

# Acoustique non linéaire pour le contrôle non destructif et le contrôle Santé des matériaux et des structures

## Applications aux métaux, bétons et composites à base polymère

Rachid El Guerjouma  
 M. Bentahar  
 T. Monnier  
 L. Deville  
 J.C. Baboux  
 GEMPPM  
 UMR CNRS 5510  
 INSA de Lyon  
 69100 Villeurbanne  
 E-mail : rachid.elguerjouma@insa-lyon.fr

L'acoustique non linéaire de par sa très grande sensibilité à l'endommagement diffus ou localisé des matériaux semble être une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructifs. De très nombreuses applications potentielles existent tant pour la détection de fissures et leur caractérisation que pour le suivi de l'état de santé des matériaux de structure (métaux, composites, béton, ...) et fonctionnels notamment pour l'électronique. Les non linéarités acoustiques peuvent être très élevées pour les matériaux inhomogènes comme les roches et certains composites. Ces non linéarités augmentent sensiblement en présence d'endommagement et ceci y compris pour des matériaux plus homogènes comme les alliages métalliques. En conséquence, la détection de micro-fissures ou de tout endommagement diffus ou localisé précoce, par le suivi des propriétés acoustiques non linéaires peut se révéler un moyen très efficace pour l'évaluation et le contrôle non destructif des matériaux et des structures. Si sur le plan théorique des efforts restent à faire pour décrire finement la complexité des mécanismes mis en jeu, la mise en œuvre expérimentale de ces méthodes peut être très simple et d'une grande efficacité pour le Contrôle Non Destructif et le contrôle santé des matériaux et des structures notamment instrumentées. Notre contribution s'inscrit dans ce cadre. Elle concerne trois matériaux, un alliage d'aluminium endommagé par traction, un béton du génie civil endommagé en compression et un composite base polymère endommagé en flexion. Pour le premier matériau, nous montrons après l'avoir défini que le suivi du paramètre de non linéarité acoustique  $\beta$  est très sensible à ce mode d'endommagement. Une étude comparative entre une approche linéaire basée sur le suivi de la rigidité en terme de module d'Young et l'approche non linéaire montre la supériorité de cette dernière. Pour le béton et le composite base polymère nous avons développé une méthode acoustique non linéaire de résonance. Cette méthode consiste à exciter de manière ultrasonore la structure et à suivre un mode de résonance judicieusement choisi en fonction du niveau d'excitation. Pour les matériaux sains, la fréquence de résonance ne varie pas avec le niveau d'excitation. Après endommagement, il apparaît clairement pour les deux matériaux un décalage de cette fréquence de résonance. Ce décalage est fonction du taux d'endommagement. Cette approche relativement facile à mettre en œuvre, offre un moyen simple et extrêmement sensible pour le contrôle non destructif et le contrôle santé des matériaux et des structures. Nous montrons par ailleurs pour le matériau composite que cette méthode est particulièrement intéressante pour les structures pouvant être instrumentées permettant un suivi in situ de l'endommagement.

Nonlinear acoustic is suggested as a new approach for the effective nondestructive evaluation of material degradation. Over recent years, some new types of high nonlinearities have been found in solids with strong microstructure like rocks or more classical materials like concrete or composites with defects like cracks and delaminations, etc. In such media, the nonlinearity is concerned with local dynamics of highly nonlinear inelastic elements. Such phenomena can be used for nondestructive purpose. In this field, many potential applications exist. In this paper we report some experimental results that show the potentiality of nonlinear ultrasonics as a powerful tool for nondestructive testing and Structural Health Monitoring (SHM) of materials. First, for metallic materials, the correlation between the nonlinear properties like the acoustic nonlinearity parameter  $\beta$  and the material degradation is investigated. It was confirmed that this parameter has a strong correlation with damage comparatively to linear damage indicators. To investigate damage in its early stages in quasi-brittle structures as concrete and composite materials as glass fibre reinforced polymers (GRFP), nonlinear ultrasonic vibration measurements were performed on concrete and GRFP samples in which damage was gradually induced by means of static loading tests. At different levels of damage, a complete modal analysis is carried out at increasing dynamic amplitude. For both materials, we show that, the nonlinear effects as resonant frequency shift as function of applied drive voltage are highly related to the amount of damage. Especially for the early damage states were the method shows a great sensitivity. We show that this method is particularly interesting for structures that can be instrumented, allowing an in situ characterisation of the damage. Thus nonlinear acoustic methods especially resonant ones, can be used as a powerful tool for structural health monitoring in many industrial domains.



