

# Effets de l'endommagement sur le comportement vibratoire des matériaux sandwichs endommagés

A. El Mahi, M. Idriss, M. Assarar, R. El Guerjouma & O. Dazel

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine LAUM UMR CNRS 6613  
Avenue Olivier Messiaen F - 72085 LE MANS

## Résumé :

*L'objet de ce présent travail est d'analyser les effets de l'endommagement sur le comportement vibratoire des matériaux sandwichs. Le matériau étudié est constitué de fibres de verre et de résine époxyde pour les peaux et une âme en mousse PVC. L'endommagement dans la poutre sandwich est caractérisé par la progression d'une fissure à l'interface entre la peau et l'âme. L'analyse a été effectuée expérimentalement, numériquement par la méthode des éléments finis pour plusieurs longueurs de fissure et ont été menées dans le cas de flexion de poutres en configuration encastrée-libre. Elle permet de déduire les fréquences propres de la poutre en fonction du taux d'endommagement. Les résultats obtenus par éléments finis et ceux expérimentaux sont en bon accord. Ils mettent en évidence la diminution de la fréquence lorsque la longueur de la fissure augmente et permettent ainsi de proposer des indicateurs d'endommagement fiables et sensibles*

## Abstract :

*The aim of the present study is to investigate the effects of damage on the vibration behaviour of sandwich materials. Sandwich material used in this study is constructed with glass fibre laminates as skins and with PVC closed-cell foams as core. The damage in sandwich beam is characterised by the interfacial debonding progression between the skin and core. The analysis was carried out experimentally and numerically by the finite element method for several crack lengths in clamped-free beam subjected to flexural vibrations. Experimental investigation of damaged sandwich materials is implemented using beam test specimens and impulse technique. A good agreement is found between experimental and numerical results. They show a decrease in the natural frequencies when the crack length increases. These properties offer the sensitive indicators of sandwich materials damage during lifetime.*

**Mots clefs :** matériau sandwich; endommagement; vibration

## 1 Introduction

Les matériaux composites sandwichs résultent, généralement de l'association de deux semelles ou peaux, de faibles épaisseurs, constituées de matériaux de haute résistance et haut module, d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible masse volumique. Ces structures complexes offrent de grandes potentialités aux concepteurs dans des domaines divers. Nous pouvons songer à des applications structurales classiques pour lesquelles il faut allier légèreté et rigidité, comme l'industrie aérospatiale, ou généralement le transport. Leur résistance à la corrosion, quand les divers constituants ne sont pas métalliques, a fait des matériaux sandwichs, un matériau de choix pour la construction navale. Ces matériaux sont employés comme structures primaires dans le cas des petites et moyennes unités. L'usage des sandwichs se répand aussi dans l'industrie du bâtiment et cette fois, ce sont leurs excellentes caractéristiques d'isolation thermique et acoustique qui sont considérées.

La connaissance des propriétés de ces matériaux est indispensable à la conception, le dimensionnement et l'optimisation des systèmes mécaniques. De plus, ces propriétés offrent des indicateurs potentiels sur l'état du matériau en particulier son endommagement pendant toute sa durée de vie. C'est ainsi dans le contrôle de l'état de santé d'une structure, la surveillance vibratoire est utilisée. Cette technique utilise les paramètres modaux (fréquences ou modes propres) pour détecter l'endommagement. Cet endommagement dépend de la contrainte appliquée et de la géométrie de la poutre. Dans le cas où les éprouvettes sandwichs sont sollicitées en flexion, l'endommagement se manifeste par la décohésion entre la peau et l'âme, délaminage des peaux et

fissuration par cisaillement de l'âme.

