

Détection et localisation de microdégradation de matériaux par spectroscopie d'ondes élastiques non linéaires

Résumé

Les systèmes de contrôle-qualité des matériaux possédant une grande sensibilité de détection, une quantification fiable et une localisation précise des défauts et de la dégradation micro-structurale restent très demandés dans les domaines des technologies de pointe, comme l'aéronautique par exemple. Les méthodes de Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires (NEWS pour Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy) constituent une famille relativement jeune de techniques innovantes de contrôle non-destructif (CND) exploitant, en vue de diagnostic, la signature macroscopique de la dégradation à l'échelle microscopique, provenant de la non-linéarité et de la propriété non-univoque de la relation contrainte-déformation à l'échelle microscopique. Parmi les signatures de la non-linéarité, on peut citer la dépendance du module d'élasticité en fonction de l'amplitude, l'extra-atténuation non linéaire, la génération d'harmoniques et de produits d'intermodulation, les effets de modulation de phase, les phénomènes de dynamique lente, etc. Dans cet article, nous nous proposons d'illustrer la très bonne sensibilité des méthodes non linéaires NEWS par rapport aux méthodes linéaires traditionnelles pour la détection de défauts, naissant sous la forme de microfissures ou de délamination, d'affaiblissement des liaisons adhésives, de dommages thermiques ou chimiques, mais également pour le monitoring de l'évolution structurelle des matériaux. En plus de constituer des techniques de diagnostic, les observations macroscopiques des différentes signatures de la non-linéarité sont désormais considérées comme des approches performantes pour de nouvelles fonctions d'imagerie haute sensibilité. À titre d'exemple, la symbiose des techniques classiques de renversement temporel (RT) acoustique et de la spectroscopie non linéaire nous apporte une contribution significative pour l'imagerie localisée de zones de microdégradation. Il s'agit de l'une des seules techniques connue aujourd'hui pour dissocier les réponses linéaires (cavités, interfaces) des diffuseurs non linéaires (zone de défauts, fissures). Le concept de non-linéarité explorée à partir de techniques de retournement temporel est abordé dans cet article d'un point de vue numérique et expérimental.

Abstract

Quality control systems for sensitive detection, quantification and localization of microstructural damage are currently high in demand. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) comprises a relatively new class of innovative non-destructive techniques that exploits macroscopic signatures of microdamage resulting from the nonlinearity and non-uniqueness of the stress-strain relation at the microscopic level for diagnostic purposes. These nonlinearity signatures include amplitude dependent modulus reduction, nonlinear attenuation, generation of harmonics and intermodulation frequencies, phase modulation, slow dynamics, etc. In this paper we illustrate the high sensitivity of NEWS in comparison with traditional linear techniques for the detection of incipient damage in the form of microcracks or delaminations, weakening of adhesive bonds, thermal and chemical damage, and for the monitoring of microstructural evolutions. In addition to being a diagnostic technique, macroscopically observed signatures of nonlinearity have been introduced in innovative approaches for new and sensitive imaging techniques. As an example, the combination of classical time reversed acoustics and nonlinear spectroscopy brings about a significant enhancement of imaging localized areas of microdamage, and is one of the only techniques known today to discriminate between a linear (void) and a nonlinear scatterer (crack). The concept of nonlinearity based time reversed techniques is discussed both from a numerical and an experimental point of view.

Koen Van Den Abeele

Laboratory of nonlinear ultrasound spectroscopy
Katholieke Universiteit Leuven
Campus Kortrijk
B-8500 Kortrijk
BELGIQUE
E-mail : koen.vandenabeele@kuleuven-kortrijk.be

Serge Dos Santos

LUSSI - CNRS
Université François-Rabelais de Tours
GIP Ultrasons ENIVL
Rue de la Chocolaterie
F-41034 Blois CEDEX
E-mail : serge.dossantos@univ-tours.fr

Vous êtes vous déjà demandé pourquoi, lorsqu'elle est frappée, le ton d'une cloche intacte sonne plus haut et plus longuement qu'une cloche fissurée? Ou pourquoi le ton d'une cloche fissurée semble s'abaisser lorsque celle-ci est frappée plus fort, comparé à celui-ci lorsqu'elle est frappée moins fort? Ou quelle est l'origine des harmoniques, responsable de la brillance du timbre de cette même cloche, mais fissurée? L'origine de ces effets se trouve dans les propriétés spéciales de la cloche, et

surtout du matériau constituant la zone dégradée autour de la fissure. Les microfissures sont responsables de la très forte dépendance de la célérité et de l'atténuation des ondes se propageant dans le matériau, à l'amplitude de l'excitation leur donnant naissance. Le matériau est alors « élastiquement non linéaire », ce qui veut simplement dire que la fameuse loi d'élasticité de Hooke (déformation proportionnelle à la contrainte) atteint ses limites de validité. Une correction doit dorénavant être prise en compte

pour interpréter ces phénomènes. À titre d'exemple, on peut citer le comportement élastique typiquement d'un bloc de roche soumis à une contrainte uniaxiale lors d'expériences de compression quasi-statiques [1]. Il est dorénavant bien établi que la structure complexe du matériau (inclusions souples dans une matrice dure) est responsable de la réponse non linéaire. L'analogie avec les microfissures dans les matériaux conduit au phénomène similaire. En plus de la relation non linéaire, nous discernons des comportements radicalement différents durant les phénomènes de compression et de dilatation : une dépendance en fonction de la compression maximale lors des phases de dilatation, et un effet mémoire via la dépendance en fonction de l'histoire de la compression (compression précédente). Même si la non-linéarité observée lors de l'expérience présentée en Figure 1 concerne des niveaux de déformation importants, l'hypothèse est également faite pour les non-linéarités micromécaniques dans la relation contrainte-déformation. celle-ci influence de façon drastique la réponse dynamique du matériau soumis à des déformations bien plus faibles en régime acoustique.

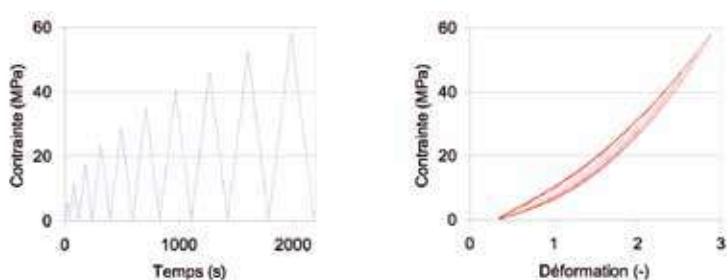


Fig. 1 : Exemple de comportement non linéaire dans les roches : visualisation d'une expérience de compression uni-axiale quasi-statique d'un bloc de Serena faisant apparaître une relation non linéaire et non-univoque de la caractéristique contrainte-déformation, mettant en évidence des effets de mémoire.

Gauche : protocole de compression.

Droite : mesure de la réponse contrainte-déformation

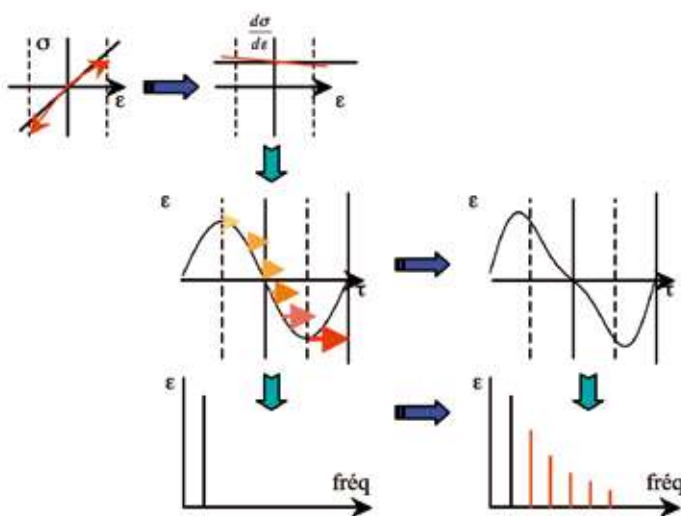


Fig. 2 : Un exemple de transformation non linéaire d'une onde. La non-linéarité de la relation contrainte-déformation est à l'origine de la dépendance de la célérité de l'onde en fonction de l'amplitude, conduisant à la déformation du profil de l'onde et à la génération d'harmoniques.

