissement de ces matériaux. L'analyse de la variation de l'amortissement d'une poutre constituée d'un matériau orthotrope en fonction de l'orientation des axes du matériau a été développée par Adams et Bacon [1], puis par Ni et Adams [2]. Cette analyse considère

également le cas de matériaux composites équilibrés $\pm\theta$ et de stratifiés croisés, ainsi que des composites de types plus généraux. Le concept introduit par Adams et Bacon a également été appliqué par Adams et Maheri [3] au cas de stratifiés équilibrés $\pm\theta$ dans le cas de composites à fibres de verre ou à fibres de carbone. L'analyse d'Adams et Bacon a été reprise par Yim et Gillespie [4] pour divers composites à fibres de carbone, en prenant en compte l'effet de cisaillement transverse dans le cas de stratifiés orthotropes orientés à 0° ou à 90° . Dans le cas des matériaux sandwichs, la première étude sur les propriétés dynamiques des poutres à corps viscoélastique a été présentée par Kerwin [5], vers la fin des années 50. Il a considéré des poutres sandwichs en appui simple, dont les peaux élastiques étaient beaucoup plus rigides que l'âme. Ainsi, l'âme était supposée ne se déformer qu'en cisaillement transverse et la rigidité en flexion de la poutre sandwichs était celle de la structure de bases. Plus récemment Assarar et al [6] ont mené une analyse approfondie de l'amortissement des composites à fibres de verre en fonction de l'orientation des fibres. Dans le présent travail nous proposons une analyse du comportement dynamique d'une structure constituée de différents matériaux composites : stratifiés, stratifiés avec couche viscoélastique et matériaux sandwichs.

2. Matériaux et dispositif expérimental

Divers matériaux ont été considérés pour élaborer trois structures de même géométrie :

- Une première structure en matériaux sandwichs, constituée de peaux en stratifiés en fibres de verre du type $[0/90]_s$, avec une épaisseur de 1 mm, et une âme en mousse PVC de 15 mm d'épaisseur et de masse volumique de 60 kg/m^3 .
- Une deuxième structure en sergé d'une épaisseur de 5 mm.
- Une troisième structure en sergé identique à la précédente avec interposition d'une couche viscoélastique d'épaisseur de 0,2 mm.

L'épaisseur de la structure en sergé avec et sans couche viscoélastique est choisie de manière à avoir la même rigidité en flexion que la structure en matériau sandwich.

L'étude expérimentale a été menée sur des structures encastées suivant une section carrée de $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ (figure 1). Les structures ont été excitées en un point proche de l'encastrement à l'aide d'un marteau d'impact et la réponse était détectée en un autre point de la partie libre à l'aide d'un vibromètre laser. Les réponses des structures ont été relevées suivant plusieurs points de manière à détecter tous les modes de vibrations situés dans la bande passante $[0, 1000 \text{ Hz}]$. L'ajustement des courbes de réponses expérimentales par une méthode des moindres carrés à l'aide du module d'optimisation du logiciel Matlab, a permis d'obtenir les valeurs des fréquences propres f_i , et des facteurs de perte η_i .

