

CFA/VISHNO 2016

Suivi du gradient de teneur en eau dans les bétons par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

J.-B. Legland^a, O. Abraham^a, G. Villain^b, O. Durand^a et V. Tournat^c

^aIFSTTAR, GERS - GEOEND, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais, France

^bIFSTTAR, MAST - LAMES, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais, France

^cLAUM, UMR-CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, Université du Maine, 72085 Le Mans, France

jean-baptiste.legland@ifsttar.fr



LE MANS

La connaissance de l'état de santé et l'évaluation de la durée de vie résiduelle des structures du génie civil est un enjeu majeur. La teneur en eau des bétons est une donnée importante ; elle est classiquement quantifiée non destructivement par des méthodes électriques et/ou électromagnétiques. Son estimation reste toutefois complexe en raison notamment de la présence éventuelle d'ions dans la solution et de la porosité inconnue du matériau. Le développement de méthodes ultrasonores complémentaires est donc pertinent toutefois une grande sensibilité est requise pour suivre des mouvements d'eau. Dans ce travail nous proposons d'utiliser la méthode de modulation non linéaire des ondes de coda pour suivre et caractériser un front d'eau montant par capillarité dans une dalle de béton. En effet, les ondes de coda étant très sensibles aux petites variations auxquelles est soumis le matériau (température, contraintes mécaniques, etc.), un changement local d'humidité perturbera les ondes multi-diffusées (coda). Deux observables sont extraites par "stretching" : la variation de vitesse (θ) et le coefficient de dé-corrélation (Kd). De plus, le béton étant structurellement un matériau non-linéaire (micro-fissuration notamment au niveau de l'interface pâte/granulat), les caractéristiques des contacts peuvent être évaluées par l'ajout d'une sollicitation acoustique de fort niveau (pompe) aux ondes de coda. Deux nouvelles observables non linéaires sont extraites de θ et Kd en fonction de l'amplitude de la pompe acoustique. Finalement le gradient de teneur en eau est suivi tout d'abord par l'observation : 1/ du changement de vitesse et d'atténuation dans le matériau puis 2/ des modifications des contacts pâte/granulat en présence d'eau à l'aide des observables non linéaires. Les résultats obtenus seront présentés et confirmés par la mesure de capteurs d'humidité judicieusement positionnés sur les échantillons.

1 Introduction

L'état de santé des ouvrages d'art en béton est une thématique de recherche largement développée en laboratoire. Le but de ces recherches est de caractériser l'état de dégradation des bétons. Plusieurs facteurs peuvent conduire à cette dégradation : fatigue mécanique, température, humidité ou encore attaques chimiques. Parmi ces facteurs, bien que l'eau soit toujours présente dans les bétons armés, l'interaction des ions peut entraîner une corrosion des barreaux de fer, puis engendrer la formation de fissures potentiellement dangereuses pour l'intégrité de la structure. La connaissance de la teneur en eau est alors un enjeu majeur pour la caractérisation de l'état de santé de la structure. La teneur en eau, quantifiée par le taux de saturation, est classiquement mesurée par des méthodes non destructives [1] comme les méthodes électriques et électromagnétiques. La mesure de ce paramètre reste toutefois difficile avec ces méthodes car plusieurs facteurs peuvent influencer les résultats : porosité, ions, présence d'un ferrailage etc. Les méthodes acoustiques sont donc utilisées dans ce travail car elles sont très sensibles aux petites variations d'élasticité et d'atténuation. Plusieurs techniques existent pour caractériser la teneur en eau [2, 3, 4, 5] mais leurs sensibilités sont parfois insuffisantes quant aux mesures dans des matériaux complexes comme le béton. En effet, ces matériaux sont très hétérogènes et très atténuants dans le cas de la propagation de petites longueurs d'ondes [6]. La technique de génération d'onde de coda est particulièrement adaptée pour le monitoring des petites variations de ces matériaux. Issue du domaine géophysique et sismique [7], la coda, illustrée sur la figure 1, est le résultat des propriétés de multidiffusion des ondes dans les matériaux complexes [8]. La présence d'eau dans le béton modifie ses propriétés élastiques et multi-diffusantes à l'échelle mésoscopique. La technique des ondes coda est alors tout particulièrement adaptée à la caractérisation des changements de propriétés du matériau [2].

