



HAL
open science

Analyse vibratoire de composites stratifiés endommagés = Vibration analysis of damage in composites laminates

Mounir Kharoubi, Abderrahim El Mahi, Mustapha Assarar, Louendi Fatmi,
Rachid El Guerjouma

► **To cite this version:**

Mounir Kharoubi, Abderrahim El Mahi, Mustapha Assarar, Louendi Fatmi, Rachid El Guerjouma. Analyse vibratoire de composites stratifiés endommagés = Vibration analysis of damage in composites laminates. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 7 p. hal-00385231

HAL Id: hal-00385231

<https://hal.science/hal-00385231>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Analyse vibratoire de composites stratifiés endommagés

Vibration analysis of damage in composites laminates

M. Kharoubi^{1,2}, A. El Mahi¹, M. Assarar¹, L. Fatmi² et R. EL Guerjouma¹

1 : Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine.
Université Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Mans CEDEX 9
e-mail : mounirkharoubi@yahoo.fr, abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr;

2 : Laboratoire de Mécanique et Structures ...
Université du 08 Mai 45, BP 401, 24000, Guelma, Algérie
e-mail : f_louendi@yahoo.fr

Résumé

Le présent travail a pour objet de mettre en évidence les potentialités des méthodes d'évaluation non destructive (END) par vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des matériaux composites stratifiés. Les propriétés mécaniques des stratifiés ont été déterminées par des essais de traction effectués sur différentes éprouvettes selon la norme ASTM. Des cycles de charge et décharge en traction avec plusieurs niveaux de chargements sont appliqués à différentes éprouvettes constituées de fibres verre et de résine époxyde du type [(0/90)₂]_s. Pour chaque niveau de chargement, l'analyse vibratoire a été effectuée dans le cas de la flexion des poutres, les poutres étant encastrées à une extrémité et libre à l'autre. Les courbes expérimentales font apparaître des pics correspondant aux fréquences de résonances de la poutre. Nous constatons que lorsque le niveau de chargement augmente, les pics de résonances se décalent vers les basses fréquences. Ce décalage est plus important lorsque la fréquence de résonance augmente. Cette étude montre la possibilité d'utiliser les vibrations comme une méthode de contrôle de santé des matériaux en service.

Abstract

This work has the aim of highlighting the potentialities of the methods non-destructive evaluation (NDE) by linear vibrations for the characterization and the follow-up of the damage of composites materials laminates. The mechanical properties of the laminates were determined by tensile tests carried out on various specimens according to standard ASTM. Cycles of load and unload in tension with several levels of loadings are applied to various specimens made up of fibres glass and epoxy resin of the type [(0/90)₂]_s. For each level of loading, the vibratory analysis was carried out in the case of the inflection of beams, the beams being clamped at one end and free with the other. The experimental curves reveal peaks which correspond to the frequencies of resonances of the beam. We observe that when the level of loading increases, the peaks of resonances shift towards the low frequencies. This shift is more significant when the frequency of resonance increases. This study shows the possibility of using the vibrations like a control method of health of materials in service.

1. Introduction

Face à l'utilisation accrue des matériaux composites, il est indispensable de définir des indicateurs sensibles à la présence de l'endommagement afin de prévenir leurs ruines. Par ce travail, nous présentons une méthode d'évaluation par vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement de composites stratifiés. Différents travaux ont été réalisés dans le domaine : M. Assara [1] a étudié expérimentalement la réponse en fréquence à une impulsion de matériaux stratifiés et sandwichs à l'aide d'un vibromètre laser. Il a traité la mesure de l'amortissement des matériaux considérés et l'identification propriétés élastiques aux pics de résonance en utilisant une procédure itérative et en comparant les résultats expérimentaux à ceux obtenus par éléments finis. A. El Mahi [2] a fait une analyse de l'amortissement des composites à fibres unidirectionnelles, orthotropique et stratifiés. Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par éléments finis, ils donnent une bonne concordance. L'auteur montre que l'analyse par éléments finis présentée peut être appliquée à des structures de formes complexes. H.Y. Kim [3] a présenté une méthode d'identification en vibration des dommages de stratifiés composites et sandwich. L'approche considérée mis en évidence le délaminage des sandwichs et l'endommagement des stratifiés, ces deux phénomènes peuvent être facilement identifiés en termes de changements des

