

# APPLICATION DE L'ACOUSTIQUE NON LINEAIRE À LA CARACTERISATION NON DESTRUCTIVE DU BÉTON *APPLYING NONLINEAR ACOUSTICS TO NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF CONCRETE*

C. Payan, V. Garnier et J. Moysan  
LCND, Université de la Méditerranée,  
IUT Aix-Provence, Avenue Gaston Berger, 13625 Aix-en-Provence Cedex  
Tél. 04 42 93 90 55 – Fax. 04 42 93 90 84  
E-mail : cedric.payan@univmed.fr

## Résumé

Le béton, matériau fortement hétérogène et microfissuré par nature exhibe un comportement élastique non linéaire dit "non classique", se caractérisant par des phénomènes de dynamique lente et rapide. La forte sensibilité des indicateurs non linéaires à l'endommagement mécanique ou thermique du béton est prometteuse en vue d'inspection de structures en béton in situ. Dans ce cadre, il est nécessaire de connaître l'influence de certains paramètres tels que la porosité ou la teneur eau sur la réponse non linéaire du béton et de proposer une approche expérimentale applicable in situ. Nous exposons ainsi une approche originale, au fort potentiel in situ, fondée sur le principe d'interaction d'un impact mécanique (donc simple à mettre en œuvre) avec une onde ultrasonore monochromatique. Nous l'appliquons lors une campagne d'essais sur des éprouvettes paramétrées. Nous employons les données récoltées dans un modèle, nous permettant d'inverser la fonction de dépendance entre la teneur en eau et la réponse non linéaire du béton.

## Abstract

*Naturally heterogeneous and microcracked material, concrete exhibits a strong nonlinear elastic response, feature of « non classical » materials, characterized by slow and fast dynamics phenomena. The great sensitivity of the associated nonlinear parameter to mechanical or thermal damage is a promising way in view of concrete structures on site inspections. In this framework, it is necessary to quantify the influence of some parameters such as porosity or water saturation. In addition, we have to develop a method easily transposable on site. So we describe in this paper an experimental setup with a high potential for on site inspection. It is based on the nonlinear elastic wave interaction method and makes use of a mechanical impact to generating high amplitude low frequency waves. We apply this in laboratory experiments with calibrated samples. Then, we use the collected results by optimizing a model allowing to quantitatively describing the effect of water saturation on the nonlinear response of concrete.*

## INTRODUCTION

Les techniques ultrasonores non linéaires de caractérisations non destructives sont une voie prometteuse pour le contrôle d'ouvrage in situ. En effet, les techniques linéaires classiques (vitesse, atténuation) ont une sensibilité limitée dont les variations ne deviennent significatives que tard dans le processus d'évolution de la microstructure. Il existe diverses techniques d'estimation des indicateurs de non linéarité telles que la génération d'harmonique, l'interaction d'ondes ou le suivi de la fréquence de résonance. Ces techniques ont montré sur le béton un fort potentiel pour le suivi d'endommagement thermique [1] ou

mécanique [2] et pour le suivi de la prise [3]. La méthode d'interaction d'onde a un fort potentiel pour l'inspection in situ avec une basse fréquence qui se propage dans toute la structure. De plus cette basse fréquence peut être générée mécaniquement par un impact ou mieux, par les sollicitations naturelles de la structure. Nous allons tout d'abord étudier dans cette première partie la méthode d'interaction d'ondes non linéaire et ses possibles transpositions sur site.

## INTERACTION D'ONDES NON LINEAIRES

Le béton, milieu fortement hétérogène et microfissuré par nature, exhibe un comportement élastique non linéaire qui peut être physiquement expliqué par la théorie de Landau et Lifschitz [4] et à différentes échelles par les phénomènes de dislocation, de rupture et recouvrement de cohésion aux joints de grains, de porosité, d'ouverture et fermeture de microfissures, etc. Ainsi, ces matériaux présentent des phénomènes d'hystérésis dans leur loi de comportement, des phénomènes de dynamique lente, et également une mémoire discrète [5-6]. On peut montrer que la réponse non linéaire hystérétique domine largement la réponse non linéaire globale dans les matériaux fortement hétérogènes tel le béton [7]. Ainsi, ce comportement peut être phénoménologiquement décrit par un module élastique non linéaire [8]:

$$M = M_0[1 - \alpha(\Delta\varepsilon + \text{sign}(\dot{\varepsilon})\varepsilon)], \quad (1)$$

où  $M_0$  est le module élastique linéaire,  $\alpha$  le paramètre non linéaire,  $\Delta\varepsilon$  l'amplitude maximale de l'onde et la fonction  $\text{sign}$  vaut +1 si le taux de déformation est positif et -1 s'il est négatif.