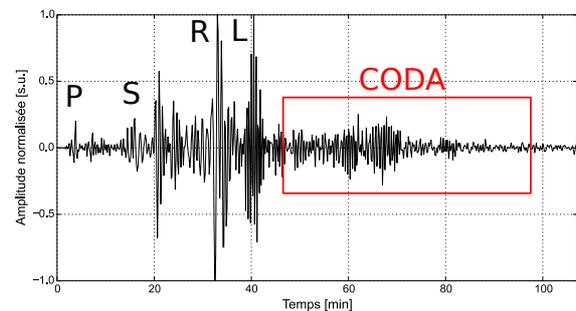


FIGURE 1 – Illustration de la coda sur l'enregistrement du séisme du 11 mars 2011 au Nord Est de Honshu au Japon (catastrophe de Fukushima). L'enregistrement a été réalisé sur la station de l'observatoire de Chambon la Forêt (données obtenues sur EIDA Data Archive : <http://www.orfeus-eu.org/eida/eida.html>).

2 Interférométrie des ondes de Coda

2.1 Méthode linéaire

Du fait de sa grande sensibilité aux petites variations, la coda est de plus en plus utilisée dans le contrôle non destructif [6]. Grâce à un dispositif de mesure adapté (émetteur + récepteur ultrasonores), la réponse impulsionnelle d'un matériau est enregistrée à plusieurs moments. Si les ondes de coda restent identiques au cours du temps alors le matériau étudié n'a connu aucune modification. Cependant si une variation est observée, celle-ci peut avoir plusieurs origines : modification de la vitesse de propagation, changement d'atténuation du matériau, endommagement de l'échantillon. Cependant, ces changements sont souvent de nature locale, et ne peuvent pas toujours être observés sur le temps d'arrivée des ondes directes. Pour pouvoir mesurer des changements faibles non détectables par des méthodes classiques, il faut comparer les ondes de coda entre deux états différents (sain et modifié, montrés sur la figure 2). L'interférométrie de la coda quantifie ces différences afin de suivre et caractériser les variations du matériau [9]. Il existe trois méthodes pour réaliser cette interférométrie. Deux d'entre elles, utilisées classiquement, sont basées sur l'étude du coefficient de

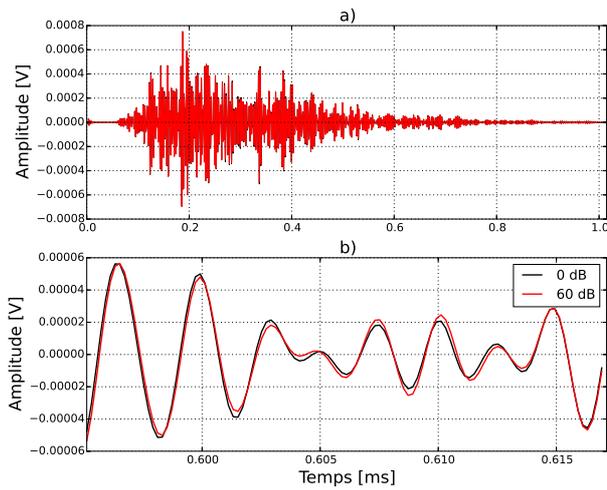


FIGURE 2 – a) Réponse impulsionnelle du béton étudié. b) Zoom temporel sur la coda, pour deux états de sollicitation acoustique non linéaire.

corrélation entre deux coda : le « doublet » [10], et le « stretching » [11]. La troisième méthode, plus récente, est basée sur les expansions en série de Taylor [12]. Ces trois techniques permettent de mesurer la variation relative de vitesse de propagation des ondes de coda :

$$\theta = \delta v/v. \quad (1)$$

Dans ce travail, seule la technique du stretching est appliquée. Cette méthode [11, 13] consiste à dilater/comprimer temporellement le signal de référence et à calculer le coefficient de corrélation $CC(\theta)$ sur une fenêtre judicieusement choisie (voir figure 2 b)) selon l'équation suivante :

$$CC(\theta_i) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} u_i[t(1-\theta_i)] u_p[t] dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} u_i^2[t(1-\theta_i)] dt \int_{t_1}^{t_2} u_p^2[t] dt}} \quad (2)$$

avec θ_i le coefficient de dilatation, t_1 et t_2 respectivement le début et la fin de la fenêtre d'analyse [14]. La variation de vitesse est ensuite obtenue en maximisant le coefficient de corrélation. Plus rapide que le doublet, cette méthode suppose que le changement de vitesse est constant sur toute la durée du signal, et que ce changement reste faible (une variation supérieure à une demi période entraîne une erreur de signe dans les résultats). Cette méthode présente en outre l'intérêt d'extraire une seconde observable, le coefficient de dé-corrélation Kd :

$$Kd = 1 - CC(\theta_{max}) \quad (3)$$

qui caractérise le changement d'amplitude et de forme du signal perturbé.