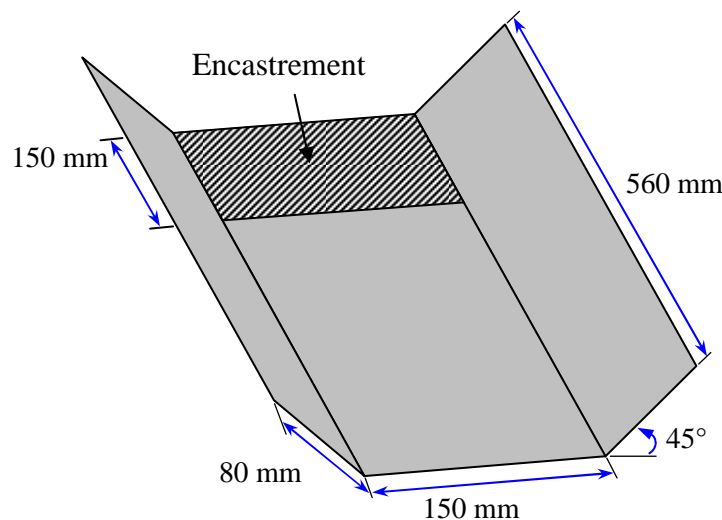


FIG 1 – Structure étudiée

3. Caractérisation dynamique des constituants de la structure

3.1 Matériaux stratifiés

Les coefficients d'amortissement des composites en fibres unidirectionnelles et en sergé η_{11} , η_{22} et η_{66} ont été déterminés à partir de l'analyse expérimentale en flexion de poutres. Les valeurs de l'amortissement sont obtenues pour des directions des fibres égales à 0° et à 90° ainsi qu'une orientation de 45° ou 60° . La figure 2 donne les variations des coefficients d'amortissement en fonction de la fréquence. Ces résultats montrent que l'amortissement augmente lorsque la fréquence croît pour les deux matériaux.

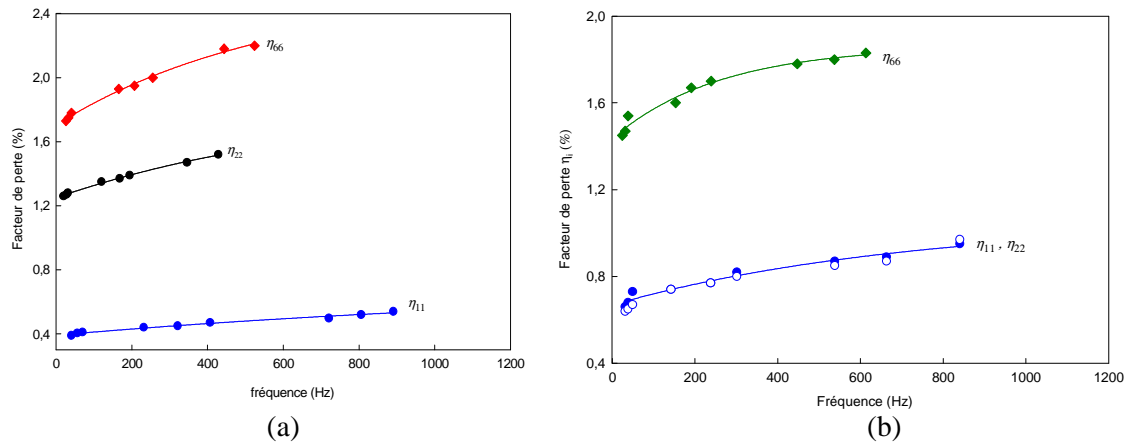


FIG. 2 – Évolution des coefficients d'amortissement en fonction de la fréquence :
a) stratifié à fibres unidirectionnelles, b) stratifié en sergé

3.2 Mousse en PVC

L'évaluation des caractéristiques de la mousse est effectuée à partir des vibrations en flexion d'une poutre encadrée et constituée d'une âme en mousse PVC d'épaisseur 15 mm collée à deux peaux en aluminium de faibles épaisseurs (de l'ordre de 0,50 mm). Par ailleurs, le module d'Young a été évalué à partir des fréquences propres de vibrations des éprouvettes [7]. L'amortissement de la mousse a ensuite été évalué en appliquant la modélisation développée par Assarar [8] aux résultats expérimentaux. La figure 3 donne l'évolution de l'amortissement de la mousse en fonction de la fréquence. Nous observons une diminution de l'amortissement en fonction de la fréquence, cette diminution est beaucoup plus marquée en basse fréquence. L'amortissement devenant pratiquement constant pour des fréquences élevées.

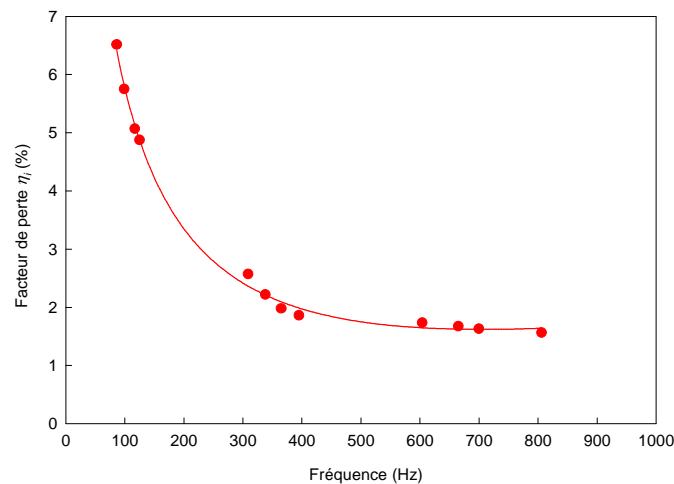


FIG 3 – Évolution du coefficient d'amortissement de la mousse en fonction de la fréquence.