fréquences propres et de l'amortissement. C. White [4] a conduit une recherche expérimentale en utilisant des techniques de réponses en fréquences pour la détection des dommages dans un composite réparé avec et sans des défauts dans deux types d'états de conditions aux limites : encastré-encastré et libre-libre. Des capteurs piézoélectriques ont été employés pour enclencher et mesurer la réponse en fréquence des éprouvettes étudiées. Il a constaté que des dommages sont détectés par des changements de réponse en fréquence pour les deux types de réparation. S.H. Valdes [5] a déterminé les fréquences modales en considérant la spectroscopie de résonance des ultrasons. Le changement des fréquences des modes des matériaux délaminés par rapport à celles des matériaux sains a donné une bonne indication de l'ampleur des dégâts. Ce travail est une démonstration de la détection des dommages de structure par la mesure des changements des caractéristiques de vibrations. D.A. Saravanos [6] a étudié l'amortissement des poutres et des stratifiés en vibration libre. Le délaminage est introduit comme une perturbation cinématique et traité comme degrés de liberté supplémentaires. La généralisation de la rigidité, de l'inertie et de l'amortissement des matrices du stratifié est formulée. Une solution analytique est développée pour la prédiction des fréquences, des modes et de l'amortissement. Les résultats numériques et expérimentaux varient en fonction de la taille du délaminage. A. Ouahabi [7] a traité les fissures de fatigue de respiration, la fissure de respiration s'ouvre et se ferme alternativement sous l'effet de l'effort dynamique, le comportement vibratoire est non linéaire et les fréquences naturelles varient constamment. La variation de la rigidité induit une variation des fréquences naturelles et du taux d'amortissement.

2. Matériau considéré

La mise en œuvre des stratifiés est réalisée par moulage sous vide, par la technique dite du « sac », les différentes couches de verre E unidirectionnels sont stratifiées et imprégnées de par une résine époxyde à température ambiante, puis moulée sous vide entre le moule et le contre-moule après interposition de divers tissus de moulage. Cet ensemble est mis dans une poche sous vide (dépression de 30KPa) pendant 10 heures à température ambiante puis placé dans une étuve à 80°C pendant 8 heures afin d'assurer la polymérisation. Des éprouvettes parallélépipédiques sont découpées à partir de plaques fabriquées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté.

3. Caractérisation mécanique

3.1 Essais Statiques

Les propriétés mécaniques des stratifiés ont été déterminées à partir des essais de traction effectués sur une machine d'essais de type Instron équipée d'une cellule de charge de 100 KN et pilotée par ordinateur. Trois éprouvettes ont été testées selon la norme ASTM figure 1.



Fig. 1. Montage d'essai de traction

Les courbes de comportement mécanique charge - déplacement obtenues sont reportées sur la figure 2. Le comportement mécanique des stratifiés est pratiquement linéaire jusqu'à la rupture. La valeur de la charge maximale moyenne déterminée à la rupture est de l'ordre de 17085N.