Par exemple, la distorsion de l'onde de déformation au cours d'une propagation acoustique dans un milieu non linéaire est illustrée en Figure 2. Chaque relation contrainte-déformation non linéaire conduit à une relation module-déformation dépendant de l'amplitude ; le module étant calculé à partir de la dérivée de la contrainte par rapport à la déformation. Dans cet exemple, le module est plus faible pour des grandes valeurs d'amplitude de déformation, alors qu'il est plus important pour de petites amplitudes de déformation. Ceci implique que la célérité des ondes acoustiques diminue lorsque les déformations augmentent, conférant ainsi à la non-linéarité la propriété de « ramollir » les matériaux.

Ainsi, durant la propagation, les surpressions vont se propager moins vite que les dépressions. Ceci génère alors une déformation de la forme d'onde, qui, si elle est sinusoïdale, conduira à la création de nouvelles composantes spectrales (les harmoniques) facilement observables macroscopiquement. D'autres effets peuvent également apparaître. La non-unicité de la relation contrainte-déformation, matérialisée par un hystérésis, conduit à une perte d'énergie, appelée extra-atténuation non

linéaire, produite lors de chaque cycle d'excitation de la déformation. Les discontinuités dans la relation module-déformation génèrent également des phénomènes de génération d'harmoniques ou des phénomènes plus complexes de mélange de fréquences avec l'apparition de produits d'intermodulation, etc.

Dans la recherche de nouvelles méthodes de CND améliorées en sensibilité et susceptibles de localiser et quantifier des dégradations microstructurelles dans une large gamme de matériaux, de nombreuses équipes de chercheurs à travers le monde ont développé des techniques innovantes qui explorent le comportement micromécanique des matériaux et leurs effets sur la propagation d'ondes acoustiques en observant les propriétés macroscopiques et leurs dépendances en fonction de l'amplitude [1-19]. Ces méthodes sont appelées Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires (NEWS pour Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy). L'objet de ces méthodes est de mesurer et d'analyser la signature macroscopique de la violation locale de la relation linéaire contrainte-déformation à l'échelle microscopique [1-3,19].

De nombreuses techniques NEWS ont été développées pour montrer l'existence de la non-linéarité induite par la dégradation des matériaux (délamination, microfissures, ou liaisons adhésives fragilisées). Cette non-linéarité a été observée en étudiant la génération d'harmoniques et de produits d'intermodulation entre les fréquences acoustiques d'excitation, les décalages de fréquences de résonance avec de l'amplitude, mais également en observant les contributions non linéaires aux propriétés d'atténuation. Le succès des méthodes NEWS appliquées au CND s'explique par le fait que la dégradation interne peut être mesurée via une détection instantanée de l'augmentation du paramètre non linéaire.

La connexion directe entre les effets non linéaires et les microdégradations dans les métaux et composites est désormais établie sans aucun doute dans de nombreuses configurations expérimentales. Parmi elles, on peut citer comme sonde de dégradation, les mesures obtenues à partir des méthodes de propagation non linéaires d'ondes [4-5], de Spectroscopie de modulation non linéaire d'ondes [6-8], de Spectroscopie de résonance acoustique non linéaire monomode [9-11], de l'Analyse de réverbération non linéaire [12-13], de la Dynamique lente [14-15], de la Modulation de phase [16,17], de l'Autodémodulation d'ondes [18], etc.

Les tests réalisés sur une large gamme de matériaux soumis à des régimes de dégradations diverses d'origines mécanique, chimique ou thermique, ont montré que la sensibilité de ces méthodes non linéaires pour la détection de phénomènes à l'échelle microscopique est nettement supérieure à celle obtenue avec les méthodes acoustiques linéaires [20-22].

Les sections ci-après contiennent une sélection de trois exemples de techniques NEWS appliquées au CND de matériaux solides. La suite sera ensuite consacrée à l'apport de ces méthodes NEWS en terme de technique d'imagerie.

Méthodes NEWS: exemples de réalisation expérimentale

Spectroscopie de réverbération non linéaire

Le premier exemple concerne l'application de la Spectroscopie de réverbération non linéaire (NRS pour Nonlinear Reverberation Spectroscopy [12-13]) appliquée à l'évaluation des dégradations de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics), un matériau qui présente actuellement un très grand intérêt dans l'industrie aéronautique. La méthode NRS consiste à exciter sinusoïdalement l'échantillon à une amplitude et une fréquence constante durant une période suffisamment longue. La fréquence est choisie proche d'une fréquence de résonance propre de l'échantillon. En pratique, cette excitation peut être réalisée sans contact à l'aide d'un

haut-parleur acoustique. Après un certain nombre de cycles, nécessaire à l'échantillon pour qu'il atteigne son état de résonance stationnaire, l'excitation sinusoïdale est stoppée à $t = t_0$, et la réponse réverbérante de l'échantillon est mesurée et enregistrée de t_0 à t_1 . La réponse peut également être enregistrée sans contact à l'aide d'une sonde laser de type interférométrique ou vibrométrique. Le signal de réverbération est typiquement un signal d'amplitude décroissante au cours du temps, avec une grande amplitude proche de t_0 , et une faible proche de t_1 . Une synchronisation appropriée permet un moyennage du signal, et un asservissement approprié s'avère très utile pour augmenter la dynamique en fonction du temps de mesure. Le signal décroissant est ensuite analysé sur une petite fenêtre temporelle (20 cycles) par un ajustement sur une sinusoïde d'amplitude exponentiellement décroissante avec l'amplitude; la constante de temps de l'exponentielle, la fréquence et la phase étant choisies comme paramètres d'ajustement.

Ceci permet de construire une représentation paramétrique de la vraie fréquence de résonance en fonction de l'amplitude, donnant ainsi la signature de la non-linéarité. Si le matériau est linéaire, la fréquence de réverbération reste constante quelle que soit la fenêtre temporelle. Si le matériau est non linéaire, cette fréquence de réverbération augmente significativement avec le temps, ce qui correspond à une diminution d'amplitude.

La Figure 3 confirme clairement ce comportement pour trois échantillons de CFRP: un échantillon de référence, un échantillon traité thermiquement à 250° pendant 30 minutes, et un échantillon traité à 400° pendant 45 minutes. La caractéristique linéaire de la décroissance de la fréquence en fonction de l'amplitude du déplacement est parfaitement prédite par un modèle hystérétique dans lequel la relation contrainte-déformation est non univoque. La pente de déviation de fréquence peut être utilisée comme une signature paramétrique de la non-linéarité. La figure 3b illustre l'évolution de cette pente pour les différentes températures et temps d'exposition. Une comparaison avec des C-scan classiques confirme la très bonne corrélation entre la non-linéarité et la présence de délamination croissante (Figure 4).