3.3 Couche viscoélastique

L'évaluation des caractéristiques de la couche viscoélastique est effectuée de la même manière que la mousse à partir des vibrations en flexion de poutres. La figure 4 donne l'évolution de l'amortissement du matériau viscoélastique en fonction de la fréquence. L'amortissement de la couche viscoélastique diminue lorsque la fréquence de vibration augmente. Nous observons que l'amortissement de la couche viscoélastique est nettement supérieure aux amortissements des stratifié et de la mousse en PVC.

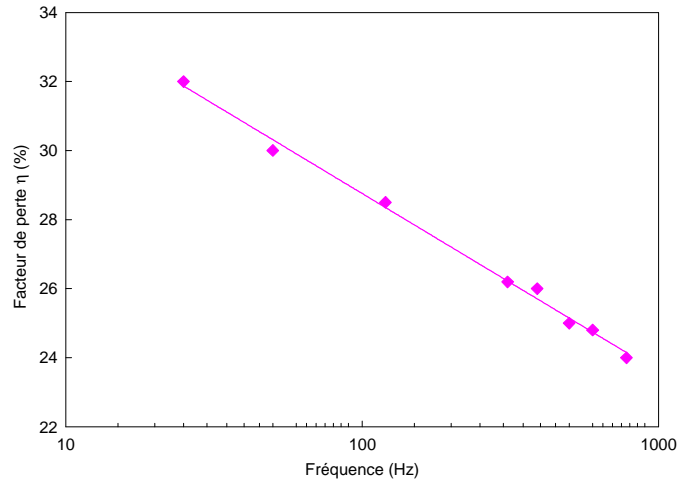


FIG.4 – Évolution du coefficient d'amortissement de la couche viscoélastique en fonction de la fréquence

4. Réponse dynamique de la structure

Les trois structures ont été modélisées en éléments stratifiés à trois nœuds (figure 5). Ces éléments sont basés sur la théorie des stratifiés prenant en compte le cisaillement transverse. Les propriétés mécaniques de chaque couche de l'élément fini sont caractérisées par les rigidités réduites Q_{11} , Q_{22} , Q_{12} et Q_{66} exprimées dans les axes de la couche. Ces rigidités sont déduites des modules E_L , E_T , ν_{LT} et G_{LT} de la couche dans ses axes. La modélisation développée [7] et qui prend en compte la variation en fonction de la fréquence des caractéristiques dynamiques (modules et amortissements) des divers constituants est appliquée aux trois structures.

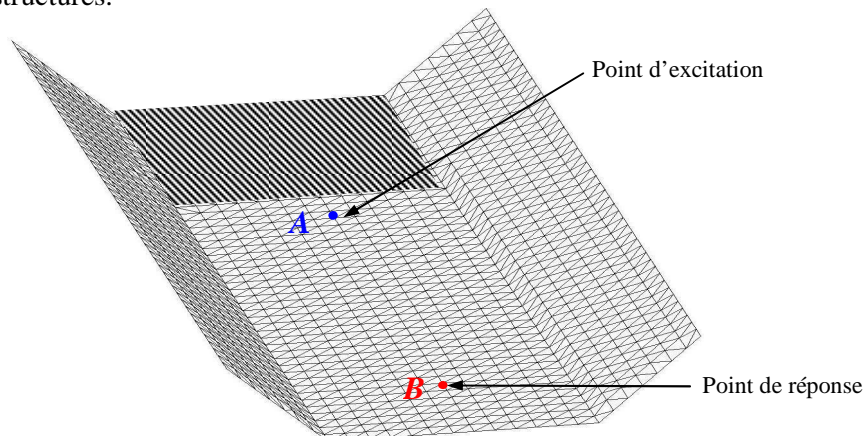


FIG 5 – Positions du point d'excitation et du point de la réponse.