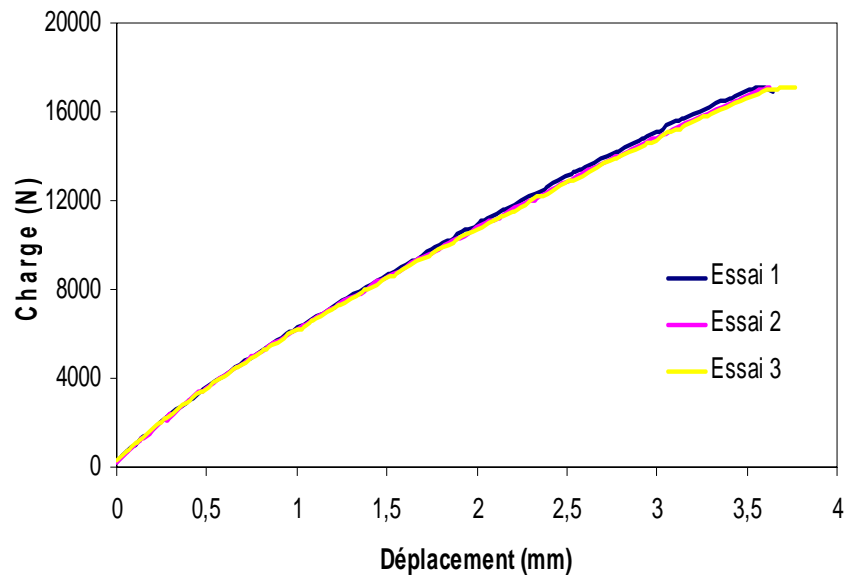


Fig. 2. Courbes de comportement mécanique charges-déplacement

3.2 Essais cycliques charge-décharge

Nous avons appliqué sur trois éprouvettes stratifiées quatre niveaux de chargement : 20%, 40%, 60% et 80% de la charge maximale suivi par un déchargement jusqu'à 0, après chaque cycle les trois éprouvettes sont testées en vibration linéaire, la figure 3 regroupe les quatre niveaux de chargement pour la même éprouvette.

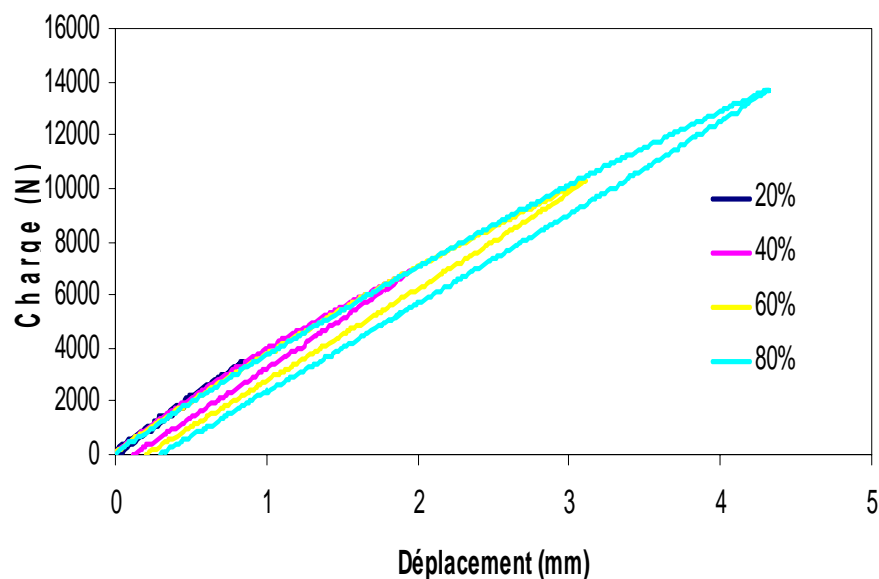


Fig. 3. Courbes de comportement mécanique charge décharge - déplacement

4. Analyse modale expérimentale

4.1 Dispositifs d'essais

L'analyse modale expérimentale des vibrations avec excitation par impact présente l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre. La figure 4 montre le dispositif expérimental utilisé pour l'étude de 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 Polytec. Ce vibromètre est constitué d'une tête optique OFV 302 R associés à un contrôleur OFV 3000. Les signaux d'excitations de la plaque et de sortie du vibromètre laser sont ensuite numérisés et traités par un analyseur dynamique de signaux développé par la société SigLab. Cet analyseur est constitué d'une carte

d'acquisition et de traitement, associée à un logiciel résidant de contrôle et de traitement des signaux. La carte d'acquisition est équipée d'un processeur, permettant l'acquisition simultanée de deux signaux avec une fréquence maximum d'échantillonnage de 50 kHz et une résolution de 13 bits sur chaque canal. Ce système effectue l'acquisition des signaux et le contrôle des conditions d'acquisition (sensibilité, bande passante, conditions de déclenchement, etc.). Il effectue également le traitement des signaux (transformée de Fourier, réponse en fréquence, etc.). Les signaux et les traitements associés peuvent être ensuite sauvegardés, pour des post-traitements.

