



**HAL**  
open science

# Potentiel des indicateurs ultrasonores non linéaires pour le CND du béton

Cédric Payan, Vincent Garnier, Joseph Moysan

► **To cite this version:**

Cédric Payan, Vincent Garnier, Joseph Moysan. Potentiel des indicateurs ultrasonores non linéaires pour le CND du béton. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391366

**HAL Id: hal-03391366**

**<https://hal.science/hal-03391366>**

Submitted on 21 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Potentiel des indicateurs ultrasonores non linéaires pour le CND du béton

C. PAYAN, V. GARNIER, J. MOYSAN

Laboratoire de Caractérisation Non Destructive, Université de la Méditerranée, IUT Aix-Provence, Avenue Gaston Berger, 13625 Aix-en-Provence Cedex, France

## Résumé :

*Dans un contexte de sécurisation et pérennisation des structures du Génie Civil, les méthodes acoustiques de caractérisation non destructive répondent à un réel besoin. Les indicateurs "linéaires" ont une sensibilité limitée contrairement aux indicateurs non linéaires dont la dynamique d'évolution est généralement décuplée. Nous démontrons le potentiel de ces derniers et étudions les possibilités de transposition sur site des méthodes associées.*

## Abstract :

*In the context of safety and reliability in Civil Engineering, Non Destructive Evaluation acoustics based methods provide answers to an actual industrial need. Linear indicators exhibit a limited sensitivity unlike nonlinear ones which have usually a tenfold dynamic range. This paper illustrates the potential of these indicators and studies possibilities of on site application.*

**Mots clefs :** génie civil, CND, acoustique non linéaire, béton.

## 1 Introduction

Cet article étudie le potentiel des techniques issues de l'acoustique non linéaire appliquées à la caractérisation non destructive du béton. Les méthodes non linéaires ont été envisagées car les indicateurs de non linéarité montrent des dynamiques d'évolutions importantes face à l'endommagement dans les milieux homogènes [1]. Souvent, leur dynamique d'évolution est de dix fois supérieure à celle des paramètres linéaires.

Un des enjeux majeurs pour l'évaluation non destructive dans le domaine du génie civil, est la recherche d'indicateurs capables de fournir des informations pertinentes in situ. Le béton, matériau de structure, voit ses caractéristiques évoluer au cours du temps en fonction des paramètres structuraux (composition, endommagement...) et environnementaux (teneur en eau, température, précontrainte...). Milieu fortement hétérogène et microfissuré par nature, il exhibe un comportement fortement non linéaire caractéristique des matériaux appelés « non classiques », mis en évidence dans les années 1990 pour les roches [2] ou plus récemment les milieux granulaires [3]. Les expérimentateurs relatent de phénomènes non linéaires très importants lors d'essais dynamiques. Ces derniers n'étant pas décrits par la théorie « classique » décrite par Murnaghan [4] qui consiste en un développement de la loi de comportement à des ordres supérieurs à 1, les auteurs ont introduit le terme « non classique ». En effet, les roches sont composées de grains et microfissures dont l'assemblage est caractérisé par un module élastique  $M_0$ . Les contacts entre ces grains et les frottements dans les microfissures constituent une gamme d'éléments élastiques qui contrôlerait le comportement non linéaire au passage d'une onde d'amplitude  $\Delta\varepsilon$  [5] :

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

où  $\beta$  caractérise la non linéarité classique,  $\alpha$  la non linéarité non classique et  $\varepsilon$  est la déformation instantanée.

Vis-à-vis de la propagation d'onde, le terme  $\beta$  traduit l'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores avec l'état de déformation, que la sollicitation soit statique ou dynamique. Ce phénomène est connu sous le nom d'acousto-élasticité pour les matériaux homogènes [4,6]. Pour le cas des matériaux fortement hétérogènes et/ou endommagés (cas des roches, béton...), la non linéarité non classique  $\alpha$  permet de traduire les

phénomènes d'hystérésis et de mémoire discrète [2].

Ces indicateurs ont déjà été employés pour la Caractérisation Non Destructive (CND) du béton. L'endommagement mécanique a été largement traité [5,7,8]. La prise du béton a également été suivie par ce type de méthode [9].

