



**HAL**  
open science

## Évaluation des propriétés mécaniques d'un éco-matériau sandwich

R.E. Nguouama, W Zouari, M Assarar, R Ayad

► **To cite this version:**

R.E. Nguouama, W Zouari, M Assarar, R Ayad. Évaluation des propriétés mécaniques d'un éco-matériau sandwich. Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Nov 2014, Montpellier, France. hal-01144564

**HAL Id: hal-01144564**

**<https://enpc.hal.science/hal-01144564v1>**

Submitted on 22 Apr 2015

**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.

# Évaluation des propriétés mécaniques d'un éco-matériau sandwich

R.E Ngouama, W. Zouari \*, M. Assarar et R. Ayad

Université de Reims Champagne-Ardenne, LISM EA 4695  
IUT de Troyes, 9 rue de Québec BP396, 10026 Troyes Cedex, France  
\* wajdi.zouari@univ-reims.fr

## Résumé

Dans cet article, nous présentons les performances mécaniques et dynamiques d'un éco-matériau sandwich constitué de peaux en résine verte (Green Epoxy) renforcée par des fibres unidirectionnelles (UD) de lin et d'une âme en balsa de différentes épaisseurs. Des essais de flexion 3 points ont été effectués pour déterminer les rigidités de flexion et de cisaillement de cet éco-matériau et des essais de vibration en configuration libre-libre ont été conduits pour évaluer son pouvoir d'amortissement. Enfin, les propriétés de cet éco-sandwich sont comparés à celles d'un autre sandwich constitué d'une âme en mousse de PVC et de peaux en résine époxy renforcée par des fibres UD de verre.

Mots-clés : fibres de lin, balsa, éco-matériau sandwich, caractérisation en flexion.

## Abstract

In this paper, we present the mechanical and dynamic properties of an eco-sandwich material constituted of skins made by unidirectional flax fibers reinforced a green epoxy resin and a core of balsa with different thicknesses. Three-point bending tests have been performed to determine the flexural rigidity of the proposed sandwich and free vibration tests with free-free configuration have been carried out to evaluate its damping properties. Finally, the proposed eco-sandwich properties are compared with those of a sandwich material constituted of a PVC foam core and skins made by unidirectional glass fibers reinforced an epoxy resin.

Keywords: flax fibers, balsa, eco-sandwich material, bending characterization.

## 1 Introduction

Grâce à leurs propriétés mécaniques et d'isolation (thermique et acoustique) intéressantes, l'utilisation des matériaux sandwichs ne cesse d'augmenter dans plusieurs domaines tels que l'automobile, l'aéronautique, le génie civil et l'industrie navale. En plus d'être légers et faciles à mettre en oeuvre, ces matériaux se caractérisent également par une tenue à la corrosion et à la fatigue nettement meilleure que d'autres types de matériaux [1, 2]. Malgré leurs avantages, les matériaux sandwichs synthétiques

(peaux et âme d'origine synthétique) posent de nos jours un grand problème de recyclage car leurs peaux sont généralement constituées de matrices therm durcissables (non recyclables) renforcées par des fibres synthétiques telles que le verre, le carbone et le kevlar et leurs âmes sont en matériaux difficiles à éliminer en fin de vie telles que les mousses de polychlorure de vinyle (PVC). Par conséquent, il est nécessaire d'élaborer de nouveaux matériaux sandwichs plus faciles à recycler et répondant aux exigences réglementaires environnementales actuelles. En l'occurrence, de nombreuses études [3, 4, 5, 6] ont montré que l'incorporation de fibres naturelles, tels que le lin et le chanvre, dans des matériaux thermoplastiques ou therm durcissables en remplacement des fibres de verre permet d'abord, d'avoir des propriétés mécaniques équivalentes à celles des composites classiques, et ensuite, de réduire les problèmes d'élimination en fin de vie du matériau. De ce fait, l'utilisation d'âmes en matériaux naturels tel que le balsa et des peaux en résines vertes renforcées par des fibres végétales tel que le lin pourrait constituer une alternative pour parer à ces problèmes environnementaux de recyclage des matériaux sandwichs synthétiques.