acoustique non linéaire apparaît comme une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructifs des matériaux et des structures. En effet, si les non-linéarités acoustiques peuvent être très élevées pour les matériaux inhomogènes comme les roches, [1] [2] [3], elles augmentent sensiblement en présence d'endommagement. Des phénomènes nonlinéaires associés à l'endommagement sont également observés pour des matériaux beaucoup plus homogènes comme les alliages métalliques. Ainsi, de très nombreuses applications potentielles existent en acoustique non-linéaire tant pour la caractérisation de fissures macroscopiques que pour l'évaluation de l'endommagement diffus du à la présence de microfissures [4] [5] [6]. Dans ce dernier cas, du fait de leur grande sensibilité, les méthodes non linéaires devraient être particulièrement performantes notamment dans la détection des endommagements précoces. Si sur le plan théorique des efforts restent à faire pour décrire finement la complexité des mécanismes mis en jeu [7] [8], la mise en œuvre expérimentale de ces méthodes peut être relativement simple et d'une grande efficacité pour le Contrôle Non Destructif et le contrôle santé des matériaux et des structures notamment instrumentées. Notre contribution s'inscrit dans ce cadre. Elle concerne trois matériaux, un alliage d'aluminium endommagé par traction, un béton du génie civil endommagé en compression et un composite base polymère endommagé en flexion. Dans un premier temps, nous rappelons la loi de comportement élastique non linéaire en nous restreignant au cas classique sans hystérésis et définissons le paramètre de non-linéarité acoustique  $\beta$ . Nous rappelons ensuite les principales manifestations acoustiques du comportement non-linéaire notamment la génération d'harmoniques et le décalage des fréquences de résonance en fonction du niveau d'excitation.

Pour l'alliage d'aluminium endommagé par traction, nous montrons que le suivi du paramètre de non linéarité acoustique  $\beta$  est très sensible à ce mode d'endommagement. Une étude comparative entre une approche linéaire basée sur le suivi du module d'Young et l'approche non linéaire montre la supériorité de cette dernière.

Pour le béton et le composite base polymère nous avons développé une méthode acoustique non linéaire de résonance. Cette méthode consiste à exciter de manière ultrasonore la structure (barreau cylindrique pour les

bétons et plaques minces pour les composites) et à suivre en fonction du niveau d'excitation l'évolution d'un mode de résonance judicieusement choisi. Pour les matériaux sains, la fréquence de résonance ne varie pas avec le niveau d'excitation. Après endommagement, il apparaît clairement pour les deux matériaux un décalage de cette fréquence de résonance. Ce décalage est fonction du taux d'endommagement.

Cette approche relativement facile à mettre en œuvre, offre un moyen simple et sensible pour le contrôle non destructif et le contrôle santé des matériaux et des structures. Nous montrons par ailleurs pour le matériau composite que cette méthode est particulièrement intéressante pour les structures instrumentées permettant un suivi *in situ* de l'endommagement et un contrôle santé continu du matériau.