En supposant deux sources harmoniques du type  $S_1(t)=\Delta\varepsilon_1\cos(\omega_1t)$  et  $S_2(t)=\Delta\varepsilon_2\cos(\omega_2t)$ , si  $\omega_2 \gg \omega_1$ , l'onde haute fréquence se trouve modulée en amplitude par l'onde basse fréquence. Le spectre d'amplitude résultant (Fig.1) fournit la possibilité d'extraire le paramètre non linéaire  $\alpha$  [9] par le rapport des amplitudes des bandes latérales avec les fondamentales :

$$\alpha \propto \frac{A(\omega_2 \pm 2\omega_1)}{A(\omega_1)A(\omega_2)}. \quad (2)$$

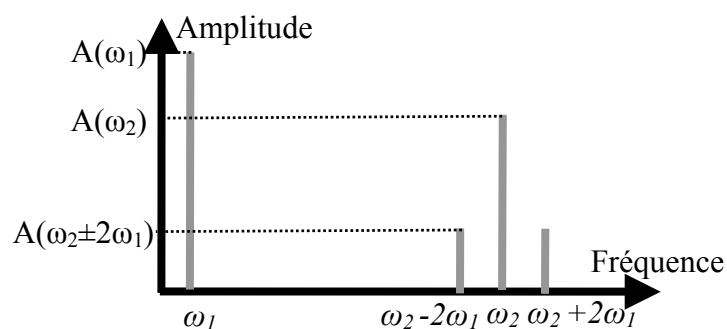


Fig.1 : Spectre d'amplitude

Cette méthode est valide dans le cas de signaux monochromatique et expérimentalement, la basse fréquence doit être suffisamment énergétique pour exciter les phénomènes non linéaires. En gardant à l'esprit que notre but est l'inspection in situ, la génération d'ondes de fortes amplitudes sur site semble compromise. Ainsi nous employons un dispositif simple : Un impact mécanique qui permet de générer des ondes suffisamment énergétiques. Cependant, cet impact excite tous les modes de résonances de la structure et le spectre d'amplitude résultant est complexe, rendant impossible l'emploi de l'équation (2). Nous

décrivons dans la partie expérimentale comment extraire le paramètre non linéaire des signaux enregistrés.

L'endommagement a une grande influence sur le paramètre non linéaire dans le béton [1,2]. Mais cette sensibilité peut également provenir de paramètres environnementaux ou structuraux tels la saturation en eau ou la porosité. De manière à découpler ces facteurs, nous décrivons dans la section suivante un modèle récent permettant de quantifier l'influence de la teneur en eau et de la porosité sur la réponse non linéaire du béton.

## MODELISATION

Le modèle le plus employé jusqu'à présent traduit les phénomènes de dynamique rapide mais ne traduit pas ceux de dynamique lente. La dynamique rapide est caractérisée par une chute des propriétés élastiques en soumettant une éprouvette à une onde de forte amplitude. Cela se traduit par une chute linéaire de la fréquence de résonance de l'échantillon en fonction de l'amplitude d'excitation. La dynamique lente caractérise le temps que met le matériau à recouvrer ses propriétés élastiques après une forte perturbation.

Le modèle présenté ici [10], basé sur les principes de la thermodynamique, traduit les phénomènes de dynamique lente et rapide en décrivant la dépendance de la concentration de défauts en fonction de la température et de la teneur en eau dans module élastique :

$$M(c, \varepsilon, t) = M_0 \left[ 1 - f(s, T) \left( 1 + \frac{\delta c(\varepsilon, t)}{c_0} \right) \right], \quad (3)$$

où  $f$  est une fonction de la température  $T$  et de l'état de saturation ( $0 < s < 1$ ),  $c$  la concentration de défaut instantanée et  $c_0$  la concentration initiale. La concentration de défaut évolue en fonction de l'excitation suivant une équation cinétique (Eq. 4) traduisant l'interaction de deux sous systèmes élastiques. Un sous système rapide (vibrations longitudinales : dynamique rapide) et un sous système lent (cohésion des défauts : dynamique lente).