Nous proposons dans cette étude de traiter plusieurs points répondant à des problématiques actuelles dans le domaine du Génie Civil.

Le premier concerne l'évaluation de la contrainte dans les câbles de précontraintes inaccessibles des structures en béton. De par le caractère inaccessible des câbles, nous nous intéresserons à l'effet de la contrainte sur le béton dont la face extérieure reste accessible. Pour cela, nous étudierons les propriétés non linéaires classique (paramètre  $\beta$ ) du béton par une approche originale fondée sur l'analyse de la « coda » des signaux ultrasonores.

Le second concerne l'étude de la sensibilité du paramètre non linéaire non classique face à l'endommagement thermique du béton. Nous comparons la dynamique d'évolution des paramètres linéaire et non linéaire.

Après avoir montré la forte sensibilité de ces indicateurs face à l'endommagement, le troisième point concerne l'étude de l'influence de paramètres environnementaux et structuraux du béton (teneur en eau, porosité) sur sa réponse non linéaire, le but étant de découpler leur influence.

## 2 Evaluation de l'état de précontrainte

L'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores avec le niveau de chargement statique est bien connue dans les milieux homogènes isotropes depuis les années 1960. Classiquement écrites au deuxième ordre (élasticité linéaire) en terme de déformation  $\varepsilon$ , Hughes et Kelly [6] ont dérivé les expressions des vitesses des ondes élastiques dans un milieu infini contraint en utilisant la théorie de Murnaghan [4] et les termes du troisième ordre. En supposant un chargement statique uniaxial dans la direction 1, où (1, 2, 3) forme une base orthonormée, Egle et Bray [10] ont montré que les constantes élastiques du troisième ordre  $l$ ,  $m$  &  $n$ , dites constantes de Murnaghan, peuvent s'obtenir par une simple relation linéaire entre les constantes élastiques du second ordre (Module d'Young et coefficient de poisson) et les quantités  $L_{ij}$  définies par  $dV_{ij}/V_{ij}^0 = L_{ij}d\varepsilon$ . Avec  $\varepsilon = du/dx$  la déformation dans la direction 1,  $V_{ij}$  est la vitesse des ondes se propageant dans la direction  $i$  et polarisées dans la direction  $j$ .  $V_{ij}^0$  désigne la vitesse des ondes dans l'état de référence (hors contrainte). Pour résumer, en supposant connues les constantes élastiques du second ordre, nous avons besoin de 3 mesures de vitesses dans la direction 2 (perpendiculaire à la contrainte) pour évaluer les 3 constantes du troisième ordre.

Nous nous intéressons à une méthode prometteuse qui permet de tirer parti du caractère diffusant du béton, et de nous affranchir de mesures dans un état de référence (vitesse et distance). Issue de la géophysique, elle révèle en conséquence un fort potentiel d'applicabilité in situ par l'analyse de la coda des signaux transmis.

Le terme « coda », qui désigne classiquement le final d'une pièce musicale, est employé en géophysique pour interpréter la fin des sismogrammes enregistrés suite à des mouvements de terrain. La coda sismique est issue de multiples réflexions d'ondes se propageant dans la croûte terrestre qui sont enregistrées à la surface. Dans le béton, à plus petite échelle, les phénomènes sont les mêmes. Les géophysiciens ne s'intéressent à la coda des ondes sismiques que depuis le début des années 1970. L'idée simple mais ingénieuse était alors d'exploiter la totalité des informations contenues dans les sismogrammes. Jusqu'alors ils ne s'intéressaient qu'à l'arrivée des ondes directes, perdant ainsi la majeure partie de l'information contenue dans les signaux. Le premier à étudier la coda sismique est Aki [11] qui montre qu'elle est issue de la diffusion des ondes dans le manteau terrestre. Plusieurs raffinements de la méthode ont suivi par Poupinet [12] et Roberts [13] pour aboutir aux dernières avancées faites par Snieder qui a été appelée la méthode « Coda Wave Interferometry » (CWI) [14] (Fig.1).