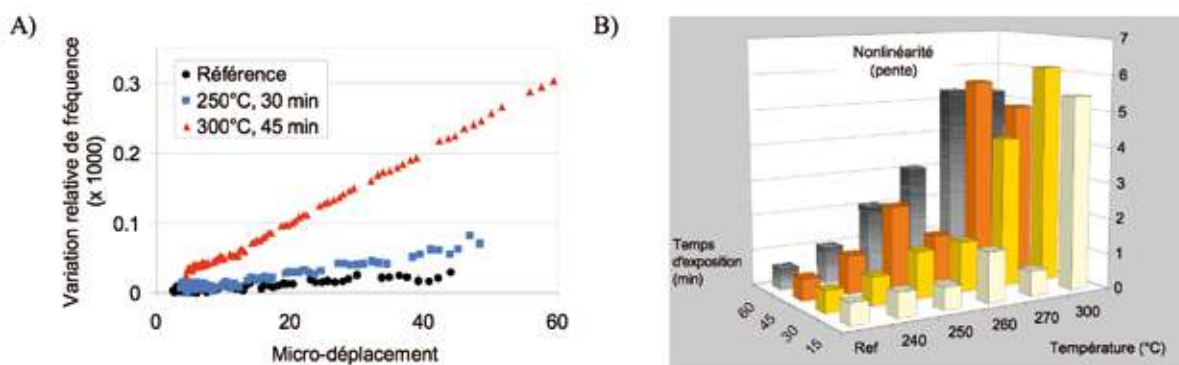


Fig. 3: Technique de Spectroscopie par réverbération non linéaire (NRS) appliquée à des échantillons de CFRP endommagés thermiquement.

A: NRS analysé par fréquence de résonance pour un échantillon sain et des échantillons exposés à 250° pendant 30 minutes et à 300° pendant 45 minutes, normalisés, pour chaque série, à la fréquence de résonance linéaire (faible amplitude).

B: évolution de la signature du CFRP en fonction de la température (Ref-240-250-260-270-300°C) et du temps d'exposition (15-30-45-60').

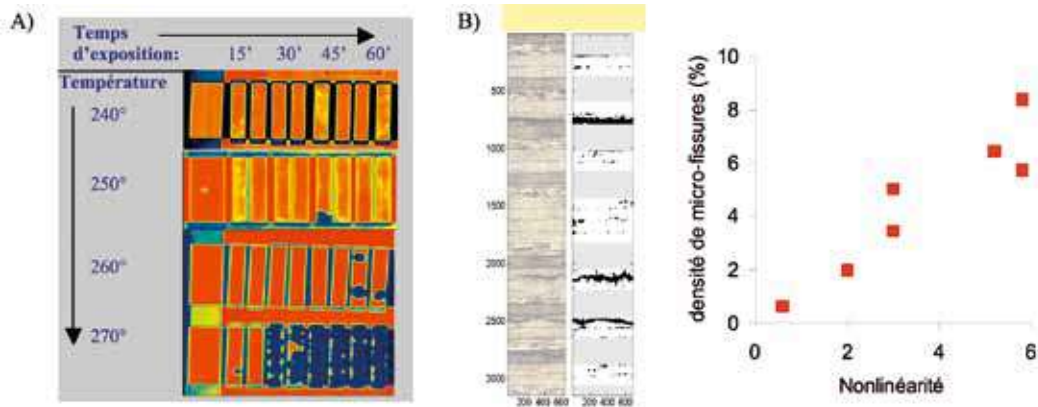


Fig. 4: A: C-scan classiques des échantillons de CFPR en fonction de la température (Ref-240-250-260-270°C) et du temps d'exposition (15-30-45-60') montrant une signature de délamination. B: quantification de la densité de microfissures par une technique de traitement d'image, et par la signature de la non-linéarité extraite par NRS.

Pour quantifier le niveau de dégradation, une analyse par microscopie optique de différentes sections du CFPR a été réalisée en représentant un histogramme et utilisant un seuil par niveau de gris. À partir de ces images, on obtient une estimation de la densité de microfissures qui permet une comparaison avec la non-linéarité macroscopique de l'échantillon. La figure 4b montre clairement que l'augmentation de la non-linéarité est corrélée à une augmentation du niveau de microdégradation.

Une étude similaire sur des échantillons de CFPR soumis à un processus d'essais de fatigue en flexion 3 points révèle également que la sensibilité de la signature non linéaire est bien supérieure à celle obtenue par les propriétés linéaires telles que l'atténuation.

Les pièces sont de géométrie complexe, composées d'une barre à section circulaire ouverte des deux côtés, et ressemblent au nombre 8 allongé. Avec la NMWS, on étudie l'interaction paramétrique entre un signal sinusoïdal de haute fréquence et un autre de basse fréquence; ce dernier étant appliqué à des amplitudes différentes. Si le matériau est intact, nous nous attendons à aucune interaction entre les deux fréquences (cependant, des harmoniques de la basse fréquence peuvent apparaître d'origine électronique).

Si le matériau est dégradé, les non-linéarités locales de la microstructure créent des composantes d'intermodulation dans le spectre de fréquence: les processus basse fréquence (de grande amplitude) activent la non-linéarité et module l'amplitude de la composante haute fréquence (la sonde). Dans ce cas précis, les deux fréquences appliquées sont à $f_1 = 6,7$ kHz et $f_2 = 127,3$ kHz, et les tensions d'excitation (V_1) pour f_1 , ont été choisies, avant amplification, pour 7 valeurs jusqu'à la valeur de 10V. L'amplitude de la tension à f_2 a été maintenue constante. La Figure 5a, affichée sous la forme d'un tracé de contour,

Spectroscopie par Modulation Non linéaire d'Ondes

Dans ce second exemple, nous appliquons la technique de Spectroscopie par modulation non linéaire d'ondes (NMWS pour Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy) [6-8] à deux pièces métalliques, une saine et l'autre endommagée, issues de l'industrie automobile (« connecting rods »).

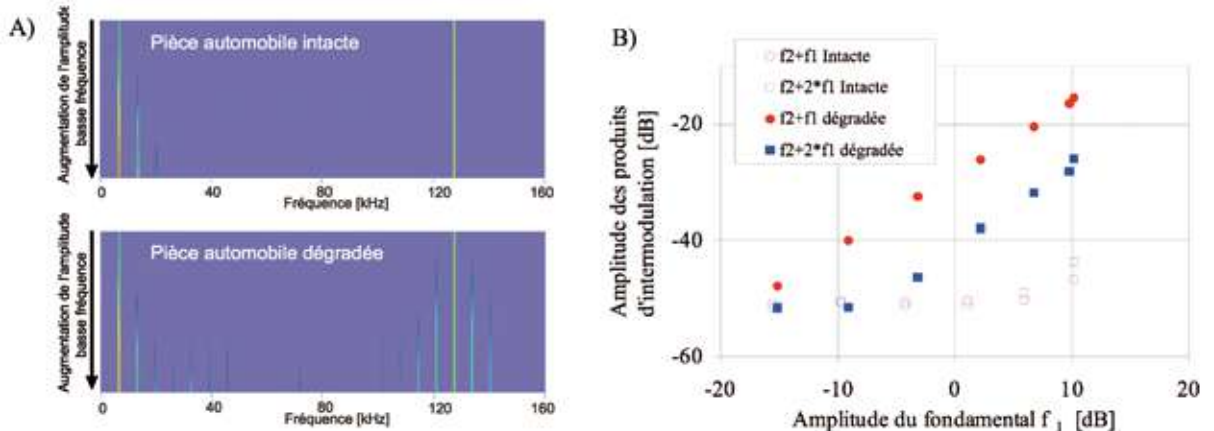


Fig. 5: Spectroscopie par Modulation non linéaire d'ondes (NMWS pour Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy). A) Contour interpolé NWMS du spectre de modulation d'onde ($f_1 = 6,7$ kHz, $f_2 = 127,3$ kHz) pour une pièce automobile saine et dégradée dans le cas d'une augmentation de la tension (V_1) de l'excitation à f_1 pour une amplitude à f_2 fixée. La fréquence est représentée sur l'axe des abscisses, et l'amplitude de la tension (V_1) à f_1 est en ordonnée (la tension augmente vers le bas). La palette de couleur correspond à l'amplitude de la composante spectrale mesurée. L'existence d'harmoniques et de composantes latérales de modulation apparaît dans l'échantillon dégradé. B) Analyse des produits d'intermodulation du premier et du second ordre en fonction de l'amplitude de la tension d'excitation V_1 pour les pièces automobiles saines et dégradées.

montre la dépendance de l'amplitude du spectre pour des barreaux sains et dégradés.