$$\frac{d(\delta c)}{dt} = -[\tau \theta (\delta c - \delta c_\sigma) + \lambda \theta (\delta c_\sigma - \delta c)] (\delta c - \delta c_\sigma), \quad (4)$$

où  $\tau$  est le taux de restauration et  $\lambda$  le taux de création et de défauts,  $c_\sigma$  est la concentration de défaut à l'équilibre pour une contrainte donnée,  $\theta$  la fonction de Heavyside. La résolution à chaque instant  $t$  de l'équation (4) nous permet d'évaluer le module élastique instantané (Eq.3). Sous sollicitation alternative (fréquence  $\omega$  et amplitude  $\Delta \varepsilon$ ), la concentration de défaut associée à la sollicitation peut s'écrire au premier ordre :

$$\delta c_\sigma = \frac{\nu c_0 M_0}{kT} \Delta \varepsilon \sin(\omega t), \quad (5)$$

où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  la température et  $\nu$  le volume représentatif d'un défaut. Les solutions numériques de l'équation (4) montrent une stabilité des solutions lorsque le système est soumis à des oscillations (en régime établi) lorsqu'il existe une forte disparité entre le taux de restauration et celui de création de défaut ( $\lambda \gg \tau$ ). C'est le cas dans les matériaux tels que le béton.

Ce modèle est capable de décrire les phénomènes non classiques observés jusqu'alors dans le béton ou les géo-matériaux en général. Il retrace très précisément les phénomènes d'hystérésis dans les courbes de résonances, les phénomènes de mémoire discrète, la

dynamique lente, etc [10]. Dans cet article nous nous limitons à étudier l'influence de la teneur en eau sur le paramètre non linéaire mesuré par la méthode d'interaction (dynamique rapide). Les expériences sont réalisées par la méthode d'interaction d'ondes que nous avons identifiée comme la plus apte à être transposée in situ. Nous pouvons démontrer [9] la forte corrélation entre l'estimation du paramètre non linéaire obtenu par modulation et celui obtenu par suivi de la fréquence de résonance en augmentant l'amplitude d'excitation. Ainsi, en considérant les conditions de régime établi et en négligeant l'influence de la fonction  $f$  (Eq.3), le module élastique peut être écrit :

$$M = M_0 \left[ 1 - \frac{\nu M_0}{kT} \Delta \varepsilon \right]. \quad (6)$$

Nous montrons ici l'analogie entre le présent modèle [10] et le modèle phénoménologique employé jusqu'alors [8]. Le paramètre non linéaire  $\alpha$  mesuré peut alors s'écrire :

$$\alpha = \frac{\nu M_0}{kT}. \quad (7)$$

Ainsi, en mesurant le paramètre non linéaire pour divers états de saturation, nous pourront inverser la fonction  $f$  (Eq.3). Nous décrivons dans la section suivante les expériences menées ainsi que les résultats obtenus.

## EXPERIENCES

De manière à étudier l'influence de la porosité et de la teneur en eau, une batterie d'expérience est conduite sur 5 séries d'éprouvettes en béton (50x25x12 cm<sup>3</sup>), chacune ayant un rapport eau sur ciment (e/c) différent. Nous disposons de 6 éprouvettes identiques par série. Dans chaque série, la totalité des éprouvettes est conditionnée à 0 puis à 100% de saturation en eau. Seule une partie des éprouvettes de chaque série est conditionnée à 40, 60 et 80% de saturation.

Le protocole expérimental est le suivant (Fig. 2): une onde sinusoïdale continue (250 kHz) est transmise sur l'épaisseur de l'échantillon, tandis que la basse fréquence est générée par une bille lâchée à une hauteur constante en un même point. La basse fréquence est enregistrée par un capteur basse fréquence et la haute par transducteur haute fréquence large bande (Panametrics V1012). La synchronisation est faite sur le capteur basse fréquence.