La variation de vitesse n'est pas évidente en début de signal [Fig.1(b)], mais bien visible dans la coda [Fig.1(c)]. Dans cette fenêtre d'observation, le délai entre les deux signaux est obtenu par inter corrélation en mesurant la position temporelle du maximum de cette fonction [Fig.1(d)]. Par une moyenne des délais sur l'ensemble des fenêtres glissantes, la variation relative de vitesse est obtenue par  $dV/V^0 = -\langle t/\tau \rangle$ , où  $t$  est la position du centre de la fenêtre d'observation. Cette méthode nous permet d'étudier avec une résolution importante les variations de vitesses induites par la contrainte quasi-statique à

différents paliers.

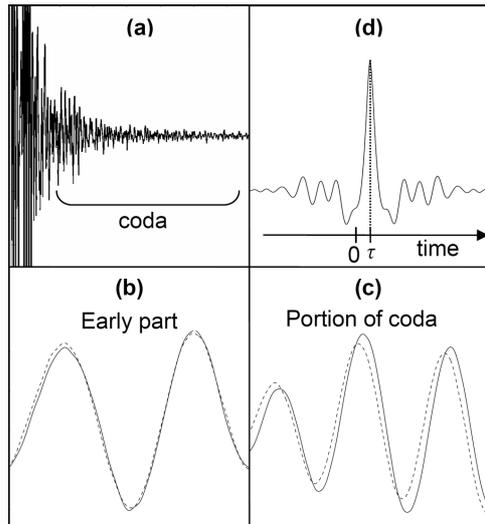


FIG. 1 – Implémentation de la méthode CWI. Trait plein : signal de référence. Pointillé : signal sous contrainte. (a) Signal typique enregistré sur notre éprouvette. (b) Début de signal. (c) Portion de coda. (d) Fonction d'inter corrélation.

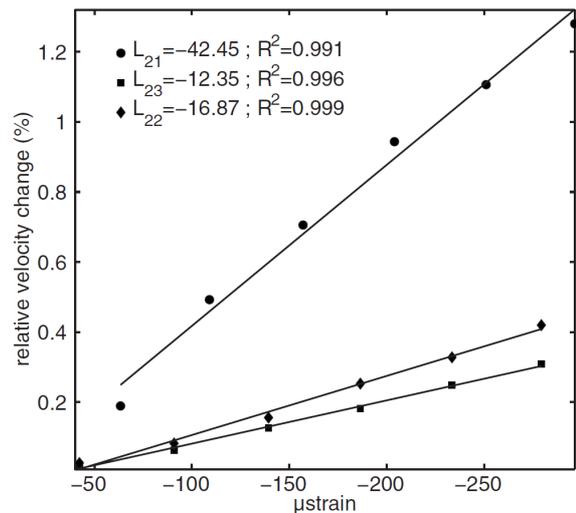


FIG. 2 – [15] Variations relatives de vitesse en fonction de la déformation

Nous disposons d'une presse hydraulique (MTS 318.25) dans laquelle l'éprouvette en béton d'un diamètre de 75mm sur une longueur de 160mm. Des essais préliminaires nous ont permis d'estimer le module d'Young (42.39 Mpa) et le coefficient de poisson (0.21). Des jauges de déformations sont collées à l'éprouvette de manière à contrôler la déformation dans la direction de chargement (direction 1). Des transducteurs ultrasonores longitudinaux et transverses (500 kHz) sont employés et maintenus en position par un dispositif à ressort exerçant un effort constant. Ils tirent dans la direction 2 en mode impulsif. De cette manière, la méthode CWI nous permet de déterminer les quantités  $dV_{2j}/V_{2j}^0$  ( $j=1..3$ ) et connaissant la déformation, nous déterminons les valeurs de  $L_{2j}$  par  $dV_{2j}/V_{2j}^0=L_{2j}d\epsilon$ .

L'ensemble des résultats est compilé figure 2 [15]. Une remarque importante est que la méthode CWI permet de détecter des variations de vitesses très inférieures à 1/1000. Le paramètre non linéaire  $\beta$  (Eq.1) peut s'exprimer en fonction des constantes de Murnaghan  $l, m, n$  [16] et le paramètre non linéaire obtenu par la relation  $\beta=3/2+(l+2m)/(\lambda+2\mu)$ . Les fortes valeurs négatives obtenues (Tab.1) sont similaires à celles relevées dans les roches [16,17] et de plusieurs ordres de grandeurs supérieures à celles des matériaux homogènes [10,16]. Pour comparaison, le paramètre non linéaire  $\beta$  peut être obtenu par l'étude de la loi de comportement lors d'un essai statique. Notre résultat est en accord avec ceux relevés dans la littérature pour un béton de même composition [18].

