

CFA/VISHNO 2016

Vibration non linéaire des composites stratifiés sains et endommagés par délaminage

M. Hammami^a, A. El Mahi^b, C. Karra^c et M. Haddar^c

^aLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, 72058 Le Mans, France

^bUniversité de Maine, Laboratoire d'Acoustique de l'UM UMR CNRS 6613-Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans, France

^cLaboratoire Mécanique, Modélisation et Production, LA2MP- ENIS, Université de Sfax, Route de Soukra, 3038 Sfax, Tunisie
maroua.hammami.etu@univ-lemans.fr



LE MANS

L'objet de ce présent travail est d'évaluer le comportement non linéaire des matériaux composites sains et endommagés par délaminage contrôlé. Cette analyse expérimentale vise à suivre la variation des paramètres non linéaires en fonction de la longueur du délaminage. A travers un ensemble d'amplitudes de résonance croissantes, les décalages de la fréquence et de l'amortissement sont évalués en fonction des amplitudes de déformation. Deux paramètres non linéaires sont déterminés des six premières modes de vibration en flexion et pour différentes longueurs du délaminage. Le premier paramètre non linéaire élastique est associé au décalage de fréquence et le deuxième paramètre non linéaire dissipatif est associé au décalage de l'amortissement. L'évolution de ces paramètres en fonction du niveau d'excitation, nous a conduit à choisir le mode le plus sensible au délaminage des composites et de l'analyser en fonction du niveau d'endommagement.

1 Introduction

Les matériaux hétérogènes comme les roches et certains composites ont une non linéarité importante. Cette non linéarité augmente sensiblement en présence d'endommagement. En conséquence, la détection de microfissures ou de tout endommagement, par le suivi des paramètres non linéaires peut se révéler un moyen efficace pour l'évaluation et le contrôle de santé des composites. Les méthodes non linéaire semble être une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructifs des matériaux composites [1]

Les méthodes de détection de la fissuration basées sur la mesure de la réponse non linéaires sont très répondues surtout pour les matériaux métalliques fissurés [2-3], les matériaux granulaires, les bétons, les roches et les céramiques [4]. Les études utilisant les méthodes non linéaires dans les structures composites ne sont pas prononcées [5].

La méthode de résonance de vibration non linéaire consiste à induire l'échantillon autour de l'un de ses modes de résonance pour des niveaux d'excitation croissantes. Les réponses à ces excitations sont en suite mesurés par un accéléromètre ou un vibromètre laser. La non linéarité des matériaux hétérogènes ou endommagés est mesuré par la variation de fréquence de résonance et la variation du facteur de perte en fonction de l'amplitude d'excitation. Les paramètres élastiques et dissipatifs non linéaires sont déterminés à partir du décalage des fréquences et de l'amortissement [6]. Idriss [7] a étudié la variation des paramètres non linéaires élastique et dissipatif à partir du décalage de la fréquence et de l'amortissement en fonction de l'amplitude de déformation pour un matériau sandwich.

L'objectif de cette étude est d'appliqué la méthode de vibration non linéaire sur les composites stratifiées époxy/fibre de verre et de suivre les évolutions de la fréquence de résonance et de l'amortissement en fonction du niveau d'excitation pour des longueurs de délaminage croissantes. Nous nous attacherons par la suite à déterminer la variation des deux paramètres non linéaire élastique et dissipatif associé respectivement à la fréquence et à l'amortissement en fonction de la longueur de délaminage.

2 Procédure expérimentale

2.1 Mise en œuvre du matériau

Les matériaux composites étudiés dans ce travail sont des stratifiées à fibres de verre avec une séquence d'empilement de type $[0_2/90_2]_s$. Ils sont constitués de fibres unidirectionnelles de densité surfacique de 300 gm^{-3} et

d'une résine époxyde type SR1500 avec le durcisseur SD2505. La mise en œuvre des composites est réalisée par moulage sous vide. Les différentes couches sont stratifiées et imprégnées à température ambiante, puis moulées sous vide après interposition de divers tissus de moulage. Cet ensemble est mis dans une poche dans laquelle on fait un vide (dépression de 30 kPa) pendant 10 heures à température ambiante. Deux délaminages symétriques par le plan du stratifié sont mis en place entre les plis à 0° et à 90° au cours de la fabrication du composite (Fig. 1).