Le tableau 1 compare les résultats obtenus par éléments finis dans le cas des trois structures. L'interposition de la couche viscoélastique ne modifie pratiquement pas les valeurs des

fréquences propres, par contre les amortissements modaux sont fortement augmentés, le coefficient d'amortissement dans ce cas est 6 à 12 fois supérieur à celui dans la structure en sergé sans couche viscoélastique. Le coefficient d'amortissement de la structure en sandwich est 5 fois supérieur au coefficient d'amortissement de la structure en sergé sans couche viscoélastique pour le premier et le deuxième mode. Pour les autres modes le coefficient d'amortissement est multiplié par un coefficient de 2 à 1,5 selon le mode.

Nous avons ensuite déterminé expérimentalement et par éléments finis les réponses en fréquence des trois structures considérées précédemment. Les structures sont excitées au point A et la réponse est mesurée au point B (fig. 5). La figure 6 compare les réponses en fréquences obtenues par l'analyse par éléments finis et l'analyse expérimentale pour les trois structures. Les réponses en fréquences obtenus expérimentalement ont été ajustés de manière à avoir une amplitude nulle de la réponse lorsque la fréquence est nulle. Ensuite, les réponses déduites de l'analyse par éléments finis ont été ajustés de manière à avoir la même amplitude que la réponse expérimentale pour le premier pic. Du fait de la position du point de mesure, les modes 1, 5 et 6 ne sont pas détectés dans le cas de la structure en sergé avec et sans couche viscoélastique. Les modes 2 et 3 sont associés à des fréquences de résonance à 153 Hz et 216 Hz séparées par une anti-résonance à 180 Hz. Le mode 4 a un pic de résonance à 341 Hz. Enfin les modes 7 et 8 conduisent à un pic de résonance au voisinage de 475 Hz. Dans le cas de la structure en sandwich les modes 2, 3 et 5 ne sont pas détectés. Les modes 1, 4, 6, et 7 conduisent à des pics de résonance à 109, 545, 588 et 767 Hz. Les amortissements modaux associés à la réponse de la structure avec couche viscoélastique sont plus élevés par rapport à ceux associés aux réponses des deux autres structures, d'où une amplitude plus faible (de l'ordre de 10 à 15 dB) de la réponse en fréquence. En outre, les résultats obtenus montrent un bon accord entre les résultats obtenus par éléments finis et ceux obtenus à partir des essais expérimentaux.