Des travaux de recherche ont été effectués pour analyser le comportement vibratoire des matériaux composites stratifiés et sandwichs. Vladimir et al. [1] ont étudié le comportement vibratoire d'une poutre en matériau sandwich avec une âme endommagée (fissure transversale). La poutre en matériau sandwich est divisée en trois régions deux intactes et une endommagée. Ils ont constaté que l'endommagement de la poutre entraîne un décalage des fréquences propres vers les basses fréquences. Tracy et Pardoën [2] ont analysé les effets d'un seul délaminage sur les modes propres des poutres en matériau composite. Ils ont utilisé une approche basée sur la théorie des stratifiés, où une poutre contenant le délaminage est divisée en quatre régions. Z. Li, Malcolm et J. Crocker [3] ont analysé les effets du délaminage sur le facteur d'amortissement des poutres en matériau sandwich avec une âme en nid d'abeilles. Le délaminage a introduit davantage de frictions dans les poutres composites et entraîne une augmentation de l'amortissement. S. H. D. Valdes et C. Soutis [4] ont étudié les décalages de la fréquence propre des poutres en matériaux composites avec un délaminage. Ils ont ensuite utilisé des vibrations à hautes fréquences pour identifier le délaminage dans les poutres en matériaux composites. Cette approche a été utilisée par plusieurs chercheurs comme Saravanos and Hopkins [5] pour analyser l'effet du délaminage sur la réponse vibratoire des stratifiés. H.-Y. Kim et W. Hwang [6] ont étudié théoriquement et expérimentalement, l'effet de la décohésion entre la peau et l'âme sur la rigidité et sur la fréquence propre de la poutre en matériau sandwich. La poutre en flexion est divisée en trois régions, deux régions saines et une région fissurée. L'équation du mouvement est établie pour chaque région de la poutre. Ils ont conclu que la décohésion entre la peau et l'âme réduit la rigidité de la poutre et diminue la fréquence propre en flexion.

Dans ce travail nous proposons une analyse expérimentale et une modélisation par éléments finis de l'effet de la propagation d'une fissure entre la peau et l'âme sur les fréquences propres et les réponses en fréquences d'un matériau sandwich.

## 2. Matériaux et dispositif expérimental

Le matériau étudié dans ce travail est constitué de mousse en PVC de  $60 \text{ kg.m}^{-3}$  de masse volumique et de 15 mm d'épaisseur pour l'âme et de stratifiés à fibres en sergé de 2 mm d'épaisseur pour les peaux. La mise en œuvre des sandwichs est réalisée par moulage sous vide, par la technique dite du "sac". Les différentes couches sont stratifiées et imprégnées à température ambiante, puis moulées sous vide entre le moule et le contre moule après interposition de divers tissus de moulage. Des éprouvettes sandwichs sont ensuite découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté aux dimensions souhaitées.

L'analyse modale expérimentale des vibrations avec excitation par impact présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre. La figure 1 montre le dispositif expérimental utilisé pour étudier les vibrations des poutres en configuration encastree libre. La structure est excitée en un point à l'aide d'un marteau d'impact et la réponse est détectée en un autre point de la structure à l'aide d'un vibromètre laser. Les signaux d'excitation de la poutre et de sortie du vibromètre laser sont ensuite numérisés et traités par un analyseur dynamique de signaux.