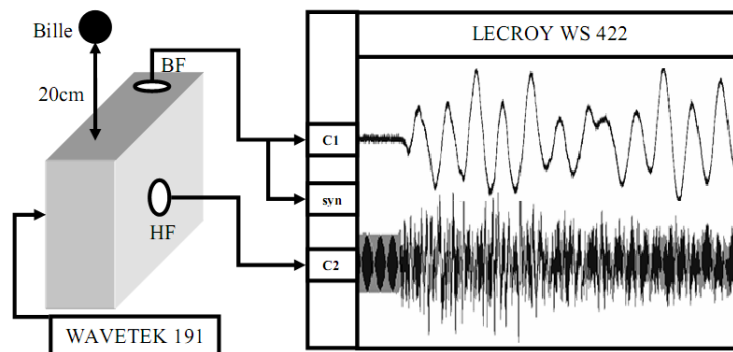


Fig.2 : Protocole expérimental

Un spectre d'amplitude typique est présenté Fig. 3. La complexité des modes de résonances rend impossible l'emploi de l'équation (2) pour estimer le paramètre non linéaire. Van Den

Abeele et al. [9] montrent que le paramètre  $\alpha$  peut être obtenu par cette méthode en utilisant non pas les rapports d'amplitudes (Eq.2) mais les rapports d'énergies :

$$\alpha \propto \frac{W_{BL}}{W_{BF}W_{HF}}, \quad (8)$$

où  $W_{BL}$ ,  $W_{BF}$ ,  $W_{HF}$  sont respectivement les énergies contenues dans l'ensemble des bandes spectrales latérales, dans la basse fréquence et dans la haute fréquence.

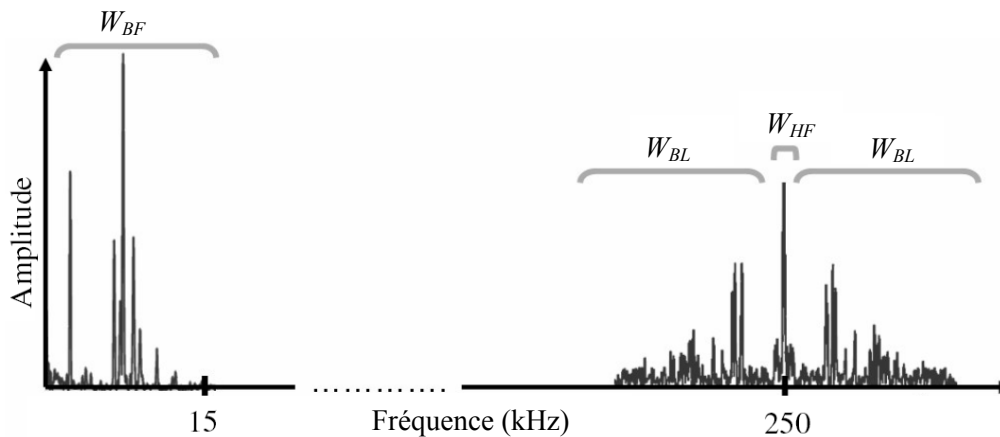


Fig.3 : Spectre typique obtenu lors des expériences.

Ces énergies sont estimées par une analyse temps fréquence [9]. Les signaux enregistrés ont une longueur de 200 000 points avec une fréquence d'échantillonnage de 10 MHz. Nous employons une fenêtre de Blackman glissante de 8 000 points avec un pas temporel de 3 000 points. De manière à augmenter la résolution fréquentielle, le spectre de puissance est obtenu par une transformée de type chipZ (voir [2] pour plus de détails) au lieu d'une FFT standard. Le spectre de la haute fréquence est normalisé par rapport à la composante à 250 kHz. L'énergie des bandes latérales est calculée dans chaque fenêtre temporelle. Nous traçons ensuite  $W_{BL}$  en fonction de  $W_{BF}$ . La pente de la régression linéaire de l'ensemble de ces points nous donne le paramètre non linéaire  $\alpha$  (partie droite de Fig.4). L'analyse est arrêtée lorsque la basse fréquence disparaît. Il est important de noter que le paramètre non linéaire ainsi obtenu est une valeur relative mais reste tout de même comparable avec ceux obtenus sur les autres éprouvettes de la même manière.