La découpe des plaques est réalisée ensuite avec une tronçonneuse à disque diamanté. Les éprouvettes obtenues ont pour longueur 250 mm, largeur égale à 20 mm et une épaisseur de 2,5 mm.



Figure 1 Eprouvette en composite avec deux délaminages

2.2 Résonance non linéaire

La configuration encastrée-libre est utilisée pour caractériser le comportement non linéaire des matériaux stratifiés sains et endommagés. Le dispositif expérimental pour mener les essais de vibration est donné dans la figure 2. Une excitation sinusoïdale de fréquence variable à différentes amplitudes est générée à l'aide d'un Analyseur de type Stanford Research Systems SR785. Le signal d'excitation est ensuite amplifié à gain constant par l'amplificateur de puissance Power Amplifier PA25E permettant d'exciter un pot vibrant BK4809. Sur ce pot vibrant est placé d'étrier afin d'encastrer une des extrémités de l'éprouvette de matériau sain et endommagé. A l'autre extrémité de l'éprouvette, les vibrations générées sont détectées à l'aide d'un accéléromètre BK 352c22 relié à un conditionneur. La sensibilité de l'accéléromètre est de 9,78 mV/g (g est l'accélération de gravitation) sur une bande de fréquence allant de 10 Hz à 10^4 Hz. Une carte GPIB permet de contrôler l'analyseur de réseaux et d'y introduire les instructions liées à la bande de fréquence, à l'amplitude, au nombre de courbes...etc., via une interface LABVIEW. Les données sont ainsi enregistrées et affichées en temps réel. La même expérience est ainsi répétée sur toute une gamme d'éprouvettes avec une fissure de longueur allant de 10 mm à 130 mm avec un pas de 10 mm. Toutes les éprouvettes sont excitées avec une amplitude allant de 30 mV à 300 mV, donc à 10 niveaux d'excitation. Cette procédure est répétée au moins trois fois pour chaque longueur de délaminage et pour les six premiers modes de flexion.

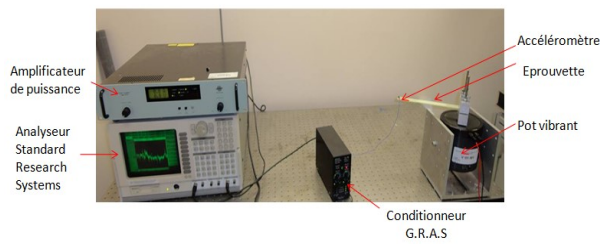


Figure 2 Dispositif expérimental

Le premier mode de flexion est difficile à exciter, seuls quatre niveaux ont été générés. L'analyse des courbes de réponse a été effectuée par interpolation polynomiale d'ordre au moins six. Ce qui permet d'obtenir les valeurs des fréquences de résonance f_i et l'amplitude à la résonance A_r et du facteur de perte η_i pour chaque niveau d'excitation, chaque mode et chaque taux d'endommagement. Le facteur de perte est déterminé par la méthode de la bande passante - 3dB par rapport à l'amplitude maximale du pic de résonance.

La figure 3 donne un exemple d'un spectre du signal de sortie d'une éprouvette en composite saine en configuration encastre-libre.