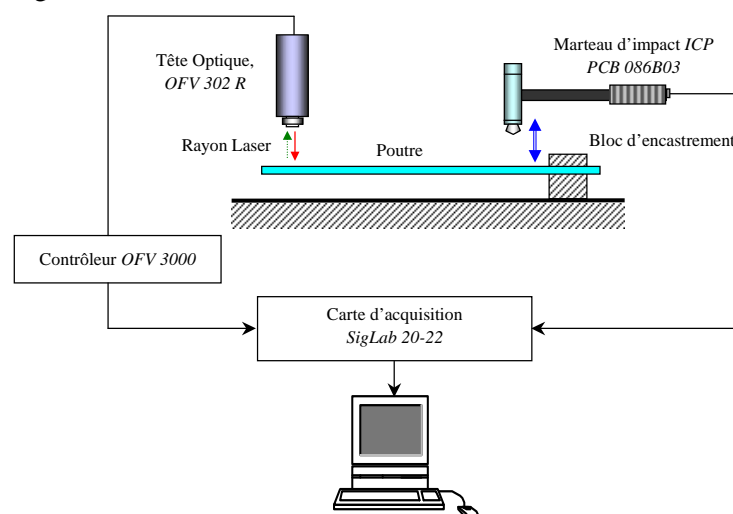


FIG 1.. Dispositif expérimental dans le cas d'une excitation par impact

L'analyse expérimentale est effectuée dans le cas de la flexion de poutres. Les poutres sandwichs sont graduées afin de repérer la coordonnée de l'impact et celle du point de mesure. L'origine du repère correspond à la limite de l'encastrement. Toutes les distances mesurées sont données à partir de ce repère. Les poutres sont excitées en un point d'abscisse  $x_1$  et la réponse est relevée en un point d'abscisse  $x$ . Ces points doivent être choisis de telle sorte que ni le point de mesure, ni le point d'impact ne soient sur un nœud de vibration. Générer l'impact en une position proche d'un encastrement présente l'avantage d'être certain qu'une gamme importante de modes soit excitée sans risquer de se situer sur un nœud de vibration, et ceci avec une grande qualité de signal d'impact. Nous avons effectué des relevés de mesures en différents points afin d'être certains de ne pas oublier des fréquences propres. La figure 2. donne un exemple de la transformée de Fourier de la réponse à une excitation impulsionnelle. Cette réponse fait apparaître les pics correspondant aux fréquences propres de vibration.

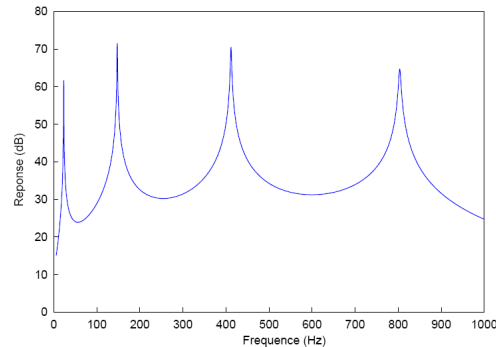


FIG 2. Exemple de fonction de réponse en fréquence d'une poutre, encastree libre, excitée par impact

L'étude expérimentale est faite sur plusieurs poutres en matériaux sandwichs, dans la partie encastree la mousse a été remplacée par un bloc d'acier pour ne pas écraser la mousse lors du serrage de l'éprouvette. L'étude expérimentale a été menée en flexion sur des éprouvettes endommagées par fissuration. La fissure est initiée entre l'âme et la peau, à l'aide d'un fil de fer aplati, sa progression se fait tous les 2 mm (figure 3).

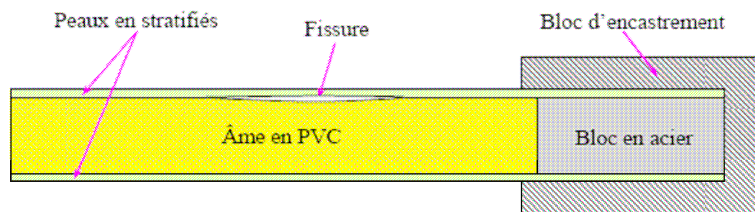


FIG 3. Schéma d'un bloc d'encastrement d'une poutre sandwich

Dans le cas de l'analyse par éléments finis, les poutres sandwichs ont été modélisées en éléments membranes à quatre nœuds. Les propriétés mécaniques des constituants du sandwich (peaux et âme) sont données dans les tableaux 1 et 2.

$E_L$ (GPa)	$E_T$ (GPa)	$\nu_{LT}$	$G_{LT}$ (GPa)
16	15,9	0,25	2,10

Tableau 1. Modules d'élasticité des peaux en sergé

Module d'Young $E$ (MPa)	Coefficient de Poisson	Module de cisaillement $G$ (MPa)
59	0.42	22

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques de l'âme en mousse PVC

### 3. Analyse des résultats

La figure 4 représente les courbes de réponse en fréquence des cinq premiers modes dans une éprouvette sandwich avec une fissure de différentes longueurs (0, 10, 20 et 30 mm). Ces courbes font apparaître des pics qui correspondent à la résonance de la poutre sandwich. Ces pics de résonance sont décalés vers les valeurs inférieures lorsque la longueur de fissure augmente. Ce décalage est plus important pour des valeurs de fréquences élevées. En effet en basse fréquence ( mode 1 et 2) la diminution de la fréquence de résonance est due à l'augmentation de la longueur de fissure entraînant ainsi la diminution de la rigidité en flexion de la poutre sandwich. Pour les fréquences élevées, la diminution de la fréquence est due à la fois à la diminution de la rigidité en flexion et à la position de la fissure sur la déformée modale de la poutre sandwich.