La palette de couleur traduit l'amplitude de la composante fréquentielle mesurée. La figure montre de façon évidente la présence d'une abondante richesse des harmoniques dans l'échantillon dégradé alors que l'échantillon sain (linéaire) reste insensible à la variation d'amplitude d'excitation V_1 . Cette augmentation drastique est également visible sur la Figure 5b où l'amplitude des termes d'intermodulation du premier et du second ordre sont exprimés en fonction de l'amplitude du fondamental f_1 , dans le cas intact et dégradé. Dans ce dernier cas, la pente semble proche de l'unité pour $f_1 + f_2$, le terme « somme » du premier ordre, et une pente entre 1 et 2, pour $2f_1 + f_2$, terme « somme » du second ordre. Des résultats similaires ont été obtenus pour les termes « différence » d'ordre 1 et 2.

des changements de la microstructure dans un béton au cours du processus d'hydratation [22-24]. Pour ce faire, un système intégré, comprenant un dispositif actif et passif a été conçu. Ce système est élaboré à partir d'un système d'émission acoustique (EA) d'une part, et d'un dispositif de caractérisation de vitesse de pulse et de génération d'harmonique lors de la propagation d'ondes longitudinales (P) et transverses (S), d'autre part.

Les coefficients non linéaires sont obtenus par l'évaluation des harmoniques A_2 à la fréquence double et présents dans un train d'ondes à 100 kHz (séquentiellement pour les ondes S et P), en fonction de la réponse du fondamental A_1 . Le coefficient de proportionnalité, que présente la loi quadratique entre A_2 et A_1 permet d'accéder à la valeur de la signature de la non-linéarité. La figure 6 illustre l'évolution de cette valeur mesurée pendant trois jours, en fonction du temps.

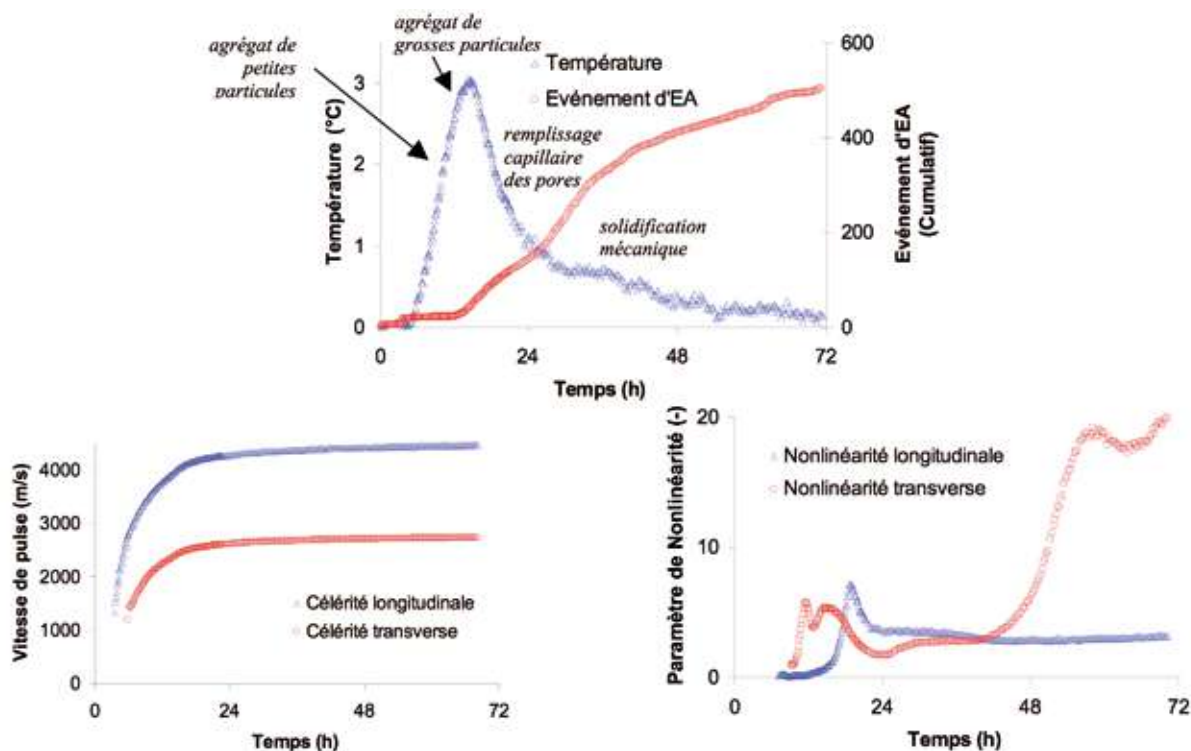


Fig. 6: Évolution de la température, des événements cumulés d'Émission Acoustique, de la vitesse des ondes S et P, et des coefficients de non-linéarité des ondes S et P, au cours de la phase initiale du processus d'hydratation du béton

Spectroscopie par propagation non linéaire d'ondes acoustiques

Le troisième et dernier exemple est une illustration de la méthode de Spectroscopie par propagation non linéaire d'ondes (NWPS pour Nonlinear Wave Propagation Spectroscopy [4-5]). Cette méthode consiste simplement à quantifier, en fonction de l'amplitude du fondamental, le niveau d'harmonique généré par une onde sinusoïdale se propageant à travers l'échantillon. Ici, nous choisissons, pour illustrer cette méthode, une application qui n'est pas particulièrement associée à l'évaluation de la dégradation. La méthode NWPS a été appliquée pour évaluer les étapes

En observant le profil de température, la croissance relativement lente est suivie par une brusque augmentation, traduisant une accumulation interne de chaleur provenant de réactions chimiques [23-24]. La première réaction chimique démarre très tôt au cours du processus, environ deux heures après la préparation du béton, et l'augmentation atteint son maximum au bout de 12 heures. C'est durant cette période que se forment la plupart des agrégats entre les différents composés, les premiers entre les plus petits et les derniers entre les plus gros. Après avoir atteint le pic de température, un processus de diffusion est à l'origine du remplissage des pores de la matrice par les produits hydratants.

Finalement, la température diminue progressivement jusqu'à la température ambiante pendant la phase complexe de mise en place structurelle. Si nous analysons la signature non linéaire, nous pouvons noter que, dans la phase « fluide », l'atténuation ultrasonore est trop importante et l'intensité de transmission trop faible pour pouvoir mesurer les effets non linéaires. Cependant, dès que l'activité chimique dans le béton se développe et que le seuil de percolation est atteint (juste avant le pic de température), nous observons une augmentation significative de la non-linéarité de l'onde longitudinale S. Nous prétendons que l'augmentation reflète la friction micromécanique qui est générée entre les liaisons parallèles des particules. Lorsque les connexions deviennent de plus en plus fortes, la non-linéarité transverse diminue en même temps que la température. Le développement de la non-linéarité longitudinale est retardé par rapport à la non-linéarité transverse, et se manifeste en premier durant la phase finale de l'activité chimique (la phase de remplissage des pores capillaires) et durant le premier fluage mécanique (création de microfissures par dessiccation pouvant être activés par des ondes de pression). Dans cette phase, on observe à nouveau une augmentation de la non-linéarité transverse.