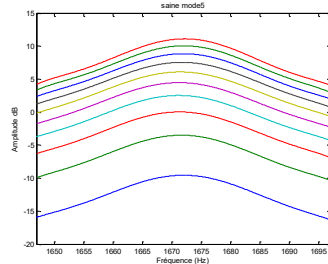
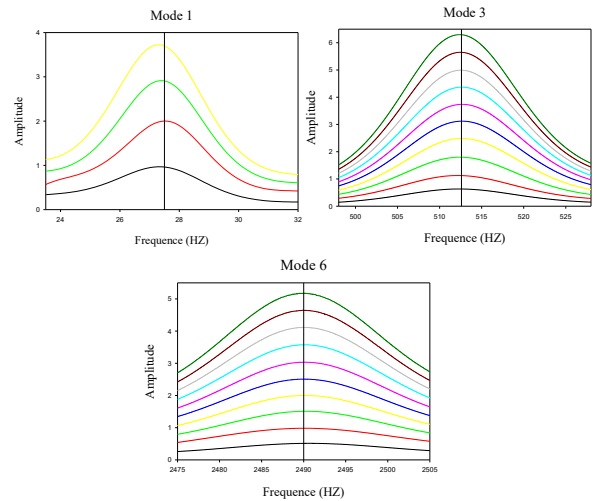
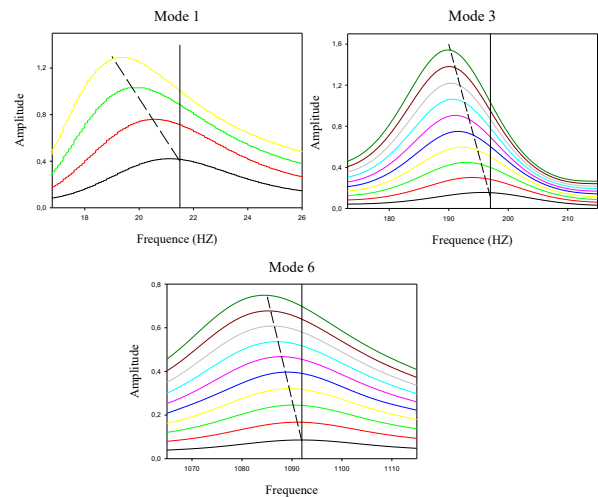


Figure 3: Courbes de résonance d'une éprouvette composite pour plusieurs niveaux d'excitation

3 Caractérisation du composite par résonance non linéaire

Dans les figures 4 et 5 sont reportées, à titre d'exemple, les courbes de résonance des premiers, troisièmes et sixièmes modes de vibration pour dix amplitudes d'excitation, dans le cas d'un stratifié sain (Fig. 4) et dans le cas d'un stratifié endommagé (Fig.5).

Pour les résultats de l'éprouvette vierge présentée à la figure 4, aucun décalage en fréquence n'est observé. Alors que sur la figure 5, nous constatons un décalage en fréquence très net, résultant de l'endommagement de l'éprouvette. Ce décalage vers les basses fréquences devient de plus en plus important lorsque le taux d'endommagement augmente. Le taux d'endommagement est défini comme le rapport de la longueur de la fissure rapportée à la longueur de la partie libre de l'éprouvette. Nous observons aussi que dans le cas du matériau sain et pour les différents modes de vibration une symétrie des courbes de résonances. Alors que lorsque le taux d'endommagement augmente, les courbes perdent leur symétrie. On note aussi que la bande passante de courbes de résonance s'élargissent avec l'augmentation du niveau d'excitation et du taux d'endommagement.

Figure 4 : Courbes de résonance du 1^{er}, 3^{ème} et 6^{ème} modes de vibration d'un stratifié sainFigure 5 : Courbes de résonance du 1^{er}, 3^{ème} et 6^{ème} modes de vibration d'un stratifié endommagé

4 Contexte théorique

La théorie d'élasticité linéaire est appliquée dans le cas des matériaux isotropes et exprimée par la loi de Hook qui est une relation linéaire de contrainte déformation. Pour les matériaux complexes ou endommagés cette loi ne peut pas décrire le comportement non linéaire de ces matériaux. En effet, la relation contrainte/déformation des matériaux complexes s'avère non linéaire [8]. Il existe deux types de non linéarité : la non linéarité classique et la non linéarité non classique (ou hystérétique). L'élasticité non linéaire classique et non classique a été utilisée par de nombreux auteurs [9-11] dans le cadre de l'étude de l'endommagement des matériaux complexe comme par exemples : le béton, les roches ou les composites. Par conséquent, différentes approches théoriques ont été proposées afin d'expliquer les observations expérimentales [12-13].