### Acoustique non linéaire des matériaux

Le comportement élastique non linéaire classique des matériaux est habituellement décrit par l'adjonction d'un terme non-linéaire  $\beta$  dans la loi de Hooke qui s'écrit alors sous la forme :

$$\sigma = E\varepsilon(1 + \beta\varepsilon) \quad (1)$$

Dans la relation (1),  $\sigma$  et  $\varepsilon$  sont respectivement la contrainte et la déformation dans une direction donnée  $x$ , résultant du champ ultrasonore.  $E$  est le module d'Young et  $\beta$  le paramètre de non-linéarité dans la direction  $x$ . Dans le cas où le matériau est endommagé,  $E$  et  $\beta$  sont des grandeurs effectives.  $E$  et  $\beta$  peuvent être déterminés à partir de mesures acoustiques. Le module d'Young  $E$  est identifié en considérant les vitesses de propagation en ondes longitudinales et transversales éventuellement en incidence variable si le matériau est anisotrope [9]. Le paramètre de non-linéarité que l'on peut exprimer en fonction des constantes d'élasticité (linéaires) d'ordre 2 et (non-linéaires) d'ordre 3 est déterminé à partir de mesures acoustoélastiques, c'est à dire à partir des variations des vitesses ultrasonores en fonction d'une contrainte élastique statique appliquée [10]. En effet, la théorie de l'acoustoélasticité qui décrit l'interaction entre une contrainte élastique statique appliquée et le champ ultrasonore permet d'exprimer  $\beta$  en fonction des réponses acoustoélastiques et de la direction de propagation

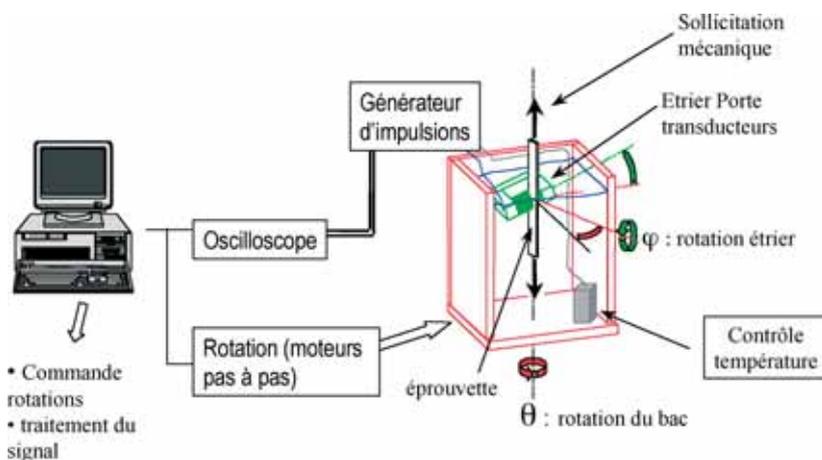


Fig. 1 : Banc ultrasonore en immersion associé à une machine de traction ; mesure de vitesse en incidence variable sous charge

[10]. Les mesures acoustiques et acoustoélastiques sont effectuées grâce à un dispositif ultrasonore en immersion associé à une machine de traction permettant de mesurer les vitesses de propagation en incidence variable, éventuellement sous contrainte statique. Ce dispositif, représenté sur la figure 1 permet également de faire des mesures dans le domaine plastique et donc de caractériser in situ l'endommagement ainsi créé. Dans notre étude, le module d'Young  $E$  et le paramètre de non-linéarité  $\beta$  ont été déterminés à l'état sain et après chaque étape d'endommagement.

Le comportement acoustique non-linéaire peut également être caractérisé par le phénomène de génération d'harmoniques. En effet, lorsqu'un matériau au comportement purement linéaire est excité en régime sinusoïdal à la fréquence  $f$ , la réponse du matériau est sinusoïdale de même fréquence. Si le comportement est non-linéaire, à la même excitation sinusoïdale de fréquence  $f$  correspond une réponse fondamentale à la fréquence  $f$ , d'amplitude  $A_1$  accompagnée d'harmoniques de fréquence  $2f, 3f, \dots$  d'amplitude  $A_2, A_3, \dots$  respectivement. Le paramètre de non-linéarité  $\beta$  est alors donné par la relation [7] :

$$\beta = \frac{8}{dk^2} \frac{A_2}{A_1^2}$$

$d$  est la distance de propagation et  $k$  le nombre d'onde. Ainsi, l'endommagement peut être caractérisé en terme de réponse acoustique non linéaire d'ordre supérieur, par le suivi des harmoniques. En effet, quand la propagation du fondamental de l'onde reste pratiquement insensible à la présence d'endommagement, ce dernier a un effet très important sur les harmoniques d'ordre supérieur qui voient en général leurs amplitudes augmenter [6].