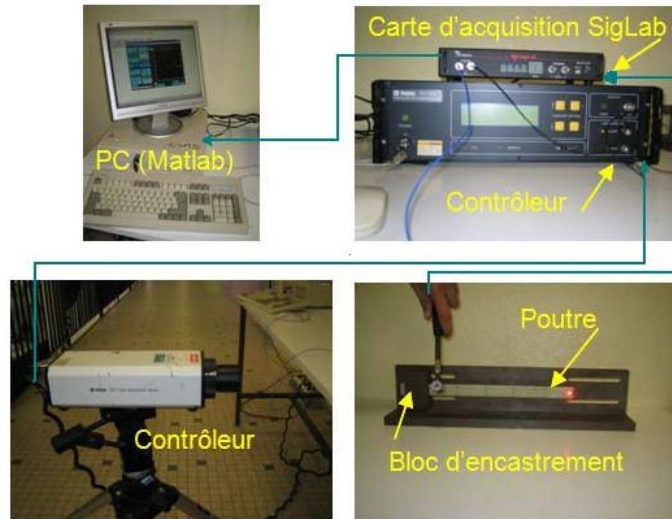


Fig. 4. Dispositif expérimental cas d'une excitation par impact

4.2 Méthodes d'analyse des résultats

L'analyse expérimentale a été effectuée dans le cas de la flexion de poutres stratifiées, les poutres étant encastées à une extrémité et libre à l'autre. Elles sont graduées afin de repérer la coordonnée de l'impact et celle du point de mesure figure 5. L'origine du repère correspond à la limite de l'encastrement. Toutes les distances ou mesures 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.

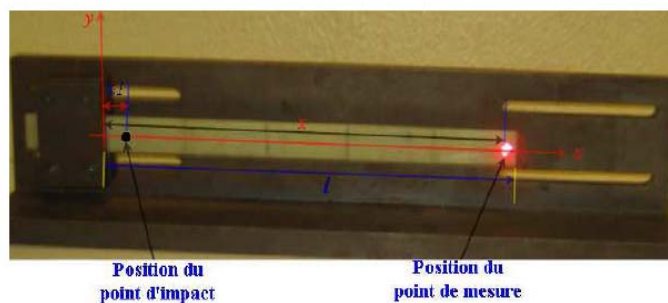


Fig. 5. Repérage des points d'impact et de mesure sur une poutre encastree - libre.

La figure 6 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.

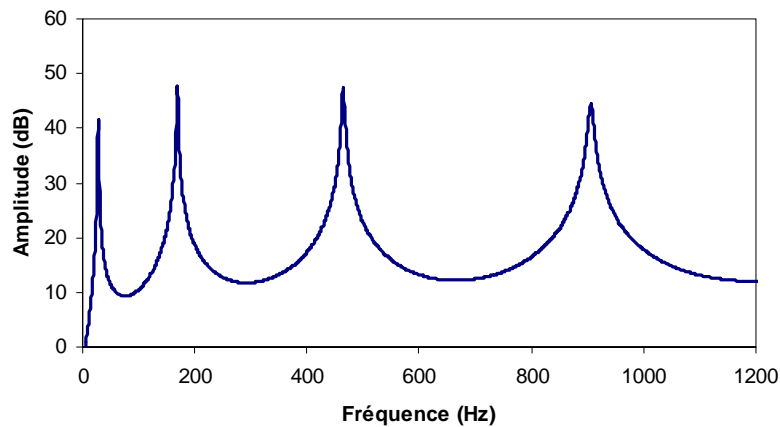


Fig. 6. Exemple de réponse en fréquence, encastrée - libre, excitée par impact

4.3 Analyse du comportement vibratoire

Les essais de vibration sont effectués en flexion sur des poutres en stratifiés de longueurs 200mm. Différents niveaux de chargement ont été étudiés : 20%, 40%, 60% et 80%. La figure 7 représente la réponse en vibration libre en fonction de la fréquence d'une poutre en composite stratifié saine et endommagée sollicitée à différents niveaux de chargement. Les courbes expérimentales font apparaître des pics correspondant aux fréquences de résonance de la poutre. Nous observons que lorsque le niveau de chargement augmente, les pics de résonance se décalent vers les basses fréquences cela est due à la perte de rigidité de la poutre. Le décalage fréquentiel est plus important pour les modes de rang plus élevés, lie à la perte de rigidité plus importante sur ces derniers.