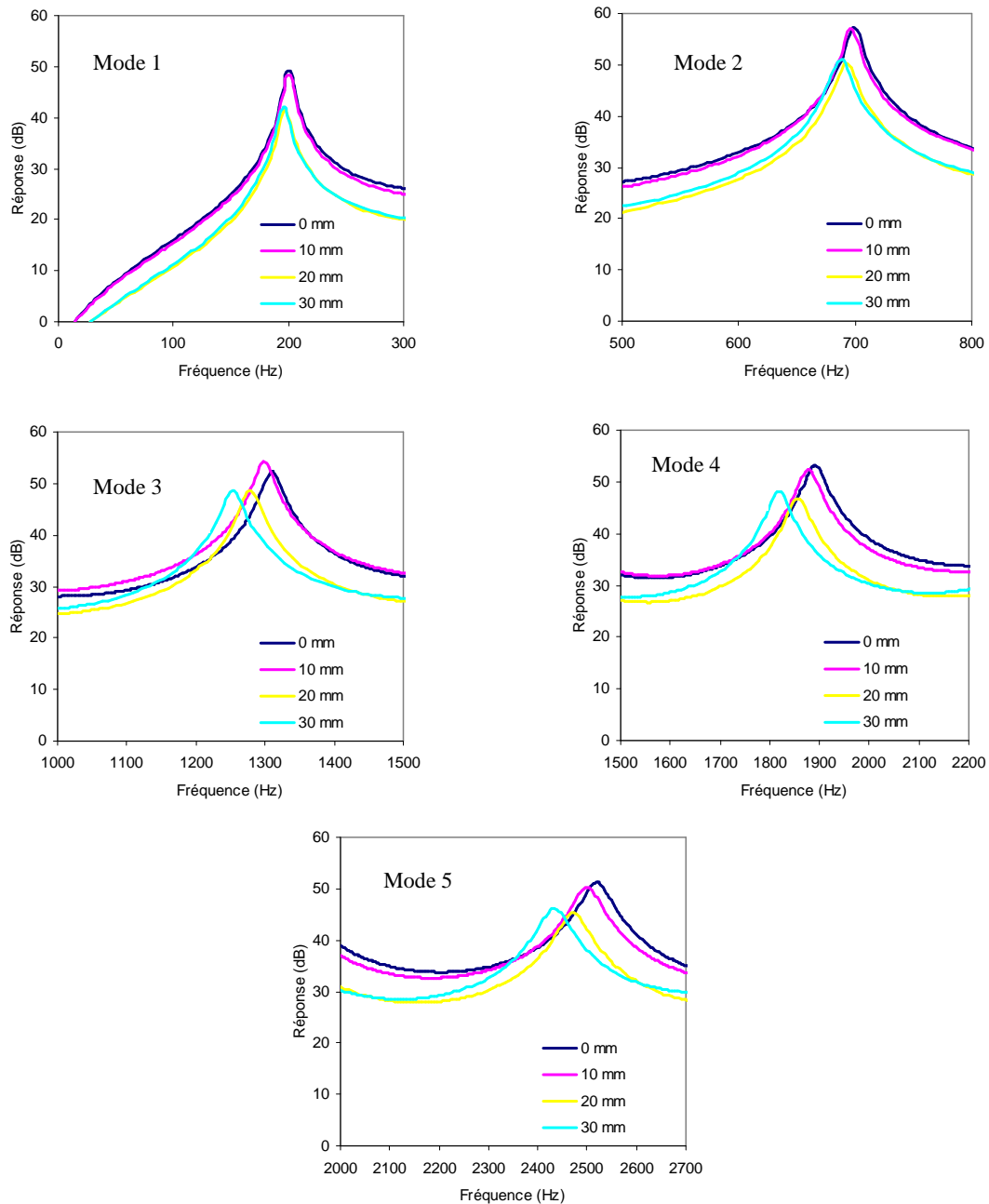


FIG 4. Courbes de réponse en fréquence pour différentes longueurs de fissure

Pour mettre en évidence l'influence de l'endommagement sur les valeurs des fréquences propres, nous avons reporté sur la figure 5, l'évolution de la fréquence propre en fonction de la longueur de fissure. Les résultats obtenus expérimentalement sont comparés à ceux obtenus par l'analyse par éléments finis. La valeur de la fréquence est normalisée par celle obtenue dans une poutre sandwich non endommagée et la