Une autre manifestation, caractéristique du comportement non-linéaire, est le décalage des fréquences de résonance des structures en fonction du niveau d'excitation. En effet, pour une structure en matériau au comportement linéaire, la fréquence de résonance ne change pas avec le niveau d'excitation, il en va autrement d'une structure en matériau au comportement non-linéaire et/ou endommagé où l'on assiste à un décalage vers les plus basses fréquences en fonction du niveau d'excitation [11].

## Caractérisation de l'endommagement

### Matériaux polycristallins : Alliage métallique

De nombreuses études ont montré que les méthodes acoustiques linéaires ne sont pas très sensibles au tout début du processus d'endommagement ou lorsque ce dernier est faible ou localisé comme c'est le cas pour les matériaux ductiles notamment métalliques [9].

Ainsi sur des éprouvettes en alliage d'aluminium 7010, fortement déformées dans le domaine plastique, des variations très faibles de vitesses de propagation et de modules d'Young ont été observées perpendiculairement et le long de l'axe de traction de l'éprouvette. Ceci apparaît clairement sur la figure 2 où est représentée la variation du paramètre d'endommagement  $D$  dans la direction de traction. Ce paramètre représente la perte de rigidité du matériau en terme de module d'Young :

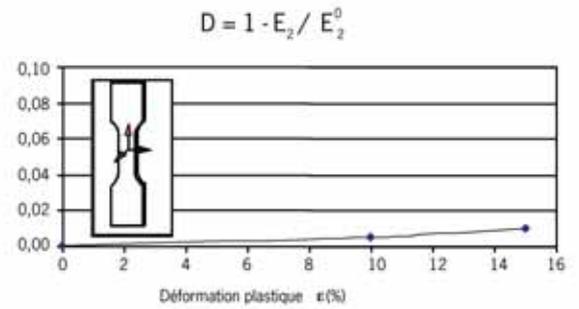


Fig. 2 : Evolution du paramètre d'endommagement linéaire dans la direction des tractions en fonction de la déformation plastique

$$D = 1 - \frac{E_2}{E_2^0}$$

Ici,  $E_2^0$  est le module d'Young dans la direction de traction à l'état vierge,  $E_2$  ce même module mesuré par ultrasons après chaque étape d'endommagement. A l'état vierge  $D=0$ , à la rupture  $D$  tend vers 1. Nous avons représenté ici le paramètre qui est le plus sensible à cet endommagement puisque mesuré dans le sens de traction. Sur cette figure on peut remarquer que même pour de grandes déformations plastiques la variation de  $D$  ne dépasse pas 2%.

Pour caractériser ce type d'endommagement très localisé, les méthodes de l'acoustique non linéaire sont mieux adaptées. Pour rendre compte de cela, nous avons introduit une variable d'endommagement  $D_{\beta}$ , définie à partir du paramètre de non linéarité  $\beta$  [9] :

$$D_{\beta} = 1 - \frac{\beta^0}{\beta}$$

$\beta^0$  étant le paramètre de non-linéarité du matériau sain et  $\beta$  celui du matériau endommagé.  $\beta^0$  et  $\beta$  sont mesurés à l'aide du banc ultrasonore en immersion associé à une machine de traction présenté dans le paragraphe précédent. Il est à noter que  $\beta$  est mesuré sur le matériau plastifié lors de la remise en charge élastique. Ce paramètre varie également entre 0 et 1. Il vaut 0 à l'état vierge et 1 au voisinage de la rupture. Comme nous