À ce moment, nous attribuons cette croissance à la dessiccation mécanique qui modifie significativement l'état de contrainte à l'intérieur de l'échantillon de béton, et qui crée des microfissures avec des ouvertures suffisamment larges pour favoriser le cisaillement non linéaire. Cependant, dès que les fissures sont trop ouvertes, et soumises à de trop grosses contraintes, la non-linéarité ne peut plus être activée par la dynamique acoustique, et l'on s'attend, à long terme, à une décroissance significative de la caractéristique non linéaire. En conclusion, nous prétendons que l'origine de la non-linéarité observée peut être reliée à la modification micromécanique de la composition du béton, et à la structuration mécanique progressive de l'échantillon (longitudinale et transverse). Les trois exemples ci-dessous illustrent la puissance et la sensibilité des techniques NEWS pour le diagnostic de l'endommagement des matériaux complexes et pour le monitoring des modifications structurelles.

Les méthodes NEWS pour la localisation des microdégradations

L'apport des études de laboratoire utilisant les méthodes NEWS a permis de souligner deux principes importants :

- l'observation macroscopique de la signature de la non-linéarité provient des zones de microdégradation et résulte de la relation contrainte-déformation non linéaire micromécanique ;
- les signatures non linéaires sont générées plus efficacement dans les régions où la déformation acoustique dans l'échantillon est le plus important.

Ces deux principes peuvent être utilisés comme la base de nouvelles techniques de visualisation des microdégradations ou des modifications complexes locales des milieux [25-29]. Nous proposons d'aborder,

dans ce qui suit, quelques procédures innovantes pour lesquelles nous distinguerons les approches locales et globales.

Approche d'interrogation globale

Comme approche globale pour le problème de la localisation des microdégradations, nous proposons une méthodologie NEWS qui exploite la signature non linéaire de plusieurs modes consécutifs de résonance de l'échantillon [26]. Pour étudier la non-linéarité d'un mode spécifique, on peut utiliser la technique NRS décrite précédemment [12-13], ou la technique NRS en fréquence plus connue sous le nom de SIMONRUS [9-11]. Après avoir effectué l'acquisition du décalage de la fréquence de résonance, et/ou de la génération d'harmoniques pour de nombreux modes de résonances, et en interprétant ces valeurs vis-à-vis du champ de contrainte et de déformation de ces nombreux modes de résonance, il est possible de procéder à la localisation de la source de non-linéarité. Pour ce faire, il suffit de pondérer la signature de la non-linéarité pour chaque mode par la caractéristique donnant la distribution de puissance des déformations. Cette méthode dénommée MuMoNRUS (pour Multimode Nonlinear Resonance Ultrasound Spectroscopy) exploite la Spectroscopie ultrasonore des résonances multimodes non linéaires.

À titre d'exemple, si on suppose un système simple unidimensionnel ($0 \leq x \leq L$) excité à une extrémité. Si ce système contient une source locale de non-linéarité (microdégradation), nous pouvons examiner les réponses non linéaires des résonances propres du système proches des N fréquences de résonance $k = k(c/2L)$, avec L la longueur du système, et c la célérité des ondes longitudinales. Si on suppose que S_k est la signature non linéaire du mode k , représentant le coefficient de proportionnalité entre le décalage de fréquence de résonance et l'amplitude de déformation du mode k (i.e. $\Delta f_k = S_k e$, avec e l'amplitude maximale de déformation du mode k), la distribution pondérée MuMoNRUS peut alors être écrite par :

$$W(x) = \sum_{k=1}^N S_k \left[\sin\left(k \frac{\pi}{L} x\right) \right]^2$$

Le maximum de la fonction $W(x)$ nous renseigne sur la localisation de la microdégradation. Un exemple numérique permettant le calcul de S_k est illustré en Figure 7 pour un barreau de 250 mm de long comportant une zone dégradée de 5 mm localisée à 80 mm du bord gauche. La zone de microdégradation est modélisée par une relation contrainte-déformation non linéaire et hystérétique. Le graphique de gauche montre la sensibilité S_k des 15 premiers modes de résonance.

La fonction MuMoNRUS $W(x)$ pour les 5 premiers modes et pour l'ensemble complet des 15 modes est présentée à droite. La procédure est extrêmement efficace pour la détermination de la position du défaut, mis à part le fait que, pour des raisons de symétrie des modes par rapport

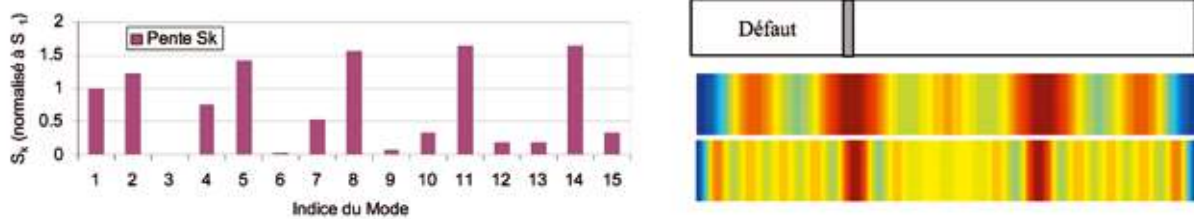


Fig. 7: Exemple d'une méthodologie globale de localisation, utilisant la fonction MuMoNRUS $W(x)$ d'un barreau 1D avec une zone de défaut localisée, soumis à une excitation longitudinale.
Gauche : signature non linéaire Sk indiquant la sensibilité de chaque mode de résonance longitudinal vis-à-vis de la présence du défaut indiqué sur la figure de droite.
Droite (du haut en bas) : position du défaut dans le barreau; fonction MuMoNRUS $W(x)$ prenant en compte les 5 premiers modes; fonction MuMoNRUS $W(x)$ prenant en compte les 15 premiers modes

au centre du barreau, un défaut virtuel est également détecté à la position miroir. Cette symétrie peut être brisée seulement en changeant la configuration expérimentale, par exemple en fixant l'un des bouts du barreau. Comme on pouvait s'y attendre, la prise en compte d'une plus grande quantité d'information (les modes) produit une meilleure localisation.

Cette méthode de localisation peut être aisément étendue au cas tridimensionnel en tenant compte des diverses propriétés non linéaires des différents modes (incluant les modes de torsion et de flexion), et en pondérant la distribution avec le champ de déformation correspondant.

Approche d'interrogation locale

Dans le contexte d'une localisation plus fine des microdégradations, nous décrivons ici les nouveaux résultats dans le développement d'une adaptation non linéaire de la technique de renversement temporel acoustique [28-29].

Le principe de base du retournement temporel (RT) traditionnel est le suivant [31-33]: si un champ d'onde acoustique est complètement déterminé en fonction du temps sur les frontières d'un domaine fermé, il est possible de reconstruire le passé de ce champ en chaque point de ce domaine en renvoyant les signaux dans le domaine, après les avoir préalablement retournés temporellement. C'est la conséquence de l'invariance de l'équation des ondes par rapport au temps. En d'autres termes, le processus RT est tel que, les ondes enregistrées aux frontières du domaine en fonction du temps, rétrofocalisent en temps et en espace sur les sources acoustiques, ou sur les éléments diffractants jouant de ce fait le rôle de source. L'un des avantages du processus RT est de localiser, à l'aide d'un post-traitement, ces régions importantes de diffraction (cavités, interfaces avec contrastes d'impédances, etc.), qui sont cachées dans le domaine.