Ce présent travail vise à évaluer les propriétés mécaniques et dynamiques d'un éco-matériau sandwich constitué d'une âme en balsa et de peaux en résine verte (Green Epoxy) renforcée par des fibres longues de lin. Ses performances seront ensuite comparées à celles d'un autre sandwich constitué d'une âme en mousse de PVC et de peaux en résine époxy renforcée par des fibres longues de verre [7, 8].

## 2 Matériaux et essais

### 2.1 Matériaux

Les peaux élaborés dans ce travail sont des stratifiés à fibres unidirectionnelles (UD) de lin renforçant une résine époxy verte (Green Epoxy 56 avec les durcisseurs SR GP 505 et SD Surf Clear) fournie par la société SICOMIN. Le procédé utilisé pour la mise en oeuvre des stratifiés est le moulage au contact consistant à imprégner à température ambiante les couches des stratifiés. Ces couches de lin/green époxy sont posées entre un moule et un contre moule et des tissus de moulage sont utilisés pour séparer les couches des moules. L'ensemble est ensuite mis dans une poche sous vide avec une dépression de 30 kPa pendant 6 heures à température ambiante. Les différents stratifiés mis en oeuvre dans ce travail sont définies par les séquences d'empilement suivantes :  $[0]_4$ ,  $[90]_4$  et  $[0/90]_S$ . Le pourcentage volumique de fibres de lin dans ces stratifiés est d'environ 25%.

Les matériaux sandwichs élaborés dans ce travail sont constitués d'une âme en balsa de différentes épaisseurs et de peaux en stratifiés lin/époxy verte de type  $[0/90]_S$ . Le balsa a été fourni par la société SICOMIN en plaques de surface égale à  $0.74 \text{ m}^2$  et d'épaisseurs 9.5, 12.7 et 25.4 mm. La mise en oeuvre de ces matériaux sandwichs est faite, comme pour les stratifiés seuls, en utilisant le moulage au contact à la différence qu'avant de réaliser la peau supérieure, l'âme en balsa est posée sur la partie supérieure de la peau inférieure.

### 2.2 Essais

Pour connaître les propriétés mécaniques des peaux des éco-matériaux sandwichs, des essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes stratifiées  $[0]_4$ ,  $[90]_4$  et  $[0/90]_S$  (conformément à la désignation D3039 préconisée par l'ASTM) sur une machine universelle de type INSTRON de capacité 100 kN avec une vitesse de 2 mm/min.

L'évaluation des propriétés mécaniques, en particulier de flexion, des éco-matériaux sandwichs a été effectuée par des essais de flexion 3 points (avec une vitesse de 0.5 mm/min) en faisant varier à chaque fois la distance entre appuis de 100 à 250 mm.

Enfin, des essais de vibration en configuration libre-libre sur les éco-sandwichs balsa/lin ont été effectués afin de déterminer leur pouvoir d'amortissement. Ces essais consistent à exciter les échantillons par un marteau d'impact en un point et détecter l'excitation en un autre point par un accéléromètre. Ensuite, un logiciel de la société LMS est utilisé pour traduire l'excitation détectée sous forme d'un signal numérique.

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Essais de traction sur les stratifiés

La figure 1 présente les courbes contrainte-déformation déduites des essais de traction sur les stratifiés  $[0]_4$ ,  $[90]_4$  et  $[0/90]_S$ . Le comportement des stratifiés  $[0]_4$  et  $[0/90]_S$  présente principalement deux zones linéaires. La première est purement élastique et permet de mesurer le module longitudinal en traction  $E_L$ . La seconde zone est visco-élasto-plastique due à la microstructure de la fibre de lin. Pour le stratifié  $[90]_4$ , nous observons un comportement linéaire ensuite un comportement non linéaire jusqu'à la rupture. Le tableau 1 résume les modules d'élasticité longitudinaux de ces stratifiés et met en évidence le faible module du stratifié avec des couches de lin orientées à  $90^\circ$  par rapport à l'orientation  $0^\circ$ .