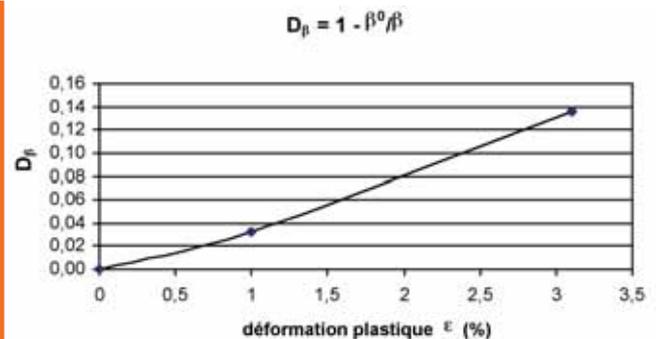


Fig. 3 : Evolution du paramètre d'endommagement non linéaire  $D_{\beta}$  en fonction de la déformation plastique pour l'alliage d'aluminium 7010.

pouvons le constater sur la figure 3, comparativement au paramètre d'endommagement linéaire  $D$ , la variable non linéaire  $D_{\beta}$  varie de manière importante et ceci pour des déformations plastiques relativement faibles.

### Matériaux hétérogènes : béton du génie civil et composites base polymère

Contrairement aux métaux, les méthodes linéaires basées sur le suivi des vitesses ultrasonores et des modules d'Young donnent de meilleurs résultats pour la caractérisation de l'endommagement lorsque les matériaux présentent un caractère plus hétérogène. Ces méthodes trouvent néanmoins leurs limites lorsque le matériau a un comportement fragile comme les bétons ou lorsque l'on s'intéresse au tout début du processus d'endommagement pour les composites notamment. Pour ces matériaux qui sont très présents dans un grand nombre d'applications structurales, les méthodes non linéaires sont une voie prometteuse pour la caractérisation fine de l'endommagement et le Contrôle Non Destructif. Les matériaux considérés dans notre étude sont des bétons du génie civil et des composites base polymère utilisés dans l'industrie automobile. Pour caractériser l'endommagement de ces matériaux, nous avons privilégié les méthodes de résonance et les phénomènes non linéaires associés. En effet, pour ces matériaux, la voie acoustoélastique mise en œuvre pour les métaux ne permet pas des mesures acoustoélastiques fiables, ce qui rend délicate l'identification du paramètre de non-linéarité  $\beta$ . Pour le suivi de l'endommagement de ces matériaux, nous avons ainsi mis en œuvre une méthode globale non linéaire basée sur le suivi d'un mode de résonance judicieusement choisi.

Pour les bétons du génie civil, le mode opératoire retenu est résumé sur la figure 4. Une éprouvette cylindrique en béton est excitée à l'une de ses extrémités par un transducteur ultrasonore de fréquence centrale 500 kHz, vibrant en mode longitudinal. L'excitation est effectuée en train de sinusoides en balayant en fréquence. A l'autre extrémité du cylindre un vibromètre laser détecte les modes de vibration et les transmet à un analyseur de spectre. Cette détection peut également se faire à l'aide d'un transducteur piézoélectrique accolé à cette extrémité. Toute la procédure est assistée par ordinateur.

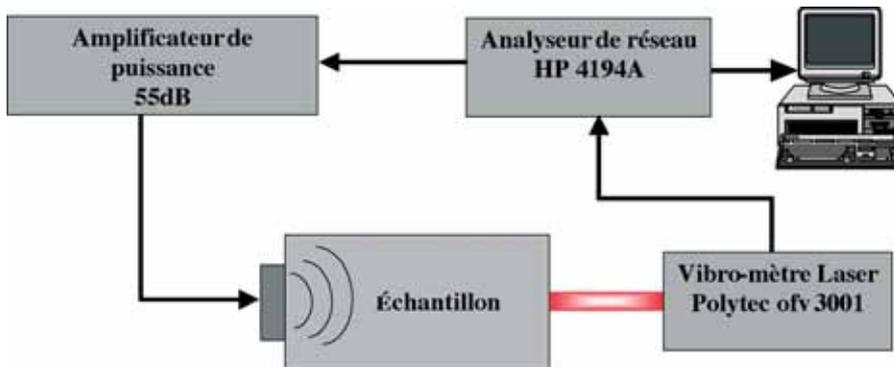


Fig. 4 : Dispositif expérimental pour l'étude des vibrations longitudinales non linéaires des bétons du génie civil