Nous présentons Fig.4 cette méthode appliquée à une même éprouvette conditionnée à 0% (Fig.4a), 40% (Fig.4b) et 100% (Fig.4c) de saturation en eau. Les images temps fréquence présentée sont obtenues avec un pas temporel réduit à 300 points.

L'ensemble des éprouvettes ayant été saturées à 0 puis 100% de saturation en eau, nous étudions dans un premier temps l'influence de la porosité (rapport  $e/c$ ) sur le paramètre non linéaire, pour ces valeurs extrêmes de saturation (cf. fig.5). Les résultats montrent la grande influence de la saturation en eau sur le paramètre  $\alpha$  avec une variation moyenne de 102% entre les états sec et saturé. Une observation importante est que la porosité (rapport  $e/c$ ) n'a que peu d'influence sur le paramètre non linéaire, du moins dans la plage de rapport  $e/c$  usuelle ( $0.3 < e/c < 0.65$  ou  $12 < \text{porosité en \%} < 16$ ). Cette influence limitée nous permet de moyenner les valeurs obtenues sur l'ensemble des éprouvettes, pour chaque état de saturation, dans la zone usuelle des rapports  $e/c$ . Le résultat obtenu sur la plage complète de saturation est présenté Fig.6.

Il n'y a que peu d'études dans la littérature [11,12] traitant de l'influence de la teneur en eau sur le paramètre non linéaire  $\alpha$ , et aucune à notre connaissance sur le béton ou plus généralement les matériaux cimentaires. Ces résultats sont donc les premiers reportés pour ce type de matériaux.

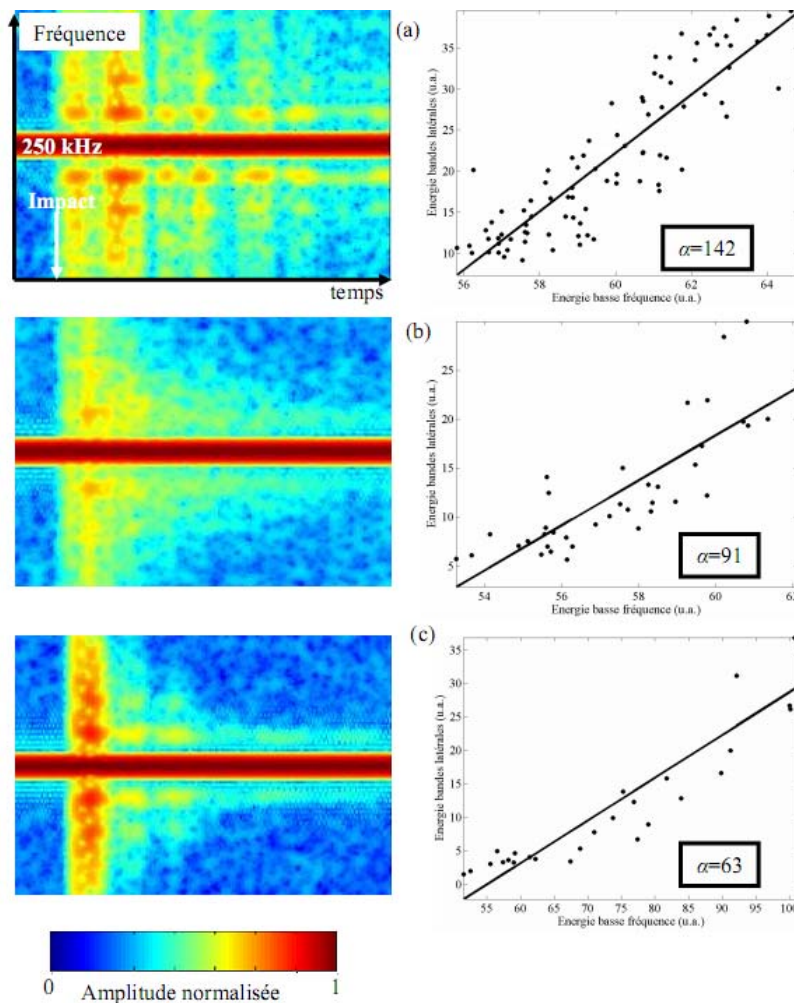


Fig.4 : Images temps fréquences et extraction du paramètre non linéaire. (a) 0% de saturation. (b) 40% de saturation. (c) 100% de saturation.