Pour de plus petits diffuseurs tels que les zones de dégradation, les liaisons faibles ou les petits défauts, la sensibilité du processus TR classique atteint les limites des techniques acoustiques classiques. La principale cause de cette limitation provient du fait que le RT classique s'appuie sur une approche linéaire du processus, qu'il relie les

modifications de la propagation d'onde aux effets linéaires de la diffraction des inhomogénéités dans le matériau, comme la réflexion, la réfraction, et les conversions de mode. Notre expérience dans les techniques NEWS a montré que les microdégradations agissent sur les ondes acoustiques par un processus non linéaire, générant principalement des harmoniques, ou d'autres effets d'intermodulation, plutôt que des effets linéaires. Ainsi, selon notre approche, la procédure RT doit être améliorée de sorte que l'essentiel du traitement du signal soit concentré sur les différentes signatures non linéaires produites à l'occasion de la propagation des ondes dans le domaine. Une des solutions consiste à uniquement sélectionner l'énergie/information correspondant à la partie non linéaire de la réponse du domaine et de la retourner dans ce même domaine à l'aide de la procédure RT classique.

En conséquence, le signal rétro-propagé sera amené à se focaliser à la source de non-linéarité, c'est-à-dire dans la zone de dégradation où les harmoniques ont été créés, alors que les « diffuseurs linéaires » seront insensibles à cette excitation, qui se trouve être extrêmement complexe.

Le concept consistant à favoriser la symbiose entre les avantages des méthodes NEWS et du processus RT s'avère alors extrêmement prometteur et permet d'envisager un large spectre d'application en imagerie ultrasonore, particulièrement en contrôle non destructif (CND), et a désormais été l'objet de nombreux travaux et publications depuis les cinq dernières années, à la fois en terme de simulation, ou d'expérimentation. L'opération RT peut être effectuée dans un premier temps afin de rétrofocaliser de l'énergie dans une zone limitée afin de solliciter le comportement non linéaire par des déformations de grandes amplitudes. On parle alors de TR-NEWS dans la mesure où RT constitue un prétraitement à l'analyse NEWS. De la même manière, l'analyse NEWS peut être réalisée en prétraitement afin de solliciter les sources locales de non-linéarité qui seront ensuite extraites par un processus RT. On parle ainsi de NEWS-TR dans la mesure où le processus RT effectue le post-traitement. Les deux méthodes peuvent être implémentées dans un système à balayage pour une exploration adéquate localisée des microdégradations. Nous donnons ci-dessous quelques exemples de ces deux approches.

La non-linéarité révélée par le renversement temporel : NEWS-TR

La différence entre le RT classique et le RT non linéaire est illustrée en Figure 8 qui présente les résultats d'une simulation numérique basée sur une méthode multi-échelles de propagation d'onde dans un milieu non linéaire [32]. Nous considérons un objet 2D de taille 200 mm (L) par 50 mm (B), avec une source étendue localisée en (L/4, B/2), et une zone de microdégradation modélisant le défaut de 10 par 10 mm situées au centre du domaine. Le défaut est décrit par un modèle mésoscopique dans lequel chaque cellule possède une loi de comportement contrainte-déformation non linéaire hystérétique.

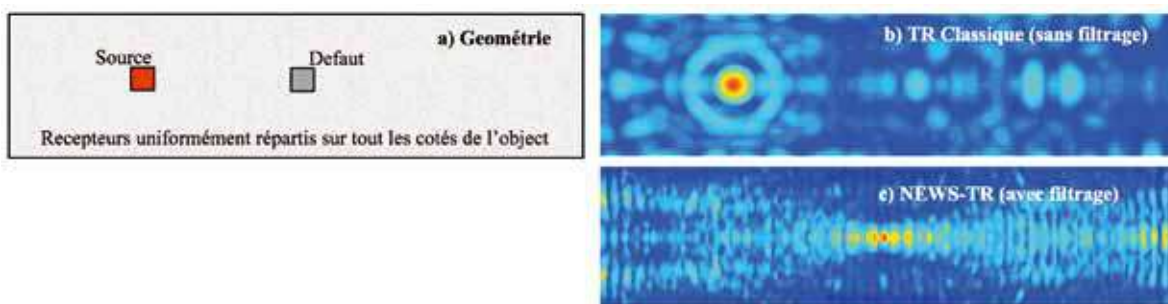


Fig. 8 : a : Domaine de simulation 2D comportant la source initiale et la zone de dégradation (le défaut).
b : Maximum de l'amplitude du signal RT obtenu, dans le cas linéaire (en haut), mettant en évidence la rétrofocalisation sur la source acoustique ;
c : dans le cas non linéaire mettant en évidence la rétrofocalisation sur la source de non-linéarité (le défaut)

La source d'excitation acoustique est un train d'onde de 5 cycles, d'enveloppe gaussienne, et sinusoïdal de fréquence 250 kHz. Si tous les signaux enregistrés au bord du domaine de l'objet sont retournés et renvoyés dans l'objet, de la position où ils ont été enregistrés (ce qui arrive en dernier est renvoyé en premier), on observe une rétrofocalisation sur la source initiale. C'est le principe RT classique. La figure 8b illustre cette propriété pour laquelle nous avons porté la distribution, pour chaque point du domaine, des maximums vitesses particulières pendant la durée nécessaire à la propagation de l'ensemble des signaux RT réémis. Maintenant, si nous filtrons les signaux directs en ne conservant que les composantes supérieures à 400 kHz (passe haut) créées par effets non linéaires, l'émission de ces composantes retournées par un processus RT analogue nous fera apparaître une rétrofocalisation constructive de l'énergie sur la zone dégradée qui justement se trouve être la source de non-linéarité et de génération des harmoniques (Figure 8c).

Une procédure de filtrage alternative a été utilisée au cours de la méthodologie NEWS-TR et est basée sur le fait que l'inversion de phase d'une excitation de type pulse (décalage de 180°) générera une réponse également inversée lorsque le milieu est linéaire. Ce n'est toutefois pas le cas lorsque le milieu est un matériau non linéaire (ou dégradé) et qu'il génère des harmoniques. Nous pouvons tirer profit de cette propriété, relevant également d'une propriété d'invariance, additionner les deux réponses successives provenant de deux excitations déphasées de 180° (positive et négative) et renvoyer, par les récepteurs la somme retournée. Cette opération est appelée filtrage par PC-PS (pour « Phase Coded Pulse Sequence »). La somme permet de s'assurer que toute l'information relative aux effets linéaires est filtrée avant d'être renvoyée. En

procédant de la sorte, seule l'information relative aux non-linéarités issues de la source localisée sera présente et rétropropagée dans le milieu. De plus, l'énergie filtrée sera aussi focalisée sur la source, c'est-à-dire la source de microdégradations. D'autres procédures de filtrage peuvent être basées sur des filtres passe bande autour des composantes « somme » et « différence » du produit d'intermodulation ($f_2 \pm f_1$) générées à l'issue de l'excitation d'un échantillon par un signal comportant deux fréquences fondamentales f_1 et f_2 .

La méthodologie NEWS-TR utilisant le filtrage PC-PS a été vérifiée expérimentalement sur un échantillon de verre PMMA utilisé dans les fenêtres des cockpits.

L'échantillon parallélépipédique contenant deux fissures générées par laser, a été excité en utilisant deux trains d'ondes de fréquence centrale 140 kHz et déphasés l'un de l'autre de 180°. Les deux réponses acoustiques ont été enregistrées à la surface au même endroit. Les deux réponses additionnées ont été retournées et renvoyées par le même transducteur (RT monovoie). Un vibromètre laser a été utilisé pour mesurer les caractéristiques du signal de vibration surfacique le long d'une ligne traversant la région du défaut. Finalement, en utilisant une reconstruction tomographique standard (triangulation), les signaux ont été utilisés pour imaginer une section 2D du parallélépipède dans la direction de balayage du laser. La Figure 9 présente la répartition de l'énergie pour un temps donné de la reconstruction. On observe une zone de focalisation localisée à une distance inférieure à une demie longueur d'onde du centre du défaut. Ce résultat n'est pas parfait mais, en constatant qu'il est réalisé à l'aide d'un RT monovoie, et qu'il est réalisé seulement à partir d'une partie de l'information, il reste très prometteur.