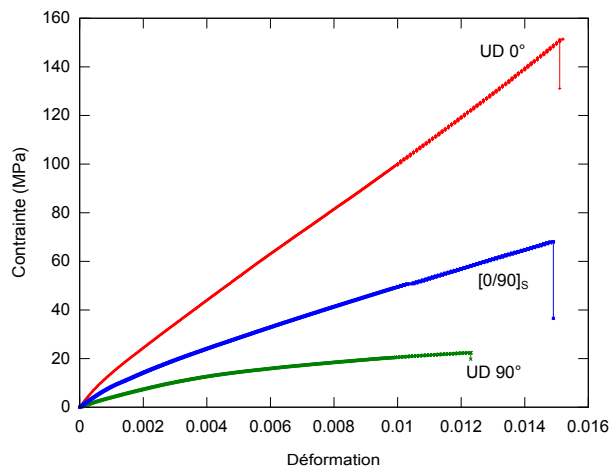


Figure 1: Courbes contrainte-déformation déduites des essais de traction.

Table 1: Modules d'élasticité longitudinaux des stratifiés lin/époxy  $[0]_4$ ,  $[90]_4$  et  $[0/90]_S$ .

Type de stratifié	$[0]_4$	$[90]_4$	$[0/90]_S$
$E_L$ (GPa)	16	5	10

#### 3.2 Essais de flexion 3 points sur les sandwichs

Les figures 2a, 2b et 2c présentent l'évolution de la charge en fonction de la flèche centrale pour les différents éco-sandwichs et pour quatre distances entre appuis (100, 150, 200 et 250 mm). Toutes

les courbes présentent une première partie linéaire traduisant le comportement élastique du matériau. Au-delà de cette zone linéaire, nous remarquons une chute de la courbe suivie d'un comportement non linéaire. Cette chute brutale (traduisant la perte de rigidité du matériau) est due principalement aux contraintes de cisaillement dans l'âme occasionnant ainsi un délaminage entre l'âme et les deux peaux (Figure 3). La reprise de rigidité observée pour les faibles distances entre appuis peut être liée au poinçonnement local au niveau de l'appui central, qui entraîne par la suite un effet de compression au niveau de l'âme.

L'analyse du comportement à la rupture des matériaux sandwichs testés révèle plusieurs modes de rupture (Figure 3). Cette différence peut être liée à la disposition des blocs de balsa au sein de l'âme du sandwich (blocs collés) et de leur comportement anisotrope.