longueur de la fissure est rapportée à la longueur totale de l'éprouvette. L'analyse de ces résultats montre que la fréquence diminue lorsque la longueur de fissure augmente. Les résultats obtenus par éléments finis et ceux expérimentaux sont en bon accord, néanmoins il apparaît un léger décalage à partir du mode 4. Ce décalage s'explique par le fait que les propriétés mécaniques du matériau sandwich (âme et peaux) varient en fonction de la fréquence [7]. En effet la modélisation par éléments finis n'a pas tenue compte de cette variation.

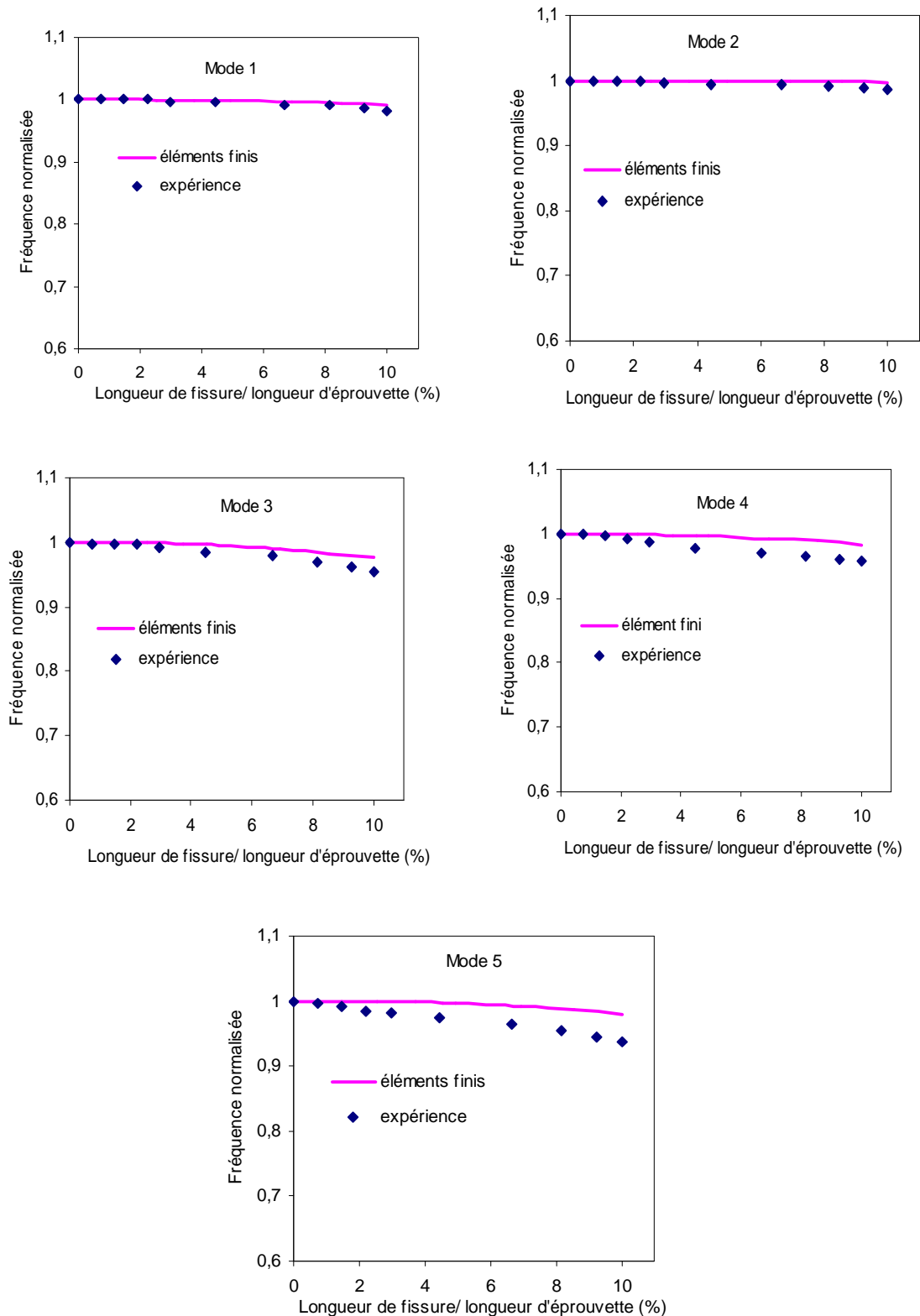


FIG 5. Courbes d'évolution de la fréquence normalisée en fonction du taux de fissure des 5 premiers modes

## 4. Conclusions

Les matériaux sandwichs sont employés dans des structures classiques pour lesquelles il faut allier légèreté et rigidité, comme pour l'industrie aéronautique, la construction navale ou généralement le transport. La connaissance des propriétés dynamiques de ces matériaux est indispensable puisqu'ils offrent des indicateurs potentiels sur l'état du matériau en particulier son endommagement pendant toute sa durée de vie. C'est ainsi la surveillance vibratoire est utilisée dans le contrôle de l'état de santé d'une structure. Cette technique utilise les paramètres modaux (fréquences ou modes propres) pour détecter l'endommagement.

Les fréquences et les courbes des fonctions réponses en fréquence des poutres sandwichs constituées de fibres de verre et de résine époxyde pour les peaux et une âme en mousse PVC avec une fissure entre la peau et l'âme sont étudiées dans ce travail. Une étude expérimentale et une analyse par éléments finis sont menées sur des éprouvettes sandwichs dans le cas de la flexion de poutre en configuration encastree-libre pour différentes longueurs de fissure. Les courbes des fonctions réponses en fréquences font apparaître des pics qui correspondent à la résonance de la poutre sandwich. Ces pics de résonance sont décalés vers les valeurs inférieures