Fig. 9 : Résultats expérimentaux de la rétrofocalisation sur une zone dégradée d'un échantillon de verre PMMA, utilisant la procédure PC-PS de filtrage par inversion de pulse

La non-linéarité sollicitée par renversement temporel : TR-NEWS

Les exemples ci-dessus montrent que le filtrage entre l'acquisition et le processus RT des signaux présente un intérêt pour la localisation des diffuseurs non linéaires présents dans les milieux. Lorsqu'il existe un intérêt pour la localisation d'un défaut près de la surface d'un objet, il est possible de suivre une approche non linéaire RT légèrement différente. Une équipe américaine du groupe « Élasticité non linéaire des matériaux » du Laboratoire national de Los Alamos et du « Stevens Institute of Technology » a récemment suggéré une amélioration significative de la procédure RT non linéaire pour sonder les défauts surfaciques en utilisant l'analyse NEWS comme post-traitement réalisé après le processus RT [27-28]. La première étape de la procédure ressemble au RT classique appliqué aux ondes élastiques : en mesurant, ponctuellement à l'aide d'un vibromètre laser, la réponse de signaux provenant d'une ou plusieurs sources, en retournant le signal reçu et en le renvoyant en utilisant la source initiale, un très fort niveau d'énergie peut être obtenu à la surface par focalisation locale en temps et en espace. Dans un second temps, le contenu non linéaire du signal rétrofocalisé est analysé : si un diffuseur non linéaire est localisé dans la zone focale du laser, le contenu en harmonique sera significatif. Si, au contraire, la rétrofocalisation est effectuée dans une zone exempte de défauts, aucune signature non linéaire sera mesurée. En répétant cette étape par balayage de la surface de l'objet, il est possible d'évaluer l'étendue de la zone de dégradation surfacique en réalisant une image paramétrique exploitant les signatures NEWS par post-traitement. En généralisant l'analyse harmonique du signal rétrofocalisé, on peut utiliser un filtrage PC-PS, une analyse par modulation de phase, solliciter l'intermodulation de deux fréquences et étudier le niveau énergétique de ce spectre d'intermodulation comme cela a été montré expérimentalement dans les fluides saturés en microbulles [30].

Nous finirons cet article en donnant deux exemples illustrant quelques extensions de cette méthodologie. L'objet étudié est une structure d'aile d'avion en aluminium, de 2 mm d'épaisseur comportant des raidisseurs fixés

par rivet. La surface explorée est une petite zone proche du rivet à l'origine duquel une petite fissure de 2 mm de long a été créée par un test de fatigue cyclique.

Au cours de la première expérience, inspirée des travaux de Ulrich et al [29], l'excitation du milieu s'est faite à l'aide d'un signal bi-fréquence. L'analyse consiste en l'étude des pics d'intermodulation présents dans le signal retrofocalisé en balayant point par point une ligne perpendiculaire à la fissure et traversant celui-ci. En terme d'excitation, nous avons utilisé de simples pastilles de PZT collées à une cavité réverbérante, elle-même collée sur la structure. Dans un premier temps, un signal de fréquence $f_1 = 1$ MHz est généré, et la réponse est enregistrée avec le vibromètre laser. Ensuite un deuxième signal de fréquence $f_2 = 200$ kHz est généré à partir d'une deuxième source ; la réponse est également enregistrée avec le laser. Les deux signaux sont alors retournés et réémis de leurs sources respectives de façon parfaitement synchronisée. En fait, le système réalise deux fois de suite un RT monovoie, qui, en raison de la synchronisation, permet de réaliser des moyennages et d'augmenter le rapport signal sur bruit. De ce fait, le principe RT permet aux deux signaux d'arriver en même temps au point d'analyse pour lequel le laser mesure les vibrations absolues. L'intermodulation du signal RT focalisé en temps est alors analysé en terme d'amplitude des composantes « différence » $A(f_1 - f_2)$ et somme $A(f_1 + f_2)$ du spectre. Cette procédure est répétée pour chaque point de la ligne de balayage. Dans une zone intacte, aucune modulation n'est attendue, alors que dans une zone dégradée, les niveaux d'intermodulation peuvent être importants. La signature non linéaire contenue dans les termes somme et différence est présentée en figure 10, en fonction de la distance à la fissure pour une ligne la traversant. À l'endroit de la fissure, la signature non linéaire est manifestement bien plus élevée qu'ailleurs, et ce avec un facteur de contraste de dix.

Pour la deuxième expérience réalisée sur la même structure, une alternative consiste à analyser, point par point, les variations d'amplitude du signal RT de l'échantillon soumis à une vibration basse fréquence [8]. La vibration basse fréquence (BF) est réglée sur le premier

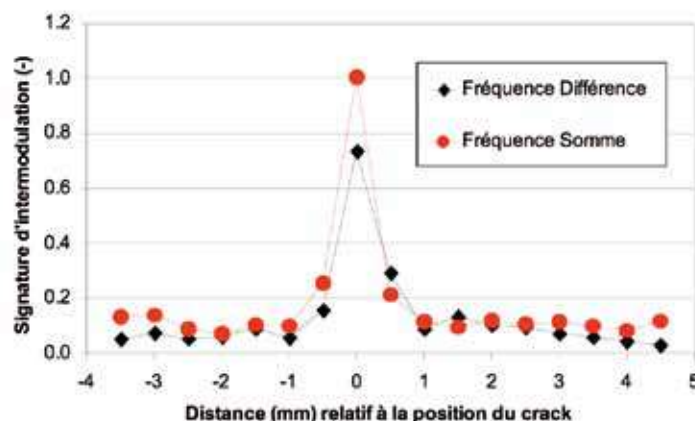


Fig. 10: Résultats d'une expérience RT, utilisant une analyse des fréquences d'intermodulation, pour une aile d'avion (à gauche) comportant une fissure localisée proche d'un rivet. Évolution (à droite) point par point du niveau d'intermodulation de fréquence dans le signal RT rétrofocalisé, en fonction de la distance de la fissure. Les fréquences appliquées sont 200 kHz and 1 MHz. Les signatures de l'intermodulation correspondent aux fréquences somme et différence dans le signal RT de rétrofocalisation

mode de flexion de la structure (60 Hz), et est supposée activer la fissure. Un transducteur génère le signal haute fréquence à 1 MHz, et la réponse est également enregistrée par vibromètre laser possédant une fréquence de coupure basse supprimant le 60 Hz. Le signal est alors retourné et renvoyé par le transducteur (RT monovoie). En utilisant une synchronisation adaptée, le signal RT est enregistré et moyenné pour différentes phases de la vibration basse fréquence. La figure 11 illustre une variation caractéristique, à une position donnée, de l'amplitude du signal RT durant un cycle de la BF à 60 Hz. La modulation d'amplitude obtenue point par point sur une ligne traversant la fissure est présentée en Figure 11b. De la même manière, nous observons une signature évidente de position de la fissure.