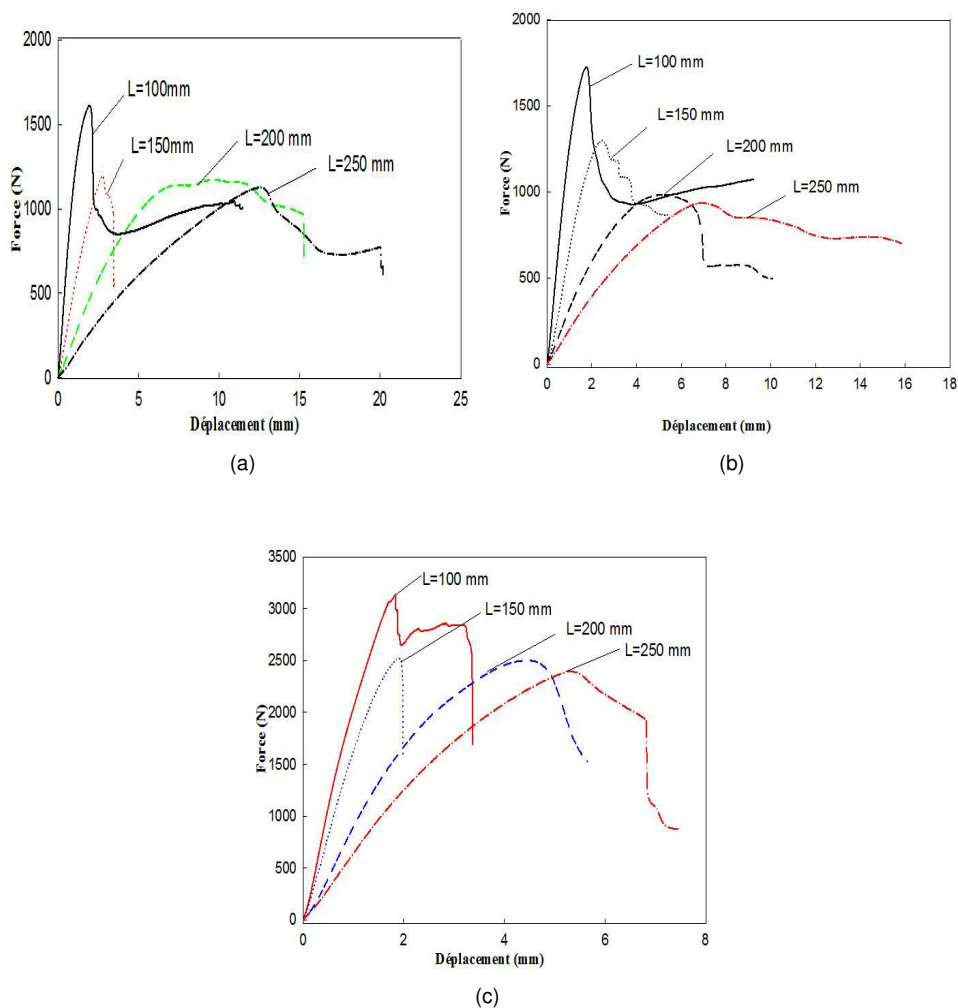


Figure 2: Courbes charge-flèche centrale des matériaux sandwichs balsa/lin avec une âme d'épaisseur: a) 9.5 mm b) 12.7 mm et c) 25.4 mm.

Le tracé du rapport  $\frac{\delta}{PL}$  ( $\delta$  étant la flèche au centre de l'éprouvette,  $P$  la charge appliquée et  $L$  la



Figure 3: Quelques modes de rupture des éco-matériaux sandwichs.

distance entre appuis) en fonction de  $L^2$  permet d'obtenir les rigidités de flexion, notée  $D$ , et de cisaillement, notée  $F$ , par unité de largeur. En effet, en utilisant la relation suivante qui lie la flèche  $\delta$  à la charge appliquée proposée dans [9] :

$$\delta = \frac{PL^3}{48bD} + \frac{PL}{4bF} \quad (1)$$

avec  $b$  la largeur de l'éprouvette, nous pouvons en déduire l'expression qui lie  $\frac{\delta}{PL}$  à  $L^2$  :

$$\frac{\delta}{PL} = \frac{L^2}{48bD} + \frac{1}{4bF} \quad (2)$$

Ainsi,  $\frac{1}{48bD}$  représente la pente de cette droite et  $\frac{1}{4bF}$  l'ordonnée à l'origine. La figure 4 montre l'évolution de  $\frac{\delta}{PL}$  en fonction de  $L^2$  des trois sandwichs étudiés. Le tableau 2 montre les rigidités de flexion et de cisaillement par unité de largeur expérimentales des sandwichs étudiés.

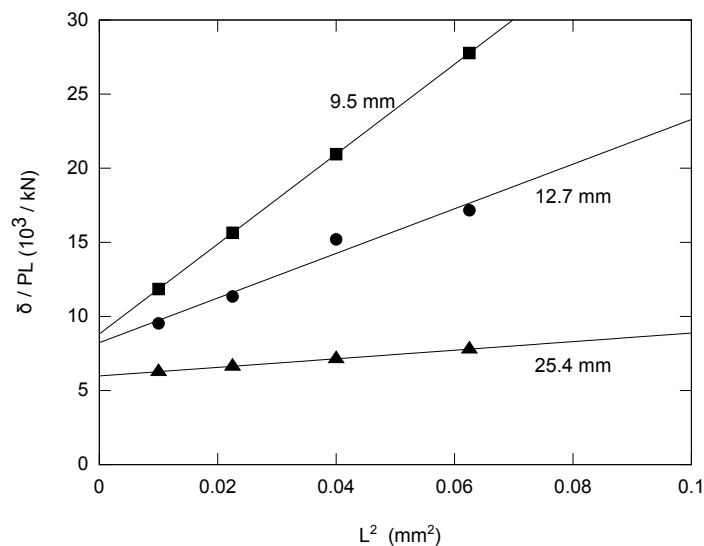


Figure 4: Courbes  $\frac{\delta}{PL}$  en fonction de  $L^2$  pour les trois éco-sandwichs.

Les figures 5a et 5b présentent une comparaison des rigidités de flexion et de cisaillement de l'éco-sandwich à âme d'épaisseur 25 mm avec d'autres sandwichs constitués d'une âme en mousse de PVC

Table 2: Rigidités de flexion et de cisaillement des éco-sandwichs étudiés.