Il a été démontré que dans les matériaux endommagés, la non linéarité est si important qu'elle ne répond plus aux lois du non linéarité classique [3,12]. La non linéarité hystérétique est introduite pour interpréter ce type de comportement. Afin de prendre en compte de ces deux non

linéarités. L'expression de la loi de comportement non linéaire hystérétique est définie comme suite par [14].

$$\sigma = k_0 \left[1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \alpha (\Delta \varepsilon + \text{sign}(\dot{\varepsilon})) \right] \varepsilon. \quad (1)$$

Le terme de premier ordre de l'équation k_0 correspond au comportement élastique linéaire, alors que les termes au ordre supérieurs ($\beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2$) correspondent respectivement au comportement non linéaire classique quadratique et cubique. Le terme $\alpha (\Delta \varepsilon + \text{sign}(\dot{\varepsilon}))$ correspond au comportement élastique non linéaire hystérétique où ε est l'amplitude de déformation, $\dot{\varepsilon}$ est la vitesse de variation de déformation, $\text{sign}(\dot{\varepsilon})$ si la déformation augmente $\dot{\varepsilon} > 0$ et $\text{sign}(\dot{\varepsilon}) < 0$ si le cas contraire $\dot{\varepsilon} < 0$.

Le comportement non linéaire hystérésis du matériau composite stratifié endommagé peut être analysé par le suivi de l'amplitude à la résonance, de la fréquence de résonance et du facteur de perte. En effet, les matériaux endommagés montrent un décalage linéaire de la fréquence de résonance et un décalage linéaire du facteur de perte en fonction de l'amplitude. Le paramètre non linéaire élastique α_f et le donné par la relation suivante [15]:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = -\varepsilon \alpha_f. \quad (2)$$

Où f est la fréquence de résonance obtenue pour une amplitude de déformation ε , f_0 est la fréquence de résonance pour la plus basse amplitude.

Dans le cas d'un modèle non linéaire hystérétique, la variation du facteur de perte en fonction des amplitudes de déformation est linéaire. Le paramètre non linéaire dissipatif α_η est donné par l'équation suivante :

$$\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \varepsilon \alpha_\eta. \quad (3)$$

η est le facteur de perte obtenu pour une amplitude de déformation ε , η_0 est le facteur de perte pour la plus basse amplitude

En utilisant les équations de résonance non linéaires, les paramètres de non-linéarité élastique et hystérétique sont évalués à partir du décalage de la fréquence de résonance et de décalage du facteur de perte avec les amplitudes croissantes. Dans ce qui suit, le comportement non linéaire hystérésis du composite en fonction de longueur de délaminage croissant sera étudié. Puis, le mode de vibration le plus sensible à la présence de délaminage sera présenté.

5 Analyse des résultats

5.1 Décalages fréquentiel et d'amortissement non linéaire

Nous avons reporté dans la figure 6, à titre d'exemple, l'évolution du décalage de la fréquence de résonance $(f - f_0)/f_0$ en fonction de l'amplitude de vibration pour le première, le deuxième et le sixième mode de flexion. Les

amplitude de déformation sont obtenues en utilisant les fréquences et les accélérations et sont données par l'expression suivante en [11] :

$$\varepsilon = \frac{\ddot{x}}{4\pi L_f^2}. \quad (4)$$

Ces résultats sont obtenus pour des taux d'endommagement croissants. Les courbes montrent une variation linéaire de l'évolution du décalage de la fréquence en fonction de l'amplitude de déformation. Dans ce cas les points expérimentaux de ces figures peuvent être interpolés par des droites.