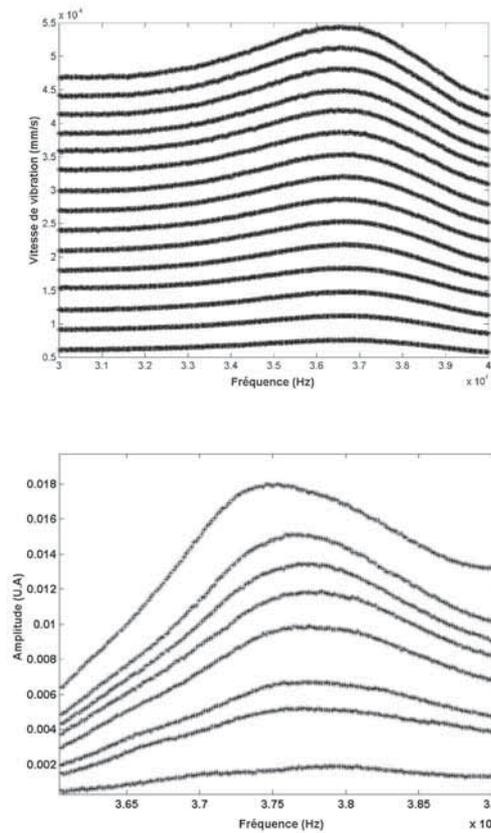


Fig. 5 : Résonance longitudinale d'un barreau de béton en fonction du niveau d'excitation  
(a) : matériau vierge, mesure par pastille piezo électrique  
(b) : matériau endommagé, mesure par vibromètre LaSer

L'expérience est effectuée en suivant l'évolution, en fonction du niveau d'excitation, du mode de vibration de plus basse fréquence. Comme cela est reporté sur la figure 5 (a), pour le matériau vierge, aucun décalage en fréquence n'est constaté. Dans ce cas les vibrations ont été détectées par un transducteur piézoélectrique. Une mesure au vibromètre laser n'a également décelé aucun décalage de la fréquence. La même expérience est répétée sur un autre cylindre fabriqué dans les mêmes conditions, endommagé en compression. Sur le matériau endommagé, les vibrations ont été mesurées par vibromètre laser. Le résultat correspondant est reportée sur la figure 5 (b).

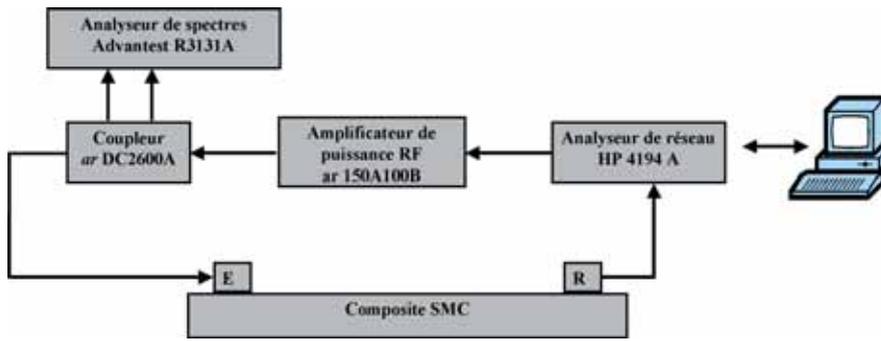


Fig. 6 : Dispositif expérimental pour l'étude de la résonance non linéaire en flexion d'une plaque de composite SMC instrumentée par pastilles piézoélectriques (E : émettrice, R : réceptrice)

Sur cette figure, on peut constater un décalage en fréquence très net, résultant de l'endommagement de la structure. De mise en œuvre relativement simple, cette expérience montre la grande sensibilité de la méthode en résonance non-linéaire pour la détection de l'endommagement.