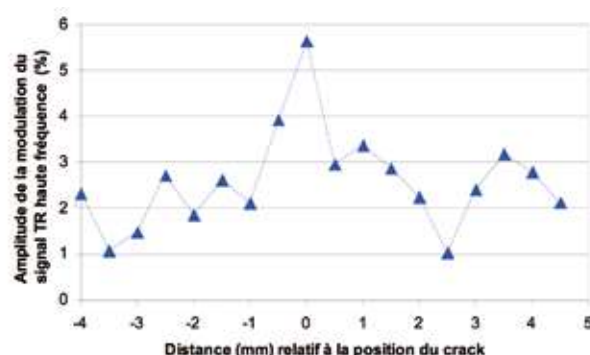
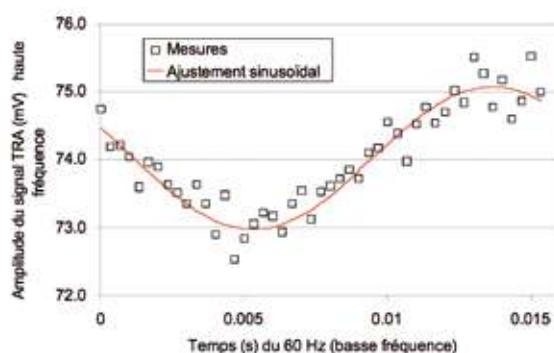


Fig. 11 : Résultats d'une expérience RT, utilisant une analyse de la modulation d'amplitude basse pour une aile d'avion comportant une fissure localisée proche d'un rivet. a) modulation d'amplitude basse fréquence (60 Hz) du signal RT rétrofocalisé pour une position fixe proche de la fissure. b) Évolution point par point de l'amplitude de la modulation BF dans le signal RT rétrofocalisé, en fonction de la distance relative à la fissure

Conclusion

De récentes études ont prouvé que les techniques innovantes de spectroscopie d'ondes élastiques non linéaires sont bien plus performantes que les techniques acoustiques linéaires classiques pour le diagnostic précurseur du processus de dégradation de divers matériaux, et permet ainsi d'envisager une forte avancée dans le contrôle non destructif de haute qualité. Ces mêmes méthodes permettent également le suivi de l'évolution des propriétés microstructurelles des processus de solidification. L'un des grands challenges est d'exploiter et d'étendre les résultats apportés par les méthodes NEWS pour la localisation et l'imagerie des défauts. Cela se fera par l'utilisation d'analyse multimodes ou par la généralisation des méthodes de retournement temporel acoustique aux processus de propagation acoustique non linéaire. De nombreuses variantes de cette méthodologie ont été testées, en envisageant les méthodes NEWS comme pré ou post-traitement de l'information. En l'état actuel des connaissances, nous pensons que la symbiose des méthodes NEWS et des méthodes utilisant les symétries d'invariance par retournement temporel augmentera considérablement les performances de ces deux méthodes RT et NEWS en terme de diagnostic multi-échelles : un plus un est supérieur à deux.

Remerciements

Les auteurs tiennent à indiquer que cette étude s'est faite avec le soutien de la Fondation flamande de la recherche scientifique (G.0206.02, G.0257.02, and G.0554.06), et de l'Union européenne dans le cadre du projet européen du FP6 AERONEWS (AST-CT-2003-502927; <http://www.kuleuven-kortrijk.be/aeronews>). Un grand remerciement à nos collègues, Pierre-Yves Le Bas, Sigfried Vanaverbeke, Olivier Bou Matar, Thomas Goursole, Samuel Callé, Paul Johnson, Alexander Sutin, TJ Ulrich, James TenCate et Robert Guyer pour leurs travaux associés et les nombreuses discussions relatives à ce sujet passionnant.

Références bibliographiques

- [1] Guyer R.A. and Johnson P.A., Phys. Today 52, 30-35 (1999).
- [2] Ostrovsky L.A., Johnson P.A., Rivista Del Nuovo Cimento 24 (7): 1-46 2001
- [3] Nazarov V.E., Radostin A.V., Ostrovskii L.A., and Soustova I.A., Acoust. Phys. 49, 344, 2003.
- [4] Morris WL, Buck O, Inman RV (1979) J Appl Phys 50 (11): 6737-6741
- [5] Meegan G.D., Johnson P.A., Guyer R.A., McCall K.R., J. Acoust. Soc. Am. 94 (6): 3387-3391, 1993
- [6] Antonets VA, Donskoy DM, Sutin AM (1986) Mech of Composites Materials 15: 934-937
- [7] Van Den Abeele K., P.A. Johnson, and A.M. Sutin, Res. Nondestruct. Eval. 12/1, 17-30 (2000)
- [8] Zaitsev V, Nazarov V, Gusev V, Castagnede B, NDT & E International 39 (3): 184-194 APR 2006
- [9] Johnson P.A., Zinsner B. and Rasolofosaon P.N.J., J. Geophys. Res 101, 11553-11564 (1996)
- [10] V. Nazarov, A. Sutin, J. Acoust. Soc. Am., 102 (6), 3349 – 3354 (1997)
- [11] Van Den Abeele K., Carmeliet J., TenCate J.A. and Johnson P.A., Res. Nondestruct. Eval. 12/1, 31-42 (2000)
- [12] Van Den Abeele K., Campos-Pozuelo C., Gallego-Juarez J., Windels F., Bollen B., Proc. Forum Acusticum 2002, Sevilla 2002
- [13] Van Den Abeele, T. Katkowski, and C. Mattei, Proc. 12th Int. Congr. Sound and Vibration, Lisbon, paper 801, 2005
- [14] TenCate, J.A., and T. J. Shankland, Geophys. Res. Lett. 23 (21), 3019-3022 (1996)
- [15] Johnson P.A. and Sutin A., J. Acoust. Soc. Am. 117 (1), 124-130 (2005)

- [16] Vila M., Vander Meulen, Dos Santos, Haumesser, Bou Matar, Ultrasonics 42, 1061 (2004);
- [17] Dos Santos S., Vander Meulen S., Haumesser L., Vila M., Fortineau J., and Bou Matar O., « Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Measurements of the Nonlinear Acoustic Parameter: Applications in Quenched Metallic Samples », Actes du Congrès, Congrès Français d'Acoustique SFA-DAGA, Strasbourg, p. 723 (2004)
- [18] Tournat V, Gusev VE, Castagnede B, Physical Review E 70 (5): Art. No. 056603 Part 2 NOV 2004
- [19] Guyer R.A., K. R. McCall, and G. N. Boitnott, Phys. Rev. Let., 74, 3491-3494 (1995)
- [20] Van Den Abeele K. and De Visscher J., Cement and Concrete Research 30/9, 1453-1464 (2000)
- [21] Van Den Abeele K., Van De Velde K., and Carmeliet J., Polymer Composites 22 (4), 555-567 (2001)
- [22] Nagy P.B., Ultrasonics 36, 375 (1998)
- [23] Sayers C.M. and A. Dahlin, Adv. Cement Based Mat., 1 (1), 12-21 (1993)
- [24] Bonnet D. and K. El Kouhen, Etude de la micro-fissuration des Bétons par émission acoustique, rapport de maîtrise de physique, Lab. LED Université Paris 7, -Lab. Dir. Scient. Bouygues (1998)
- [25] Desadeleer W., Van Den Abeele W. and Wevers M., Proc. 12th Int. Congr. Sound and Vibration, Lisbon, paper 805, 2005
- [26] Kazakov V.V., A. Sutin and P.A. Johnson, Appl Phys Lett 81 (2002) (4), pp. 646 – 648
- [27] Van Den Abeele K. and F. Windels, in The universality of nonclassical nonlinearity with applications to NDE and Ultrasonics, Chapter 23, accepted, in press
- [28] Sutin A., P. Johnson and J. TenCate, Proc. 5th WCU, 121-124, 2003
- [29] Ulrich T.J., P.A. Johnson and A. Sutin, J. Acoust. Soc. Am., 119 (3): 1514-1518, 2006.
- [30] Dos Santos S., Choi B.K., Sutin A. et Sarvazyan A., Proc of the french Congress of Acoustics, pp. 359-362, 2006
- [31] Fink M., Sci. Am. 281, 91-113, 1999
- [32] Prada C., E. Kerbrat, D. Cassereua, M. Fink, Inverse Problems 18, 1761-1773, 2002
- [33] Montaldo G., M. Tanter, M. Fink, J. Acoust. Soc. Am. 115 (2), pp776-784, 2004
- [34] Van Den Abeele K., Schubert F., Aleshin V., Windels F., and Carmeliet J., Ultrasonics 42, 1017, 2004