2.2 Méthode non linéaire

Il est connu que les méthodes en acoustique non linéaire [15] permettent d'estimer des propriétés physiques avec une très forte sensibilité particulièrement dans les milieux comme les roches, les granulaires et les milieux fissurés. Ces

méthodes sont particulièrement sensibles aux contacts [16] et donc par nature aux fissures. Dans le domaine du génie civil, plusieurs travaux en acoustique non linéaire ont été menés pour observer des endommagements et des fissures dans les bétons [17, 18, 19]. Dans ces cas, le régime non linéaire est atteint en augmentant l'amplitude de la source acoustique. Appliquée à la coda, ce régime non linéaire permet de caractériser des milieux complexes comme les matériaux granulaires [20]. Une nouvelle technique est proposée par [21] puis appliquée à la coda [22, 23]. Le principe est de moduler les ondes de coda par une source acoustique basse fréquence et de forte amplitude. Le protocole de cette mesure consiste à augmenter successivement l'amplitude de la pompe et à mesurer à chaque amplitude, la variation de vitesse par la méthode du stretching. Si le matériau présente un caractère non linéaire (de par sa nature ou en présence d'un défaut) alors la variation de vitesse entre deux états avec et sans pompe est non nulle (figure 3 a)). Deux observables caractérisant les non linéarités α_θ et α_{Kd} sont alors extraites par régression (linéaire ou quadratique) de la dépendance de la variation de vitesse θ et de la dé-corrélation Kd en fonction de l'amplitude de la pompe (figure 3 b)). D'un point de vue physique, ces deux observables non linéaires interviennent dans la relation contrainte/déformation [24], où un terme d'hystérésis doit être ajouté pour décrire la variation négative de vitesse de propagation [25] :

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \dots) + \alpha F(\varepsilon, \text{sign}(\partial \varepsilon / \partial t)) \quad (4)$$

D'un point de vue expérimental, la réponse de la variation de vitesse en fonction de l'amplitude de la pompe est négative, c'est à dire :

$$\alpha_\theta < 0 \quad \forall A_{pompe} > 0. \quad (5)$$

Appelé "softening" ce phénomène confirme que les non linéarités mesurées sont de type non linéaire non classique hystérétique, et qu'elles sont essentiellement liées aux contacts internes dans le matériau. L'intérêt majeur de cette technique non linéaire est qu'il n'est plus nécessaire d'avoir un enregistrement d'une coda dans un état sain. La référence

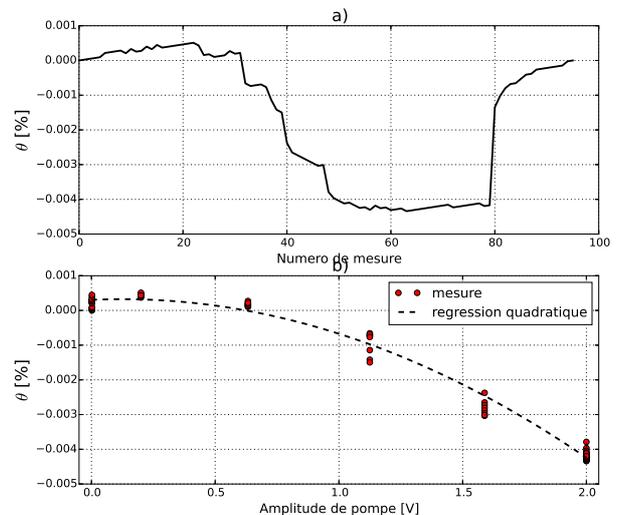


FIGURE 3 – a) Variation de vitesse θ en fonction du temps en faisant varier l'amplitude de la modulation non linéaire. b) Variation de vitesse de coda en fonction de l'amplitude de la pompe acoustique.