Épaisseur de l'âme (mm)	Rigidité de flexion $D$ (N.m)	Rigidité de cisaillement $F$ (kN/m)
9.5	1717	709
12.7	3585	773
25.4	14387	836
38.1	18092	1494

(de différentes masses volumiques) et de peaux en stratifiées à fibres UD de verre et résine époxy étudiés par Farooq dans [8]. Nous remarquons que notre éco-sandwich balsa/lin présente une rigidité de flexion supérieure à celles des sandwichs PVC/verre élaborés dans [8]. La rigidité de cisaillement de notre éco-sandwich est supérieure à celles des deux premiers sandwichs PVC/verre (masses volumiques du PVC égales à 60 et 80  $\text{Kg/m}^3$ , respectivement) mais reste légèrement inférieure à celle du troisième.

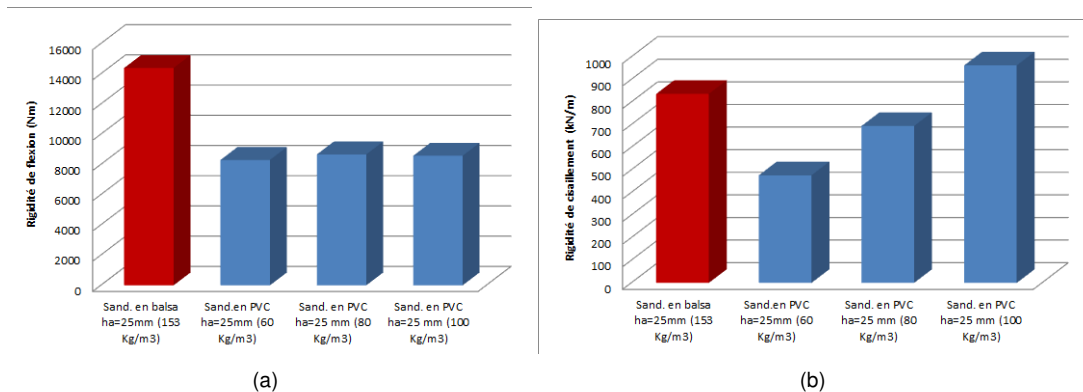


Figure 5: Comparaison des propriétés de l'éco-sandwich blasa/lin 25 mm avec un autre matériau sandwich mousse en PVC/verre étudié dans [8] : a) Rigidité de flexion et b) Rigidité de cisaillement.

### 3.3 Essais de vibration sur les éco-sandwichs

Des essais de vibration sur les éco-matériaux sandwichs balsa/lin en configuration libre-libre ont été conduits afin de déterminer le pouvoir d'amortissement de ces matériaux. L'analyse des courbes de réponse en fréquence a été effectuée par ajustement à l'aide du logiciel LMS en utilisant la méthode PolyMAX [10, 11]. Ce logiciel comporte de nombreux algorithmes combinant divers systèmes à un seul degré de liberté pour identifier au mieux les paramètres modaux de la structure.

Dans le but d'illustrer l'influence de l'épaisseur de l'âme de balsa sur le comportement vibratoire du matériau sandwich, Les figures 6a et 6b montrent, respectivement, l'évolution de la fréquence et de l'amortissement en fonction de l'épaisseur de l'âme pour les deux premiers modes de flexion. La figure 6a indique que les fréquences des deux premiers modes propres de flexion augmentent d'une manière quasi-linéaire en fonction de l'épaisseur de l'âme. Ceci s'explique par le fait que les fréquences propres sont fonction de la rigidité de flexion des poutres. Cette augmentation est plus prononcée dans le cas du deuxième mode de flexion.

La figure 6b montre que l'amortissement augmente en fonction de l'épaisseur de l'âme avec un léger plateau entre 25 et 38 mm. Pour le premier mode de flexion, le facteur de perte du sandwich le plus épais ( $h_a=38$  mm) augmente de 25% par rapport au sandwich le plus mince ( $h_a=9.5$  mm). En revanche, la variation du facteur de perte est d'environ 31% pour le deuxième mode. Cette différence entre les deux premiers modes peut être liée à plusieurs paramètres tels que la distribution de l'énergie de déformation entre les peaux et l'âme, la variation de la rigidité de cisaillement du sandwich en fonction de l'épaisseur de l'âme et la variation de l'amortissement dans les peaux et dans l'âme en fonction de la fréquence [7].