$l$ (GPa)	$m$ (GPa)	$n$ (GPa)	$\beta$
-3007 ± 2.8%	-2283 ± 1.2%	-1813 ± 3.4%	-157 ± 1.9%

TAB. 1 – Constantes élastiques du troisième ordre et paramètre non linéaire obtenus pour le béton.

Nous proposons ici une méthode robuste et précise pour suivre l'état de contrainte dans le béton permettant de s'affranchir d'une mesure de distance. La mesure absolue de contrainte in situ semble pour l'instant prématurée. Cependant, la méthode CWI peut être employée pour le suivi d'état contrainte dans les structures en béton précontraint. Sa simplicité de mise en œuvre, sa haute sensibilité et le peu d'instrumentation requise en font une bonne candidate pour la surveillance des ouvrages d'arts in situ. De plus, un réseau de récepteur de récepteurs judicieusement placés, permettrait de localiser les zones de variation de contrainte.

### 3 Sensibilité des indicateurs non linéaires à l'endommagement thermique

Dans le domaine du Génie Civil, la problématique du contrôle des tunnels après un incendie ou des fut de

stockage de déchets radioactifs est d'actualité. Après l'étude la non linéarité classique, nous nous intéressons à la non linéarité non classique du béton à travers la sensibilité du paramètre non linéaire  $\alpha$  (Eq.1) face à l'endommagement thermique. Pour cela, nous comparons la sensibilité d'un indicateur linéaire qu'est la vitesse des ondes ultrasonores avec celle du paramètre non linéaire non classique  $\alpha$ .

Nous disposons de quatre éprouvettes identiques de géométrie parallélépipédiques de dimension 10x10x5 cm<sup>3</sup>. La première est la référence, la seconde a été chauffée à 120°C, la troisième à 250 et la quatrième à 400°C suivant un cycle de chauffage/refroidissement, avec des évolutions de l'ordre de 1°C/min, afin d'éviter tout risque d'éclatement des éprouvettes.

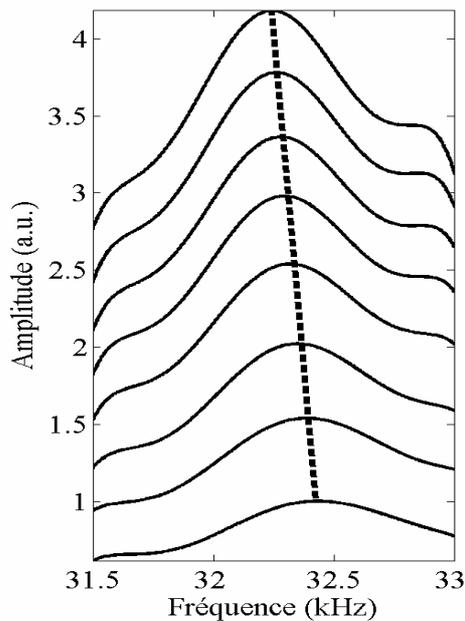


FIG. 3 – [20] Expérience NRUS pour l'éprouvette endommagée à 120°C.

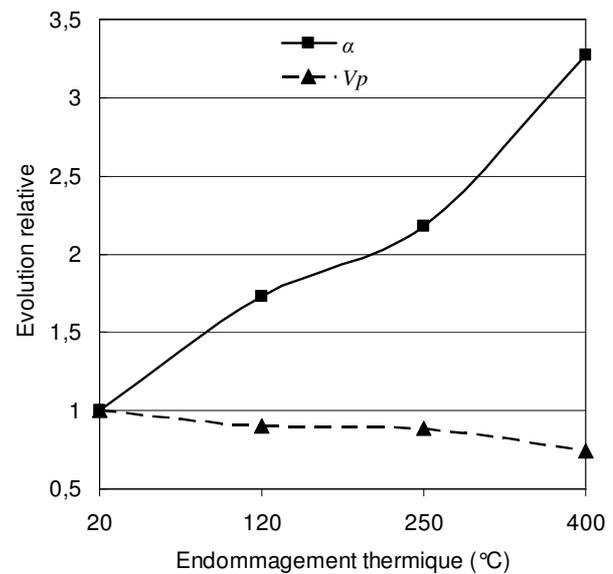


FIG. 4 – Evolution relative du paramètre non linéaire  $\alpha$  et de la vitesse des ondes de compression  $V_p$  en fonction de la température d'endommagement.