Globalement, pour une amplitude à la résonance donnée, la fréquence diminue lorsque le taux de délaminage augmente. Cette diminution est due à la dégradation de la rigidité du composite qui est la conséquence directe de la diminution de la surface de transfert des contraintes entre les plis de direction 0° et les plis de direction 90°

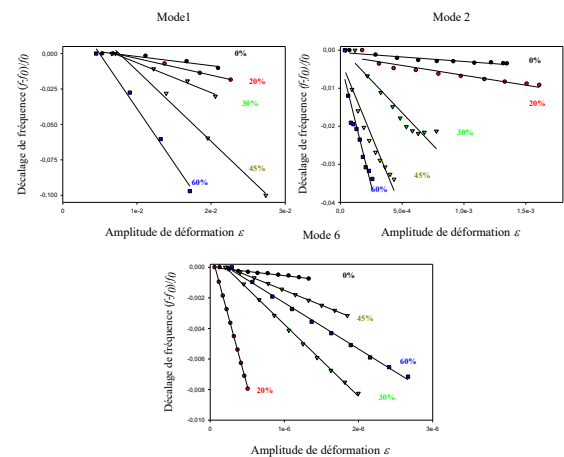


Figure 6 Décalage de la fréquence en fonction de l'amplitude de déformation pour différents taux de délaminage et pour trois modes de vibration

Les résultats des variations du décalage de l'amortissement $(\eta - \eta_0)/\eta_0$ pour le deuxième et le sixième mode de vibration en fonction de l'amplitude à la résonance pour les états sain et endommagés sont présentés dans les figures 7. Une dispersion de l'amortissement mesuré expérimentalement pour est observée. Cette dispersion est peut être attribuée au frottement entre le système de serrage et les échantillons. En plus, la détermination de l'amortissement en utilisant la méthode -3 db à basse fréquence demande un nombre d'échantillonnage très important pour obtenir une valeur précise du facteur d'amortissement.

Globalement, nous observons une variation linéaire du décalage de l'amortissement en fonction de l'amplitude à la résonance et peuvent être interpolés par des droites. L'augmentation linéaire du facteur de perte en fonction de l'amplitude à la résonance pour les différentes modes de vibrations, peuvent être expliqué par le fait qu'un matériau ayant un comportement hystérétique est excité, avec une amplitude A_1 , la courbe contrainte déformation décrit une boucle d'hystérésis avec un module K_1 et une dissipation d'énergie ΔE_1 (décrivant l'aire intérieure du cycle d'hystérésis). Si l'on excite une autre fois par une amplitude A_2 plus important que A_1 , le matériau décrit une seconde boucle d'hystérésis différente avec un module K_2 plus

faible et une énergie dissipée ΔE_2 plus élevée. L'augmentation de l'amortissement est due aussi à l'augmentation du taux de délaminage.

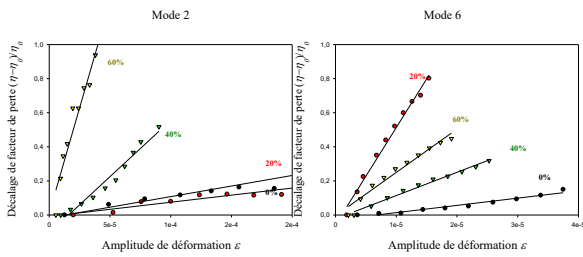


Figure 7 Décalage de l'amortissement en fonction de l'amplitude de déformation pour différents taux de délaminage et pour deux modes de vibration

5.2 Paramètres non linéaires élastique et dissipatif

La méthode de résonance permet de déterminer les paramètres non linéaires élastique et hystérique. Dans ce cadre, l'équation 2 donne le paramètre élastique α_f par le décalage de la fréquence de résonance et l'équation 3 conduit au paramètre non linéaire dissipatif α_η par le décalage de l'amortissement. Les paramètres non linéaires élastique et dissipatif α_f et α_η sont extraits pour chaque mode et pour les différentes longueurs de délaminage. Les variations des décalages de la fréquence de résonance et de l'amortissement en fonction de l'amplitude à la résonance obtenues précédemment semblent linéaires.