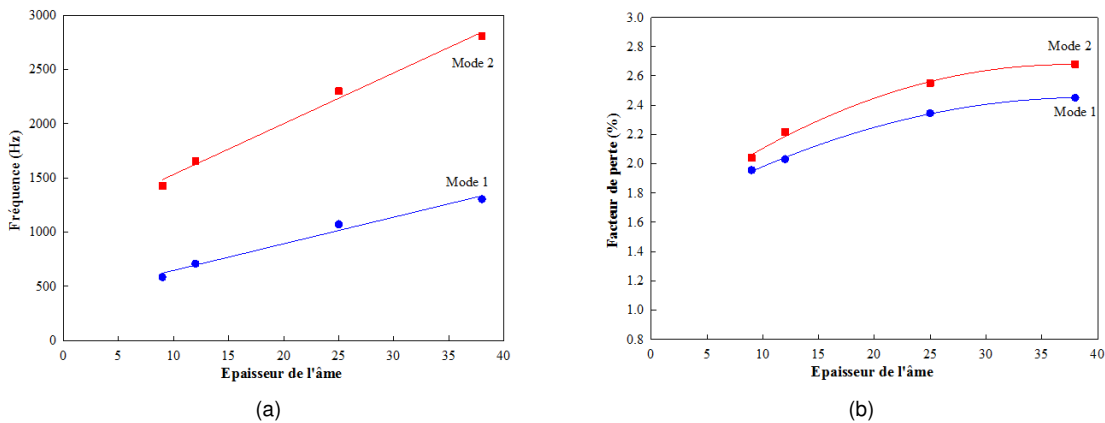


Figure 6: (a) Fréquences des deux premiers modes propres de flexion en fonction de l'épaisseur de l'âme, b) Facteurs de perte en fonction de l'épaisseur de l'âme.

## 4 Conclusion

Dans cet article, nous avons évalué les propriétés mécaniques et dynamiques d'un éco-matériau sandwich constitué d'une âme en balsa de différentes épaisseurs et de peaux en stratifiés de type  $[0/90]_S$  composés de fibres de lin UD renforçant une matrice en résine verte (Green Epoxy). En particulier, nous avons pu déterminer les rigidités de flexion et de cisaillement par unité de largeur des matériaux élaborés ainsi que leurs taux d'amortissement en fonction de la fréquence propre. L'analyse comparative avec un autre matériau sandwich constitué d'une âme en mousse de PVC et de peaux en stratifiés époxy/fibres de verre UD a révélé que le sandwich balsa/lin pourrait constituer une bonne alternative à ces matériaux classiques.



## Références

- [1] Chalmers DW. The potential for the use of composite materials in marine structures. *Marine Structures* 1994; **7**:441–445.
- [2] Srinivasa CV, Goutham AA, Santhosh T, Jaeethendra HJ, Ravikumar RB, Anil SG, Kumar DGS, Ashish J. Static bending and impact behaviour of areca fibers composites. *Materials and design* 2011; **32**:2469–2475.
- [3] Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science* 2012; **37**(11):1552–1596.
- [4] Dittenber DB, GangaRao HVS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A* 2012; **43**:1419–1429.
- [5] Barkoula NM, Garkhaila SK, Peijs T. Biodegradable composites based on flax/polyhydroxybutyrate and its copolymer with hydroxyvalerate. *Industrial Crops and Products* 2010; **31**:34–42.
- [6] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* 1999; **24**:221–274.
- [7] Assarar M. Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs. PhD Thesis, Thèse Spécialité Mécanique Université du Maine 2007.
- [8] Farooq MK. Comportement mécanique des composites sandwichs en statique et fatigue cyclique. PhD Thesis, Thèse Spécialité Mécanique Université du Maine 2003.
- [9] Allen HG. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. Pergamon, Oxford, UK, 1969.
- [10] Peeters B, Guillaume P, Auwaerer HVD, Cauberghe B, Verboven P, Leuridan J. Automotive and aerospace applications of the LMS PolyMAX modal parameter estimation method. *Proceedings of IMAC 22, Dearborn, USA, January 2004*.
- [11] Peeters B, Auwaeraera HVD, Guillaume P, Leuridana J. The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation ? *Shock and Vibration* 2004; **11**:395–409.