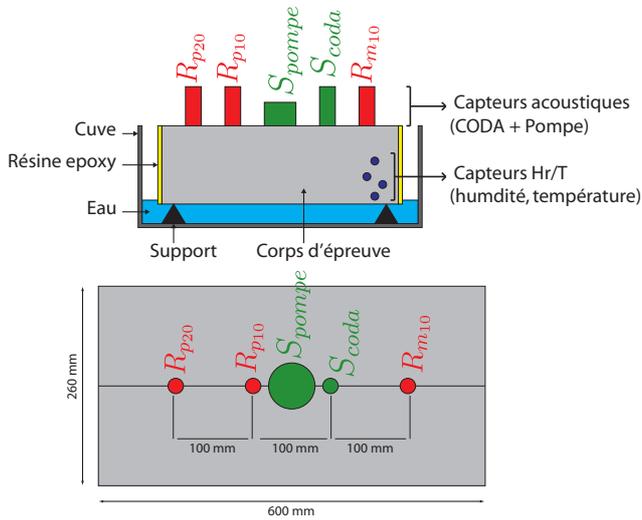


FIGURE 4 – Schéma du dispositif expérimental sur le corps d'éprouve C1_26, et plan de positionnement des capteurs acoustiques.

pour le stretching est prise lorsque que le niveau de pompe est nul. La sensibilité de cette méthode permet de détecter et de caractériser des micro-fissures dans le béton [23]. Il faut ajouter que cette technique est tout particulièrement adaptée aux mesures in situ sur des structures réelles. Ne connaissant pas l'état sain mais connaissant l'ordre de grandeur des non linéarités du matériau dans un état sain, un pronostic quant à la présence de micro-fissures peut alors être donné à n'importe quel moment [26].

3 Dispositif expérimental

3.1 Description du dispositif

Le dispositif expérimental, présenté sur la figure 4, est composé d'un corps d'éprouve en béton de forme parallélépipédique ($600 \times 260 \times 150$ mm) dont les côtés ont été enduits de résine époxy afin que l'échantillon soit imbibé exclusivement par la face inférieure. La composition du béton étudié est présentée dans le tableau (1). Cette dalle est instrumentée pour des mesures simultanées de l'humidité relative et des ondes de coda.

Pour les mesures d'humidité relative (ou de taux de saturation), quatre capteurs thermohygrométriques (THR, Honeywell de type capacitif) ont été noyés dans le béton à une profondeur de 100 mm et disposés respectivement à 25, 40, 60 et 120 mm de la face inférieure. L'acquisition des données est réalisée grâce à un boîtier électronique et un logiciel développé à l'Ifsttar. Le dispositif permet d'obtenir une valeur d'humidité relative RH toutes les minutes environ. Le taux de saturation S_r est finalement obtenu à partir de l'humidité relative et des courbes isothermes d'adsorption du béton étudié.

Pour les mesures de coda ultrasonores, plusieurs transducteurs ultrasonores sont collés sur la face supérieure du corps d'éprouve. Les ondes de coda sont générées par un émetteur piézo-électrique qui excite le milieu avec un chirp de fréquences comprises entre 200 et 800 kHz. Les ondes de coda sont ensuite enregistrées par trois récepteurs piézo-électriques disposés en ligne respectivement à -100, +100 et +200 mm de la source acoustique. Enfin, un transducteur

piézo-électrique basse-fréquence de forte puissance est collé au centre de la face supérieure de la dalle. Cet émetteur permet de moduler non linéairement les ondes coda avec un chirp de fréquences comprises entre 15 kHz et 45 kHz (excitant au moins les 20 premiers modes de résonance de la dalle).

TABLEAU 1 – Composition du béton étudié.

Type d'agrégats	d_{max} (mm)	14
Rapport E/C		0.8
Densité	ρ ($kg.m^{-3}$)	2250
Porosité ouverte	ϕ (%)	18.1 ± 0.3

3.2 Protocole de mesures

Afin d'assurer une homogénéisation du taux de saturation hydrique dans le corps d'éprouve, celui-ci est placé dans une chambre climatisée ($T=25$ °C et $RH=55\%$) pendant plusieurs semaines avant le début de la campagne de mesure. La dalle est ensuite posée sur des cales dans une cuve pré-remplie d'eau à température ambiante. Ce pré-protocole est important car la moindre variation environnementale proche de la dalle influe sur les propriétés de la coda. En effet, sans ces dispositions, il serait alors difficile de dissocier les effets environnementaux des effets de l'imbibition sur les observables extraites des ondes de coda. Toutefois, pour compenser les petites variations de température extérieure, une seconde dalle, de composition et de dimensions identiques, est utilisée pour suivre l'évolution de la température grâce aux ondes de coda. Les résultats expérimentaux seront ainsi corrigés comme décrit dans [27].