Pour la méthode linéaire, une mesure de temps de vol est effectuée nous permettant d'évaluer la vitesse des ondes longitudinales  $V_p$ . La méthode employée pour extraire le paramètre non linéaire  $\alpha$  est la méthode NRUS (Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy). Le principe consiste à mettre en résonance l'éprouvette à des niveaux d'amplitude successivement plus élevés. Pour les matériaux non classiques, la fréquence de résonance diminue linéairement avec l'amplitude d'excitation (Fig.3) et le paramètre non linéaire est obtenu via une écriture au premier ordre de l'équation 1 par [19]:

$$\frac{f_0 - f}{f_0} = \alpha \Delta \varepsilon, \quad (2)$$

où  $f_0$  est la fréquence de résonance "linéaire", c'est-à-dire obtenue pour un faible niveau d'amplitude,  $f$  la fréquence de résonance mesurée pour les niveaux d'amplitudes  $\Delta \varepsilon$  successivement plus élevés. Dans notre cas, nous employons des transducteurs ultrasonores pour l'émission et la réception (Panametrics V1012 100kHz), les valeurs mesurées ne seront donc pas absolues mais seront cependant comparables entre elles. La linéarité de la chaîne d'acquisition a été vérifiée sur un échantillon d'acier de dimensions semblables à nos éprouvettes en béton.

Nous observons que le décalage de la fréquence de résonance est visible (Fig.3). Le paramètre non linéaire, obtenu par la pente de la droite en pointillé figure 3 (Eq.2), a une dynamique d'évolution dix fois supérieure à celle de la vitesse des ondes ultrasonores (Fig.4).

La grande sensibilité de cet indicateur permet d'observer des variations significatives dès le début du processus d'endommagement et ainsi réduire le seuil de détection. Cette dynamique importante est positive mais il faut également se poser la question de l'influence de paramètres potentiellement influents,

tels la teneur en eau ou la porosité du béton, en vue du contrôle in situ.

La méthode d'extraction du paramètre non linéaire  $\alpha$  proposée dans cette section est difficilement transposable in situ. En effet, il semble compliqué d'identifier les modes de résonances d'une structure réelle. De plus, la génération d'ondes d'amplitudes suffisamment élevée semble compromise in situ.

#### 4 Influence de la teneur en eau sur le paramètre non linéaire

Afin d'étudier l'influence de la teneur en eau et de la porosité sur la réponse non linéaire du béton, nous disposons de 5 séries de 6 éprouvettes parallélépipédiques ( $12 \times 25 \times 50 \text{ cm}^3$ ). Chaque série a un rapport eau sur ciment différent, donc une porosité différente (conditionnée par le rapport eau sur ciment E/C). Ces éprouvettes sont conditionnées à 0, 40, 60, 80 et 100% de saturation en eau. A 0% et 100% de saturation, l'ensemble des éprouvettes est séché et saturé. Pour les états intermédiaires, seule une partie des éprouvettes d'une même série est conditionnée à 40, 60 ou 80% de saturation en eau.

La méthode d'interaction d'onde est employée pour extraire le paramètre non linéaire  $\alpha$ . Le principe repose sur l'emploi de deux ondes : une basse fréquence énergétique (fréquence  $f_1$ ) et une haute fréquence (fréquence  $f_2$ ). La basse fréquence vient perturber le milieu pendant que la haute vient inspecter ce même milieu transportant ainsi avec elle les informations sur la non linéarité. Si ces deux ondes se propagent dans un milieu régit par une loi de comportement de type Eq.1, la haute fréquence se trouve modulée en amplitude par la basse fréquence, donnant naissance à de nouvelles fréquences :  $f_2 - f_1$ ,  $f_2 + f_1$ ,  $f_2 + 2f_1$ ,  $f_2 - 2f_1 \dots$ . Le paramètre non linéaire peut alors être obtenu par le rapport des amplitudes des fréquences créées avec celles des ondes qui leur ont donné naissance.