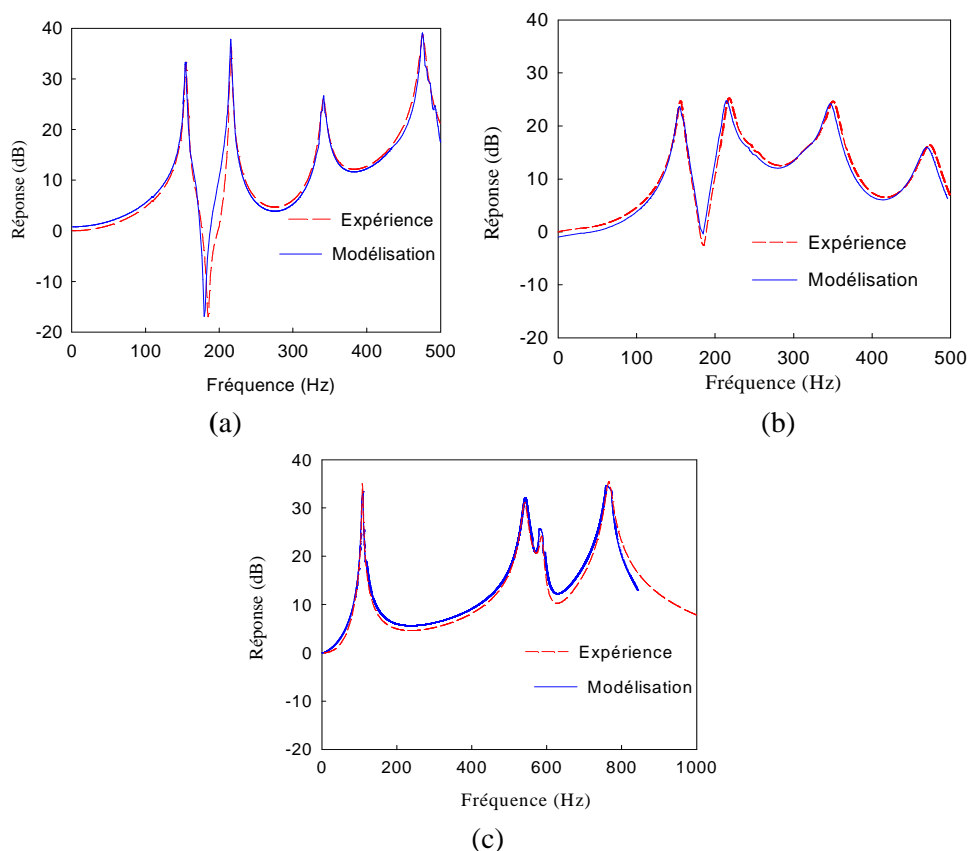


FIG 6 – Réponse en fréquence de la structure : a) sergé sans couche viscoélastique, b) sergé avec couche viscoélastique, c) sandwich

Tableau 1 Comparaison des fréquences propres et de l'amortissement dans le cas des trois structures.

	Structure en sergé sans couche viscoélastique		Structure en sergé avec couche viscoélastique		Structure sandwich	
	Fréquence (Hz)	Amortissement η_i (%)	Fréquence (Hz)	Amortissement η_i (%)	Fréquence (Hz)	Amortissement η_i (%)
Mode 1	107	0,95	108	5,74	109	4,25
Mode 2	153	0,94	153	2,80	148	4,99
Mode 3	215	0,82	216	9,74	423	1,89
Mode 4	341	0,97	343	14,30	545	1,69
Mode 5	345	0,99	348	11,33	588	1,64
Mode 6	457	1,03	456	12,10	630	1,62
Mode 7	471	0,96	471	7,39	767	1,56
Mode 8	475	0,99	477	9,75	830	1,54
Mode 9	538	1,01	540	9,41	853	1,53
Mode 10	556	1,05	562	10,40	955	1,50

5. Conclusion

Ce travail a été consacré à l'étude de la réponse en fréquence d'une structure de géométrie simple. Divers matériaux ont été considérés pour élaborer la structure : matériaux stratifiés, matériaux stratifiés avec interposition d'une couche viscoélastique et matériaux sandwichs. Les propriétés d'amortissement de la structure ont été évaluées en couplant analyse expérimentale et modélisation. Les réponses obtenues par la modélisation ont été évaluées en tenant compte de la dépendance en fréquence des propriétés dynamiques des matériaux constituant les structures. Un très bon accord entre les réponses obtenues à partir de la modélisation et celles de l'analyse expérimentale a été observé. La procédure mise en place peut être appliquée, sans modification à des structures de forme et matériaux complexes, et permet ainsi de s'affranchir d'une analyse expérimentale plus longue et difficile à mettre en place.

6. Références

1. Adams R. D. et D. G. C. Bacon. 1973. "Effect of fiber orientation and laminate geometry on the dynamic properties of CFRP", *Journal of Composite Materials*, 7, pp 402-428.
2. Ni R. G. et R. D. Adams. 1984. "The damping and dynamic moduli of symmetric laminated composite beams. *Journal of Composite Materials*, 18, pp 104-121.
3. Adams R. D. et M. R. Maheri. 1994. "Dynamic flexural properties of anisotropic fibrous composite beams", *Composites Science and Technology*. 50, pp 497-514.
4. Yim J. H. et J. W. Gillespie JR. 2000. "Damping characteristics of 0° and 90° AS4/3501-6 unidirectional laminates including the transverse shear effect", *Composite Structures*, 50, pp 217-225.
5. Kerwin, JR., E.M. 1959 "Damping of flexural waves by a constrained visco-elastic layer". *J.Acoust. Soc. Am.*, 31(7):952-962.
6. M. Assarar, A. El Mahi, J.-M. Berthelot, Y. Sefrani, 2007 "Finite element analysis of dynamic damped in unidirectional composite beams" *International Symposium on composites and Aircraft Materials*, Agadir, Morocco.
7. M. Assarar. 2007. "Étude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs", *Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans*.
8. M. Assarar, A. El Mahi, J.-M. Berthelot, "Identification of shear modulus of sandwich composites in free vibration". European Conference on Composite Materials (ECCM 12). Biarritz 2006.