4 Résultats

4.1 Taux de saturation

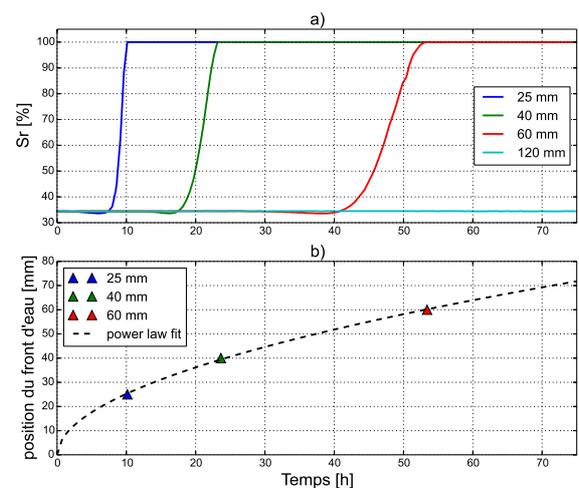


FIGURE 5 – a) Evolution de taux de saturation en fonction du temps pour chacun des capteurs THR. b) Evolution du front d'eau ($S_r=100\%$) en fonction du temps.

Les résultats expérimentaux sur le taux de saturation S_r sont présentés sur la figure 5. La position du front d'eau

est dérivée des mesures en relevant le temps mis pour un capteur de mesurer un taux de saturation égal à 100%. Puis en fonction de la position du capteur, la position du front est montrée en fonction du temps 5 b). Dans la configuration de nos mesures, le temps total pour que le front atteigne la face supérieure de la dalle est d'environ trois semaines. Dans ce travail nous nous intéressons seulement aux premières heures de l'imbibition (les 75 premières heures).

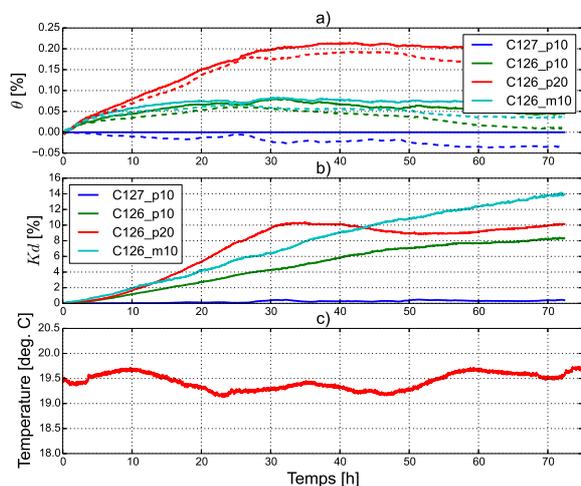


FIGURE 6 – Evolution des observables linéaires en fonction du temps : a) variation de vitesse θ corrigée par la dalle de référence (avant correction, les résultats sont montrés en pointillé), b) variation du coefficient de dé-corrélation Kd , c) évolution de la température extérieure.

4.2 Coda et Non-linéarités

Le stretching sur la coda est réalisé sur une fenêtre comprise entre $t_1 = 0.1$ ms et $t_2 = 0.15$ ms. La variation de vitesse des ondes de coda $\theta = \delta v/v$ et le coefficient de dé-corrélation Kd sont présentés respectivement sur les figures 6 a) et b). La température extérieure est aussi présentée, son influence (faible) sur θ en l'absence de variation de teneur en eau (en bleu sur la figure 6 a)) permet la correction des observables. Les résultats montrent une augmentation quasi monotone des observables en fonction du temps (et donc du taux de saturation). Les résultats sur la variation de vitesse sont en accord avec la littérature ([28, 4, 5]). Pour un béton de porosité de 18%, la vitesse augmente avec le taux de saturation si et seulement si celui-ci est supérieur à $\sim 24\%$ [5]. Si la mesure de la variation de vitesse donne une information pertinente sur l'état du front d'eau, il faut cependant connaître l'état initial car ce type de mesure est relatif. Pour palier à cette contrainte, la modulation non linéaire de la coda est mise en place. Cette technique ne requiert pas de connaître l'état initial de l'échantillon. La référence pour le calcul du stretching est prise quand l'amplitude de la pompe est nulle. Les résultats de la méthode non linéaire sont présentés sur les figures 7 a) et b). Les évolutions des non-linéarités α_θ et α_{Kd} sont montrées en fonction de la position du front de saturation à 100%. Pour les deux observables, leur diminution en fonction de la position du front, montre clairement une modification des propriétés non linéaires du matériau. En effet, les non linéarités élastiques et dissipatives diminuent