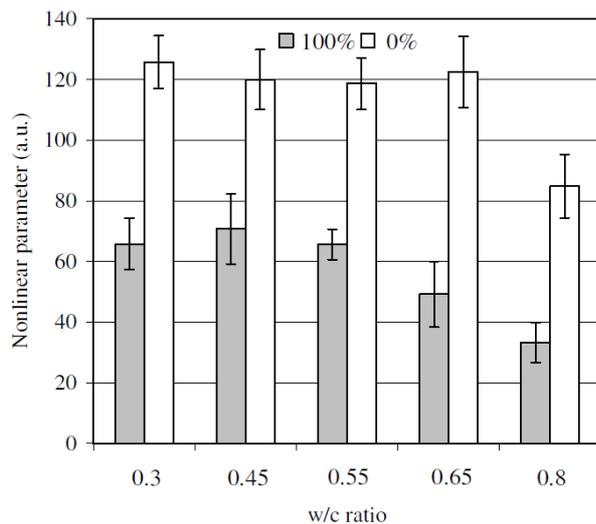


FIG. 5 – Paramètre non linéaire mesuré à 0% et 100% de saturation en fonction du rapport eau sur ciment (porosité)

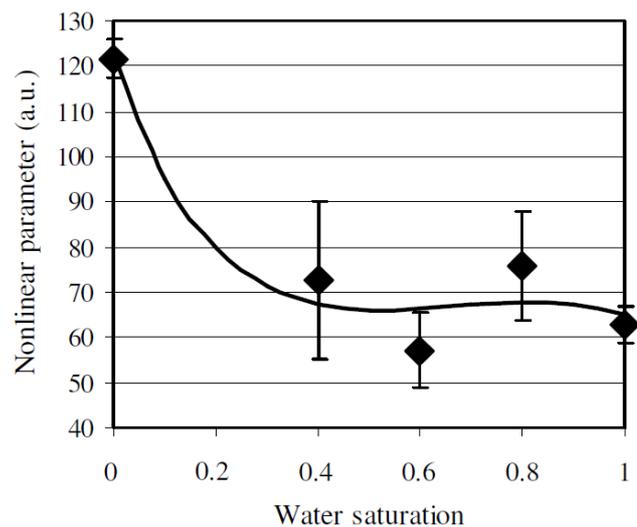


FIG. 6 – Dépendance du paramètre non linéaire avec le degré de saturation en eau.

Pour notre cas, la haute fréquence (250kHz) est générée par un générateur de fonction excitant un capteur Panametrics V1012 en continu. La réception est faite par un capteur identique, relié à un oscilloscope. La basse fréquence est générée par un impact mécanique. Une bille en acier est lâchée d'une hauteur constante, excitant tous les modes de résonances de l'éprouvette, un capteur basse fréquence relié à l'oscilloscope enregistre le signal associé et synchronise l'acquisition. Le spectre fréquentiel résultant étant complexe, il est difficile d'extraire les amplitudes des fréquences résultant de l'interaction. Cependant, Van Den Abeele et al. [21] ont montré que le paramètre non linéaire  $\alpha$  pouvait être obtenu non pas un rapport d'amplitude mais un rapport d'énergie :

$$\alpha \propto \frac{W_{NL}}{W_{f_1} W_{f_2}}, \quad (3)$$

où  $W_{NL}$ ,  $W_{f_1}$ ,  $W_{f_2}$  sont respectivement les énergies contenues dans l'ensemble des bandes spectrales générées par interaction, dans la basse fréquence et dans la haute fréquence.

Les premières campagnes d'essais concernaient les états de saturations 0 et 100%. Les résultats sont

présentés figure 5. Une première conclusion est que la teneur en eau influe grandement sur le paramètre non linéaire  $\alpha$  avec une évolution moyenne de 100% entre les deux états. La seconde est que la porosité, n'influe que peu sur le comportement non linéaire, du moins dans la plage E/C usuelle ( $0.3 < E/C < 0.65$ ). Ce constat nous permet de moyenniser l'ensemble des résultats obtenus sur l'ensemble des éprouvettes pour un niveau de saturation donné. Le résultat est compilé figure 6.