La pertinence et l'intérêt de cette approche est encore plus visible sur le composite base polymère. Ce composite de type SMC (Sheet Molding Compound) est constitué d'une

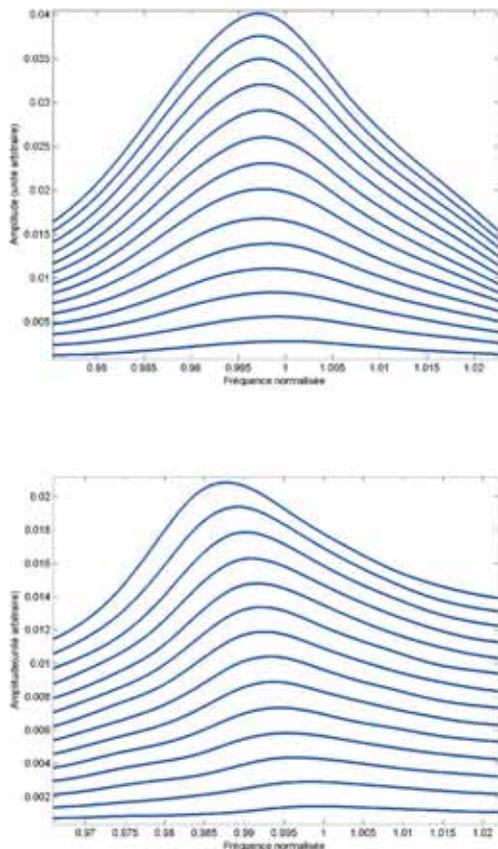


Fig. 7 : Résonance en flexion d'une plaque de composite SMC en fonction du niveau d'excitation (a) : matériau vierge, (b) matériau endommagé

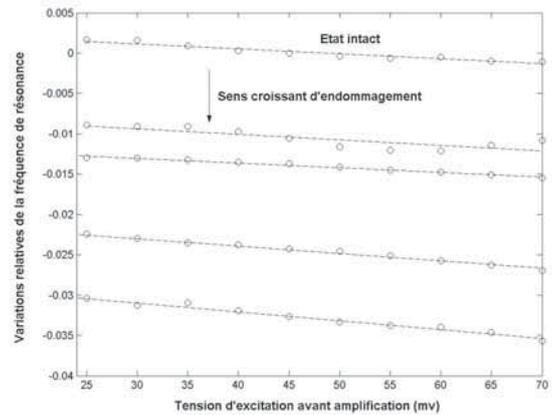


Fig. 8 : Variation relative de la fréquence de résonance en fonction du niveau d'excitation pour des taux d'endommagement croissants

matrice polyester chargée de craie, renforcée par des fibre de verre courtes. Les éprouvettes sous forme de plaque ont été endommagées progressivement en flexion trois points. Ces éprouvettes ont été instrumentées par éléments piézo-électriques, comme indiqué sur la figure 6 page.

Sur l'éprouvette en SMC, deux éléments piézoélectriques sont collés aux deux extrémités de la structure, le premier jouant le rôle d'émetteur le second de récepteur. Les modes de vibration en flexion ont été suivis en fonction de l'endommagement sur la même éprouvette. Lors de cette expérience, un décalage en fréquence progressif a été constaté et ceci dès le début du processus, comme indiqué sur la figure 7 où sont représentées les réponses de l'éprouvette dans son état vierge et après le premier stade d'endommagement.

Sur cette figure le décalage en fréquence est clairement mis en évidence. Ce décalage en fréquence est fonction du taux d'endommagement comme cela est montré sur la

figure 8, où nous avons reporté les variations relatives de fréquence en fonction du niveau d'excitation et ceci pour des états d'endommagement croissants.