lorsque la longueur de fissure augmente. Ce décalage est due à la diminution de la rigidité en flexion de la poutre sandwich et il est beaucoup plus important lorsque la fréquence de résonance augmente. Les résultats obtenus par élément finis et ceux expérimentaux sont en bon accord, néanmoins il apparaît un léger décalage pour des valeurs de fréquences élevées. Ce décalage s'explique par le fait que les propriétés mécaniques du matériau sandwich (peaux et âme) varient en fonction de la fréquence. Cette variation n'est pas tenue compte pour la modélisation par éléments finis. Ainsi ces paramètres modaux peuvent être proposés en tant qu'indicateurs d'endommagement fiables et sensibles pour le suivi de l'état de santé des matériaux sandwichs.

## Références

- [1] S. Vladimir, F. Hubertus et Von Bremen. " Higher-order free vibrations of sandwichs beams with a locally damaged core " *International journal of solids and structures*, (2004) 41 6529-47
- [2] J. J. Tracy et G. C. Pardoen. " Effect of delamination on the natural frequencies of composite laminates" *Journal of composite materials*, (1989) 23 1200-15
- [3] Z. Li; Malcolm et J. Crocker. " Modal vibration response measurement in characterisation of composite materials and structures" *Composites sciences and technology*, 60 (200) 2769-77
- [4] S. H. Valdes et. C. Soutis " Delamination detection in composite laminates from variations of their modal characteristics " *Journal of sound and vibration*, (1999) 228 (1),1-9
- [5] D A Saravanos and D A Hopkins " Effects of delamination on the damped dynamic characteristics of composite laminates analysis and experiments" *Journal of Sound and Vibration* (1996) 977-93.
- [6] H.-Y. Kim et W. Hwang. " Effect of debonding on natural frequencies and frequency responses functions of honey sandwich beams", *Composite structures* (2002), 55, 51-62
- [7] M. Assarar. " Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs", *Thèse de doctorat*, 2007 Université du Maine, Le Mans