Ces résultats sont interpolés par des droites dont les pentes correspondent aux paramètres non linéaires élastique α_f et non linéaire dissipatif α_η . Les variations de ces paramètres non linéaires en fonction du taux d'endommagement sont reportées dans les figures 8 et 9.

Paramètre non linéaire élastique

La figure 8 représente l'évolution du paramètre non linéaire élastique α_f en fonction du taux d'endommagement pour trois modes (1, 2 et 6) de vibration. En mode 1, le paramètre non linéaire élastique reste pratiquement constant ou varie peu lorsque le taux d'endommagement augmente. En modes 2 nous observons une augmentation du paramètre non linéaire élastique avec l'augmentation du taux d'endommagement.

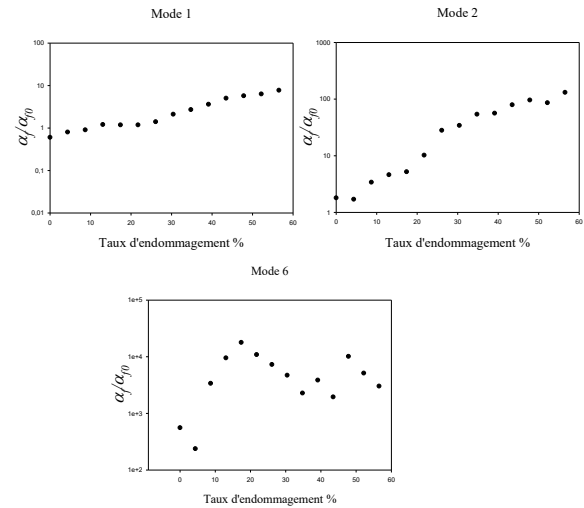


Figure 8. Évolution du paramètre non linéaire élastique en fonction du taux d'endommagement des composites

Paramètre non linéaire dissipatif

La figure 9 représente l'évolution du paramètre non linéaire dissipatif α_η en fonction du taux d'endommagement pour deux modes (2 et 6) de vibration. Ce paramètre augmente avec l'augmentation du taux d'endommagement en mode 2, alors qu'il est pratiquement constant en mode 6.

Seul le mode 2 donne des résultats cohérents. En effet on remarque une augmentation continue du paramètre non linéaire dissipatif lorsque le taux de d'endommagement augmente. Les autres modes présentent une dispersion importante des paramètres non linéaires élastique et dissipatif.

Nous remarquons sur ces matériaux composites endommagés par délaminage que les paramètres non linéaires liés au décalage fréquentiel α_f et à l'amortissement α_η évoluent d'une manière cohérente en mode 2 de flexion. Ainsi, on peut dire que le mode deux de vibration correspond au mode le plus sensible à la présence du délaminage dans les composites stratifiés.

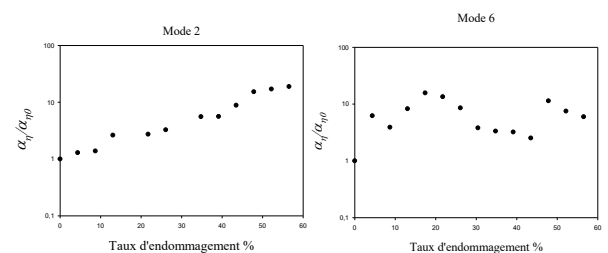


Figure 9 Évolution du paramètre non linéaire dissipatif en fonction du taux d'endommagement des composites pour deux modes de vibration