Cette figure montre bien la très bonne corrélation entre la variation de la fréquence de résonance et l'endommagement. Il est à noter que ces méthodes de résonance sont relativement faciles à mettre en œuvre et peuvent s'adapter à différentes géométries (cylindres, plaques...). Notons également que l'instrumentation des structures quand elle est possible permet un contrôle santé continu et *in situ* du matériau.

## Conclusion

Dans ce travail nous nous sommes attachés à montrer les potentialités de l'acoustique non linéaire pour la détection et la caractérisation de l'endommagement des matériaux de structure. La grande sensibilité de ces méthodes a été montrée tout d'abord sur un alliage métallique d'aluminium où le paramètre de nonlinéarité  $\beta$  et la variable d'endommagement associée  $D_\beta$  se sont révélés de très bons indicateurs d'endommagement, comparativement aux indicateurs linéaires reliés aux modules d'Young. Sur des matériaux plus hétérogènes, des bétons du génie civil et des composites base polymère, nous avons montré que la méthode acoustique de résonance permettait une caractérisation fine de l'endommagement, un décalage des fréquences de résonance en fonction du niveau d'excitation étant constaté pour de très faibles taux d'endommagement. Ce décalage en fréquence est clairement corrélé au taux d'endommagement, autorisant une caractérisation quantitative de ce dernier. Cette approche en résonance, relativement facile à mettre en œuvre, offre un moyen simple et sensible pour le contrôle non destructif et le contrôle santé des matériaux et des structures. Nous montrons par ailleurs pour le matériau composite que cette méthode est particulièrement intéressante pour les structures instrumentées permettant un suivi *in situ* de l'endommagement et un contrôle santé continu du matériau.

## References bibliographiques

- [1] Johnson P.A, McCall K.R « Observation and Implications of Nonlinear Elastic Wave Response in Rock ». Geophysical Research Letters, Vol. 21. N°3. Pages 165-168. (1994)
- [2] Van Den Abeele K., Johnson P.A «Elastic Pulsed Wave Propagation in media with second or higher-order nonlinearity. Part II. Simulation of Experimental Measurement on Berea Sandstone» J. Acoust. Soc. Am 99(6), (1996)
- [3] Moussatov A., Castagnède B., and Gusev V. « Observation of nonlinear interaction of acoustic waves in granular materials : demodulation process », Phys. Lett. A., 283, 216-223 (2001)
- [4] Zaitsev V., Sutin A.M., Belyaeva Tl. Y. and Nazarov V.E. « Nonlinear interaction of acoustical waves due to cracks and its possible usage for cracks detection » J. Vibration & Control, 1, 335-344 (1995)
- [5] Zaitsev V. Gusev V. and Castagnède B., « Thermoelastic Mechanism for Logarithmic Slow Dynamics and Memory in Elastic Wave Interactions With Individuals Cracks» Phys. Rev. Lett., 90 (7), 075501 (2003)
- [6] Nagy P.B. « Fatigue damage assesment by nonlinear ultrasonic material characterization » Ultrasonics, 36, 375-381 (1998)
- [7] Van Den Abeele. K.E- «Elastic Pulsed Wave Propagation in media with second or higher-order nonlinearity. Part I. Theoretical framework » J. Acoust. Soc. Am 99(6), (1996)

[8] Moussatov A. Gusev V. and Castagnède B., « Self-Induced Hysteresis for Nonlinear Acoustic Waves in Cracked Material », Phys. Rev. Lett., 90 (12), 124301 (2003)

[9] El Guerjouma R., Faiz A., Godin N., Bentahar M., and Baboux J. C. « Linear and non linear ultrasonics for material damage evaluation and health monitoring » Matériaux et Techniques, pp 48-52, Déc. 2002

[10] El Guerjouma R., Deschamps M. Gérard A. « Acoustoélasticité sous incidence variable : une détermination des constantes élastiques du troisième ordre » Acustica, Vol 77, (1992)

[11] Van Den Abeele K.E., Sutin A, Carmeliet J, Johnson P.A (2001) « Micro-Damage. Diagnostics Using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) ». NDT&E International 34: 239-248