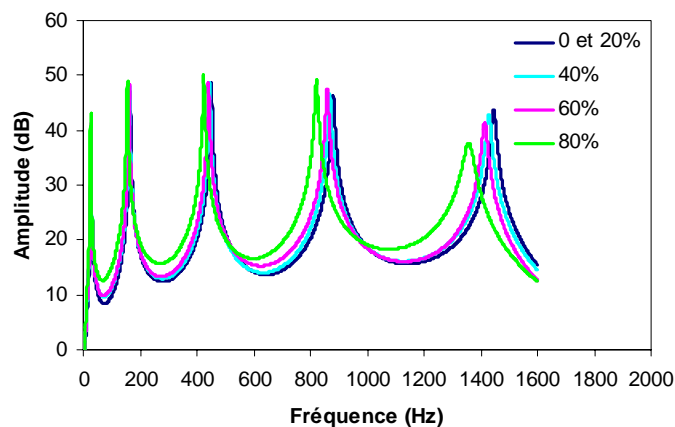


Fig. 7. Réponse en fréquence d'une poutre stratifiée pour différents niveaux de chargement

Pour mieux illustrer ce décalage, nous avons reporté à titre d'exemple sur la figure 8 la courbe de réponse en fréquence pour le troisième mode.

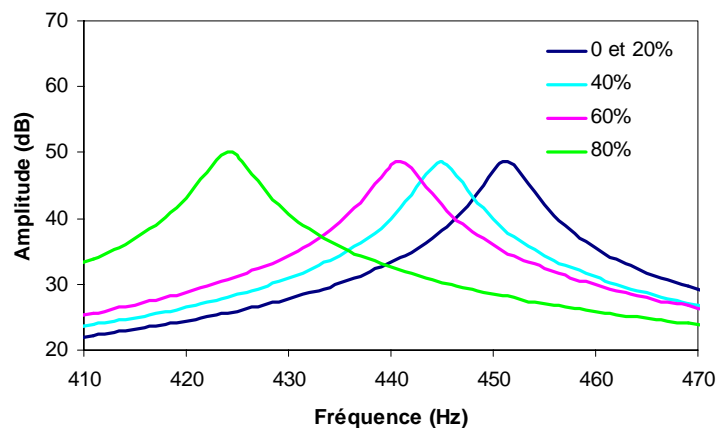


Fig. 8. Courbes de réponse en fréquence d'une poutre stratifiée au troisième mode

Le tableau 1 donne les fréquences propres déterminées pour différents niveaux de chargement. En mode 1 la fréquence de résonance est de 28 Hz dans l'éprouvette intacte, alors que pour une éprouvette sollicitée à 80% de la charge à la rupture elle n'est que de 26 Hz. Par contre en mode 3, la fréquence de résonance est de 451 Hz pour l'éprouvette saine et de 424 Hz pour l'éprouvette sollicitée à 80%. Il ressort de ce travail que les fréquences de résonances diminuent avec le niveau de chargement augmente, qui s'explique par la diminution de la rigidité en flexion de la poutre stratifiée..