6 Conclusion

Dans ce travail nous nous sommes attachés à montrer que la méthode de vibration non-linéaire est très efficace pour la caractérisation du comportement des matériaux composites stratifiés en présence de délaminages. Les essais de vibration en flexion avec plusieurs niveaux d'excitations ont été effectués sur des éprouvettes en matériau composites en présence de délaminage de longueur variable en configuration encastree-libre. Les

décalages des fréquences de résonance et des facteurs de perte des six premiers modes de vibration en fonction du niveau d'excitation étant constatés pour des taux de fissuration croissants. Ces décalages sont clairement corrélés au taux de délaminage, autorisant une caractérisation quantitative du comportement en vibration des matériaux composites endommagés. En suite, deux paramètres non linéaires ont été déterminés, le premier est associé au décalage fréquentiel appelé paramètre non linéaire élastique et le deuxième associé au décalage de l'amortissement appelé paramètre non linéaire dissipatif. L'analyse de la variation de ces paramètres en fonction de l'amplitude à la résonance et du taux de fissuration, a permis de choisir le mode 2 de vibration parmi les six premiers comme mode approprié à l'obtention des paramètres sensibles à l'endommagement des matériaux composites.

Références

- [1] A. Klepka, M. Strączkiewicz, L. Pieczonka, W. J. Staszewski, L. Gelman, F. Aymerich, T. Uhl, Triple correlation for detection of damage-related nonlinearities in composite structures, *Nonlinear dynamics*, **81**, 453-468 (2015)
- [2] D. Dutta, H. Sohn, KA. Harries, P. Rizzo, A Nonlinear Acoustic Technique for Crack Detection in Metallic Structures. *Structural Health Monitoring* **3**, 251-62 (2009).
- [3] S. Hauptert, G. Renaud, J. Riviere, M. Talmant, PA. Johnson, P. Laugier, High-accuracy acoustic detection of nonclassical component of material nonlinearity. *Journal of the Acoustical Society of America*, **130**, 54-61 (2011).
- [4] KE. Van Den Abeele, A.°Sutin, J.°Carmeliet, PA.°Johnson, Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *ndt&e international*, **34**, 239-48 (2001).
- [5] F.°Aymerich, WJ.°Staszewski, Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique. *Structural Health Monitoring*, **9**, 541-553 (2010):
- [6] M.°Bentahar, RE.°Guerjouma, Monitoring progressive damage in polymer-based composite using nonlinear dynamics and acoustic emission. *Acoustical Society of America*, **125**, 39-44(2009).
- [7] M.°Idriss, A.°El Mahi, R.°El Guerjouma, Characterization of sandwich beams with debonding by linear and nonlinear vibration method. *Composite Structure*, **120**,200-207 (2015).
- [8] E. Landau, E. Lifshitz, "Theory of Elasticity", Pergamon Press, Headington Hill Hall (1974),
- [9] U. Polimeno, M. Meo, Detecting barely visible impact damage detection on aircraft composites structures, *Composie Structures*, **91**, 398-402 (2009).
- [10] K. Van Den Abeele, K. Van De Velde, J. Carmeliet, Inferring the degradation of pultruded composites from dynamic nonlinear resonance measurements, *Polymer Composites*, **2**, 555-567 (2000).
- [11] M. Hammami, A. El Mahi, C. Karra, M. Haddar " Experimental analysis of the linear and nonlinear behaviour of composites with delaminations" *Applied acoustics*, doi :10.1016/j.apacoust.2015.10.026, 2015.
- [12] R. Guyer, K. McCall, N.Boitnott, Hysteresis, discrete memory and nonlinear wave propagation in rock: a new paradigm, *Physical Review Letters*, **74**, 3491–3494 (1995).
- [13] V. Zaitsev, V. Gusev, B. Castagnède, Thermoelastic mechanism for logarithmic slowdynamics and memory in elastic wave interaction with individual cracks, *Physical Review Letters*, **90**, 1–4 (2003).
- [14] LA.°Ostrovsky, PA.°Johnson, Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO*;**24**:1–46.(2001)
- [15] P.°Johnson, A.°Sutin, Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids. *Acoustical Society of America*,**117(1)**, 124–130.(2005)