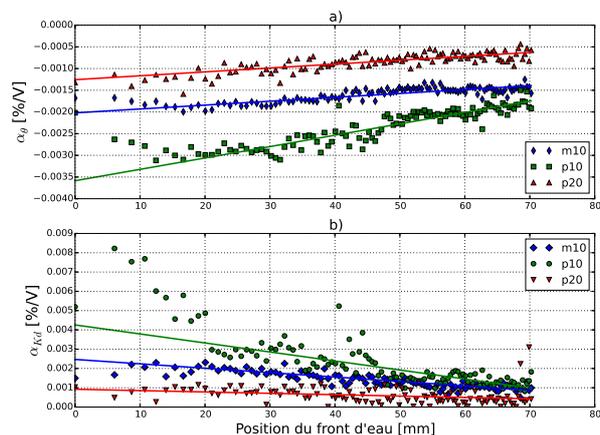


FIGURE 7 – Evolution des non-linéarités du corps d'épreuve en fonction de la position du front d'eau : a) non-linéarités élastiques α_θ , b) non-linéarités dissipatives α_{Kd} .

avec la montée du front d'eau. Cette diminution peut s'expliquer par le comblement des micro-fissures par l'eau. En effet, sous l'action de l'eau, le contact entre les parois des micro-fissures est atténué et le phénomène de clapping n'est plus observé lors de la modulation acoustique.

5 Conclusions

Dans ce travail, la progression d'un front d'eau dans une dalle de béton est suivie grâce au monitoring de la coda ultrasonore. Le taux de saturation est mesuré par des capteur THR, cependant ceux-ci sont noyés dans l'échantillon. Il est difficilement envisageable d'implanter ce type de capteur des structures in situ. La technique de la coda permet de sonder une structure à partir d'une face exposée. Grâce à la grande sensibilité de la méthode, notamment en régime non linéaire, la position d'un front d'eau est détectable par les ondes de coda. De plus, si un échantillon sain et non sollicité est disponible proche de la structure, une caractérisation des micro-fissures est envisageable. En perspective de ce travail, un problème direct sera élaboré puis servira à remonter aux gradients de teneur en eau grâce à l'inversion des non-linéarités.

Remerciements

Ce travail a été en partie financé par les projets ANR EVADEOS (Évaluation non destructive pour la prédiction de la Dégradation des structures et l'Optimisation de leur Suivi) et PIA-RSNR ENDE (Évaluation Non Destructives des Enceintes de confinement des centrales nucléaires), 2014-2017.

Références

- [1] D. McCann, M. Forde, Review of ndt methods in the assessment of concrete and masonry structures, *NDT & E International* **34**, 71 – 84 (2001).