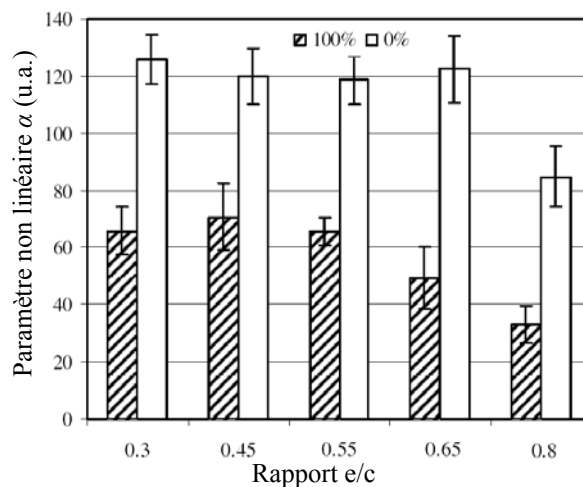


Fig.5 : Evolution du paramètre non linéaire  $\alpha$  en fonction du rapport e/c pour 0% (barres blanches) et 100% (barres hachurées) de saturation en eau.

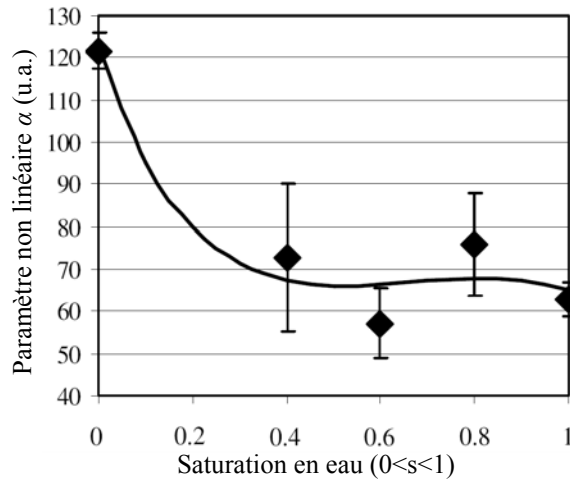


Fig.6 : Evolution du paramètre non linéaire avec la saturation en eau ( $0 < s < 1$ ). Les  $\blacklozenge$  présentent les résultats expérimentaux. La courbe représente l'optimisation de la fonction  $f$  (Eq.3).

Ainsi, sans aucune valeur de référence et de manière à optimiser le modèle présenté, nous avons décrit l'évolution du paramètre non linéaire par une fonction de type exponentielle. Cette fonction nous permet de décrire quantitativement l'influence de la teneur en eau sur le paramètre  $\alpha$ . Les expériences ont été réalisées à température constante, la fonction de dépendance (Eq.3) peut alors s'écrire  $f(s, T=cst) = K \exp(-2.3s^3 + 4.65s^2 - 3s)$ , où  $s$  est la teneur en eau ( $0 < s < 1$ ). Nos mesures étant relatives, le paramètre  $K$  est une constante à déterminer par un essai de référence. Le coefficient de détermination de la régression est de 0.94.

La brusque chute du paramètre non linéaire à partir de 0% de saturation est qualitativement équivalente aux observations réalisées dans la craie [11], mais très différentes de celles faites pour les roches telles le grès ou le calcaire [11,12]. Dans les zones de faibles saturation ( $< 20\%$ ), pour les roches de type grès, les auteurs supposent que l'augmentation du comportement non linéaire est dû aux interactions fluide-solide. Pour les saturations plus élevées, les phénomènes de condensation capillaire prédomineraient. Cette interprétation physique valide dans le cas des roches à faible taille de porosité (typiquement  $< 10\mu\text{m}$  pour le grès) n'est pas applicable au béton. En effet, les tailles de porosités dans le béton sont très variables et s'étendent du nano au millimètre. En conséquence, nous supposons que cette chute abrupte pour les faibles teneurs en eau et due au plus grosses porosités. Les phénomènes de contact rugueux sont très non linéaires, et nous supposons que, comme pour les milieux granulaires [13], une faible quantité de fluide ajoutée suffit pour modifier grandement les propriétés mécaniques. Dans notre cas, l'eau lubrifie les microfissures frottantes. Il en résulte une chute du comportement non linéaire. Pour les niveaux de saturation en eau plus élevés, comme pour les roches, les phénomènes de condensation capillaire prédominent dans les plus petites porosités.