Il n'y a à notre connaissance aucune étude qui fournisse la dépendance du paramètre non linéaire avec la teneur en eau dans le béton. Seules deux études s'intéressent à cette dépendance [22,23] dans les roches. Les constatations sont très variables en fonction du type de roche. Cependant, une tendance peut être extraite. La chute brutale du comportement non linéaire est similaire aux observations faites pour la craie, mais très différente à celles faites pour le grès ou le calcaire.

Nous quantifions dans cette section l'influence de la teneur en eau et de la porosité sur le paramètre non linéaire du béton, nous permettant de découpler l'effet d'un endommagement de celui d'une variation de teneur en eau par exemple. La méthode proposée présente un fort potentiel d'application au CND de structures en béton in situ par la génération d'une onde basse fréquence de forte amplitude par un impact mécanique qui se propage dans toute la structure. Il est même envisageable d'employer les sollicitations naturelles de la structure.

## Conclusion

Nous montrons dans cet article le fort potentiel des techniques issues de l'acoustique non linéaire appliquées au CND de structures en béton in situ. Nous proposons une méthode (CWI) permettant de suivre l'état de précontrainte des bétons avec une résolution importante. Nous montrons la forte sensibilité des indicateurs non linéaires comparés aux linéaires face à un endommagement et quantifions l'effet de paramètres tels la teneur en eau et la porosité. Nous identifions également des techniques transposables sur site. Les études futures concernent l'étude de pathologies du béton telle la carbonatation, et la localisation de macro fissures par retournement temporel non linéaire.

## References

- [1] Nagy P. B. Ultrasonics 36, 375 (1998).
- [2] R. A. Guyer and P. A. Johnson, Phys. Today 52, 30–35 (1999)
- [3] P. A. Johnson and X. Jia, Nature 437, 871–874 (2005)
- [4] Murnaghan F. D., Finite Deformations of an Elastic Solid (John Wiley, New York, 1951).
- [5] K. Van Den Abeele and J. De Visscher, Cement and Concrete Research 30, 1453-1464 (2000).
- [6] D.S. Hughes and J.L. Kelly, Phys. Rev. 92, 5 (1953).
- [7] M. Bentahar et al., Phys. Rev. B 73, 014116 (2006).
- [8] K. Warnemuende and Wu, H. C., Cement and Concrete Research 34, 563-570 (2004).
- [9] J. C. Lacouture, P. A. Johnson and F. Cohen-Tenoudji, J. Acoust. Soc. 113, 1325-1332 (2003).
- [10] D. M. Egle and D. E. Bray, J. Acoust. Soc. Am. 60, 3 (1976).
- [11] K. Aki, J. Geophys. Res. 74, (1969)
- [12] G. Poupinet et al., J. Geophys. Res. 89, B7 (1984).
- [13] P. M. Roberts, W. S. Phillips and M. C. Fehler, J. Acoust. Soc. Am. 91, 6 (1992).
- [14] R. Snieder et al., Science 295, (2002).
- [15] C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, P.A. Johnson, Applied Physics Letters 94, 011904 (2009)
- [16] P. A. Johnson and P. N. J. Rasolofosaon, J. Geophys. Res. 101, No B2, 3113 (1996).
- [17] P. Rasolofosaon et al., Oil & Gas Science and Technology 52, No 6, 585 (1997).
- [18] I. E. Shkolnik, Cement & Concrete Composites 27, 747 (2005).
- [19] K. Van Den Abeele et al., Research on NonDestructive Evaluation 12, 31-42 (2000).
- [20] C. Payan, V. Garnier, J. Moysan and P. A. Johnson, J. Acoust. Soc. Am. 121 (4), EL125-EL130, (2007).
- [21] K. Van Den Abeele et al, Research on NonDestructive Evaluation 12, 17-30 (2000).
- [22] Van Den Abeele et al., J. Geophys. Res., 107 (B6), 2121 (2002).
- [23] P.A. Johnson et al., Journal of Geophysical Research. 109, 10129-10139 (2004).