- [2] A. Grêt, R. Snieder, J. Scales, Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth* **111** (2006).
- [3] J.-P. Balayssac, S. Laurens, G. Arliguie, D. Breyse, V. Garnier, X. Dérobert, B. Piwakowski, Description of the general outlines of the french project senso – quality assessment and limits of different ndt methods, *Construction and Building Materials* **35**, 131 – 138 (2012).
- [4] G. Villain, L. Le Marrec, L. Rakotomanana, Determination of the bulk elastic moduli of various concretes by resonance frequency analysis of slabs submitted to impact echo, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **15**, 601–617 (2011).
- [5] V. Garnier, B. Piwakowski, O. Abraham, G. Villain, C. Payan, J.-F. Chaix, Acoustic techniques for concrete evaluation : Improvements, comparisons and consistency, *Construction and Building Materials* **43**, 598–613 (2013).
- [6] T. Planes, E. Larose, A review of ultrasonic coda wave interferometry in concrete, *Cement and Concrete Research* **53**, 248–255 (2013).
- [7] K. Aki, B. Chouet, Origin of coda waves : Source, attenuation, and scattering effects, *Journal of Geophysical Research* **80**, 3322–3342 (1975).
- [8] M. van Rossum, T. Nieuwenhuizen, Multiple scattering of classical waves : microscopy, mesoscopy, and diffusion, *Reviews of Modern Physics* **71**, 313–371 (1999).
- [9] R. Snieder, Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media, *Phys. Rev. E* **66**, 046615 (2002).
- [10] G. Poupinet, W. Ellsworth, J. Frechet, Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets - an application to the calveras fault, california, *Journal of Geophysical Research* **89**, 5719–5731 (1984).
- [11] R. Snieder, The theory of coda wave interferometry, *Pure and Applied Geophysics* **163**, 455–473 (2006).
- [12] S. Liu, J. Zhu, Z. Wu, Implementation of coda wave interferometry using taylor series expansion, *Journal of Nondestructive Evaluation* **34** (2015).
- [13] O. I. Lobkis, R. L. Weaver, Coda-wave interferometry in finite solids : Recovery of p -to- s conversion rates in an elastodynamic billiard, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 254302 (2003).
- [14] C. Hadziioannou, E. Larose, O. Coutant, P. Roux, M. Campillo, Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation : Laboratory experiments, *Journal of the Acoustical Society of America* **125**, 3688–3695 (2009).
- [15] P. Johnson, Nonequilibrium nonlinear dynamics in solids : State of the art, *Universality of Nonclassical Nonlinearity*, 49–69, Springer New York (2006).
- [16] D. Donskoy, A. Sutin, A. Ekimov, Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing, *NDT & E International* **34**, 231–238 (2001).
- [17] K. E.-A. Van Den Abeele, P. A. Johnson, A. Sutin, Nonlinear elastic wave spectroscopy (news) techniques to discern material damage, part i : Nonlinear wave modulation spectroscopy (nwms), *Research in Nondestructive Evaluation* **12**, 17–30 (2000).
- [18] C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, P. A. Johnson, Determination of third order elastic constants in a complex solid applying coda wave interferometry, *Applied Physics Letters* **94**, 1–3 (2009).
- [19] C. Payan, T. J. Ulrich, P. Y. Le Bas, T. Saleh, M. Guimaraes, Quantitative linear and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization : Application to concrete thermal damage, *The Journal of the Acoustical Society of America* **136**, 537–546 (2014).
- [20] V. Tournat, V. E. Gusev, Nonlinear effects for coda-type elastic waves in stressed granular media, *Phys. Rev. E* **80**, 011306 (2009).
- [21] V. Zaitsev, V. Nazarov, V. Gusev, B. Castagnede, Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection, *NDT & E International* **39**, 184 – 194 (2006).
- [22] Y. Zhang, V. Tournat, O. Abraham, O. Durand, S. Letourneur, A. Le Duff, B. Lascoup, Nonlinear mixing of ultrasonic coda waves with lower frequency-swept pump waves for a global detection of defects in multiple scattering media, *Journal of Applied Physics* **113**, 064905 (2013).
- [23] B. Hilloulin, Y. Zhang, O. Abraham, A. Loukili, F. Grondin, O. Durand, V. Tournat, Small crack detection in cementitious materials using nonlinear coda wave modulation, *NDT & E International* **68**, 98–104 (2014).
- [24] L. D. Landau, E. M. Lifschitz, *Theory of elasticity*, Pergamon (1986).
- [25] P. A. Johnson, A. M. Sutin, Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids, *Journal of the Acoustical Society of America* **117**, 124–130 (2005).
- [26] O. Abraham, Y. Zhang, X. Chapeleau, O. Durand, V. Tournat, Monitoring of a large cracked concrete sample with non-linear mixing of ultrasonic coda waves, *EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring* (2014).
- [27] Y. Zhang, O. Abraham, V. Tournat, A. Le Duff, B. Lascoup, A. Loukili, F. Grondin, O. Durand, Validation of a thermal bias control technique for coda wave interferometry (cwi), *Ultrasonics* **53**, 658 – 664 (2013).
- [28] O. Abraham, O., V. Métais, G. Villain, G. Plantier, A. Le Duff, O. Durand, Influence of water gradient on

surface wave measurements in concrete, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)* (2015).