Niveau de charge (%)	0%	20%	40%	60%	80%
Mode 1 (Hz)	28	28	27	27	26
Mode 2(Hz)	165	165	163	162	155
Mode 3 (Hz)	451	451	445	443	424
Mode 4 (Hz)	880	880	868	860	822
Mode 5 (Hz)	1445	1445	1430	1415	1360

Tab. 1. Variation des fréquences propres en fonction du niveau de chargement

Pour mettre en évidence l'influence de l'endommagement sur les valeurs des fréquences propres, nous avons reporté sur la figure 9 l'évolution des fréquences propres normalisées en fonction des niveaux de chargements. La valeur de la fréquence est normalisée par celle obtenue dans une poutre stratifiée non endommagée. L'analyse de ces résultats montre que la fréquence diminue lorsque le niveau de chargement augmente. Ce décalage s'explique par le fait que la rigidité en flexion du stratifié diminue lorsque le niveau de chargement augmente.

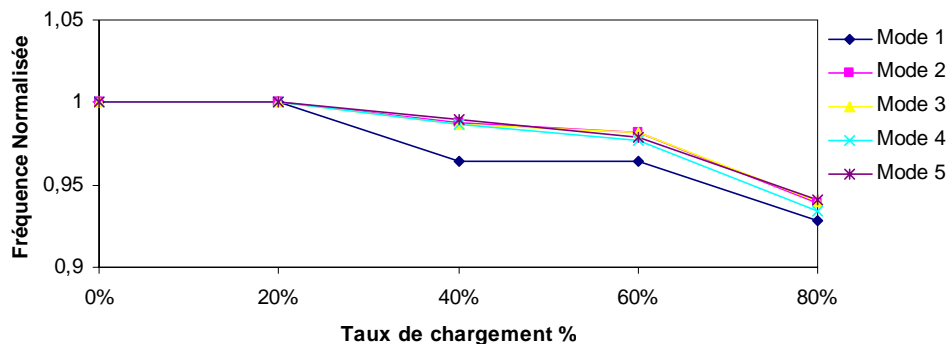


Fig.9. Evolution des fréquences propres en fonction des taux de chargement

Conclusions

Le présent travail nous a permis de mettre en évidence les potentialités des méthodes d'évaluation non destructive (END) en vibrations linéaires pour la caractérisation et le suivi de l'endommagement des matériaux composites stratifiés du type $[(0/90)_2]_s$. Les courbes expérimentales font apparaître des pics correspondants aux fréquences de résonances de la poutre. Nous observons que lorsque le niveau de chargement augmente, les pics de résonances se décalent vers les basses fréquences. Ce décalage est plus important lorsque la fréquence de résonance augmente. En effet, l'augmentation du niveau de chargement entraîne l'augmentation du taux d'endommagement dans le matériau qui fait diminuer la rigidité en flexion de la poutre et ainsi que ces fréquences de résonance. Cette étude montre la possibilité d'utiliser les vibrations comme un outil de contrôle de santé des matériaux en service.

Références

- [1] M. Assarar « Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs ».Thèse de doctorat, Université du Maine, 2008
- [2] A. El Mahi, M. Assara, Y. Sefrani, and J. M. Berthelot, « Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates » Composites Part B: Engineering, Volume 39, Issues 7-8, pp 1069-1076, 2008

- [3] H.-Y. Kim « Vibration-based damage identification using reconstructed FRFS in composite structures ». *Journal of Sound and Vibration* 259(5), 1131–1146, 2003.
- [4] C. White, H. C.H. Li a, B. Whittingham, I. Herszberg, A. P. Mouritz « Damage detection in repairs using frequency response techniques » *Composite Structures* 87 175–181, 2009
- [5] S.H. Valdes et C. Soutis, « Delamination detection in composite laminates from variation of their modal characteristics », *Journal of sound and vibration*, 228 (1) pp1-9, 1999.
- [6] D.A. Saravanos and D.A. Hopkins, « effects of Delamination on the damped dynamic characteristic of composite laminates analysis and experiments », *Journal of Physics, D: Applied Physics*, 6, pp 27-41, 1996.
- [7] A. Ouahabi , M.Thomas et A.A. Lakis .«Détection de fissures de respiration de fatigue par excitation harmonique et analyse temps-fréquence », *Proceeding of the 24 Seminar on Machinery Vibration*, Canadian Machinery Vibration Association, ISBN 2-921145-61-8, Montreal, Paper B8, pp 460- 472, 2006.