Pour conclure, ces résultats montrent que ce n'est pas le taux mais la taille des porosités qui contrôle la réponse non linéaire du béton, pour les rapports  $e/c$  usuels. Cette conclusion est en accord avec la modélisation proposée dans laquelle le paramètre influent est  $v$  (Eq.5), volume représentatif d'un défaut. Pour les futures études dans le cas du béton, nous introduirons deux paramètres de taille dans le modèle.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous présentons dans cet article une méthode prometteuse pour extraire le paramètre non linéaire du béton. Cette méthode a un fort potentiel de transposition in situ par l'emploi d'un impact mécanique générant une basse fréquence énergétique se propageant dans toute la structure. Nous avons montré la grande sensibilité du paramètre non linéaire  $\alpha$  à la teneur en eau ainsi que la faible influence du taux de porosité dans la gamme usuelle de rapport e/c. De plus, nous présentons et optimisons un modèle récent permettant de rendre compte qualitativement de l'influence de la teneur en eau sur la réponse non linéaire du béton. Nous montrons enfin l'importante contribution de la taille des porosités dans l'évolution du paramètre non linéaire.

Nous démontrons ici qu'il est important de connaître l'état de saturation en eau si l'on cherche à attribuer une variation du paramètre non linéaire à l'endommagement ou à une variation de saturation. Nous étudierons prochainement l'influence de pathologies telles la carbonatation ou la chloruration sur la réponse non linéaire du béton.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet national français SENSO (Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton) qui est supporté financièrement par l'Agence Nationale de la Recherche. Nous tenons à les remercier de leur soutien. Nous remercions également P. A. Johnson (Los Alamos National Laboratory, USA) pour ses conseils et remarques profitables.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, and P. A. Johnson, "Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete," *J. Acoust. Soc. Am.* 121 (4), EL125-EL130, (2007).
- [2] K. Warnemuende and H. C. Wu, "Actively modulated acoustic nondestructive evaluation of concrete," *Cem. Concr. Res.* 34, 563-570 (2004).
- [3] J. C. Lacouture, P. A. Johnson and F. Cohen-Tenoudji, "Study of critical behavior in concrete during curing by application of dynamic linear and nonlinear means," *J. Acoust. Soc.* 113, 1325-1332 (2003).
- [4] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, "Theory of Elasticity," Pergamon Press, New York, (1959).
- [5] K. R. McCall and R. A. Guyer, "Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic material," *J. Geophys. Res.* 99, 23887-23897 (1994).
- [6] P. A. Johnson and A. Sutin, "Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids," *J. Acoust Soc Am*, 117 (1), 124-130 (2005).
- [7] K. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J. TenCate, and P. A. Johnson, "Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage. Part II: Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy," *Res. Nondestruct. Eval.* 12, 31-43 (2000).
- [8] R. A. Guyer and P. A. Johnson, "Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials," *Phys.Today* 52, 30-35 (1999).
- [9] K. Van Den Abeele et al., "Micro-damage diagnostics using nonlinear wave spectroscopy (NEWS)," *NDT & E International*, Vol. 34 (4), 239-248 (2001).
- [10] O. Vakhnenko, V. Vakhnenko, and T. J. Shankland, "Soft-ratchet modeling of end-point memory in the nonlinear resonant response of sedimentary rocks," *Phys. Rev. B* 71, 174103 (2005).



- [11] P. A. Johnson, B. Zinszner, P. Rasolofosaon, F. Cohen-Tenoudji and K. Van Den Abeele. "Dynamic measurements of the nonlinear elastic parameter  $\alpha$  in rock under varying conditions," J. Geophys. Res. 109, B02202 (2004).
- [12] K. Van Den Abeele, J. Carmeliet, P. A. Johnson, and B. Zinszner, "Influence of water saturation on the nonlinear mesoscopic response of earth materials and the implications to the mechanism of nonlinearity," J. Geophys. Res. 107 (B6), 2121 (2002).
- [13] T. Brunet, "Sound propagation in dry and wet granular materials," PhD thesis, Université de Marne la Vallée, France (2006).