

Sujet de thèse 2019-2022

Laboratoire : **Géophysique et Évaluation Non Destructive – Ifsttar**

Directrice de thèse : **Odile ABRAHAM (IFSTTAR)** – odile.abraham@ifsttar.fr

Co-directeur de thèse : **Vincent TOURNAT (LAUM)** – vincent.tournat@univ-lemans.fr

Co-encadrant : **Benoît Hilloulin (ECN)** – benoit.hilloulin@ec-nantes.fr

Lieu : Ifsttar – Nantes

École doctorale : **SPI** - Établissement d'inscription : Ecole Centrale de Nantes

Financement : Ifsttar

Spécialité de la thèse : **Acoustique, Ultrason, Sismique**

Procédure de candidature → <http://www.ifsttar.fr/publication/theses/candidats/index.php>

Pour candidater sur ce sujet (n°2149) → https://www.ifsttar.fr/offres-theses/sujet.php?num=2149&num_session=1

Imagerie de micro-fissures par interférométrie de la coda non linéaire

Contexte :

Le développement de structures à forte valeur ajoutée exposées à des conditions environnementales sévères nécessite la mise au point et le suivi de matériaux cimentaires innovants et adaptés à chaque situation. C'est notamment le cas pour des applications comme les éoliennes flottantes, certains parcs solaires, les centrales nucléaires nouvelles générations ou pour l'extension de la durée de vie des centrales existantes.

Dans ce contexte, l'usage de bétons fibrés à ultra-hautes performances se répand. En effet, ils présentent une meilleure résistance mécanique permettant la mise au point de structures élancées en plus d'une très bonne durabilité grâce à leur faible perméabilité (Pimienta et Chanvillard, 2005; Wang et al., 2014). Néanmoins, une fissuration fine et répartie peut aussi y apparaître à cause de leur grande sensibilité au jeune âge impactant leur efficacité réelle malgré leurs caractéristiques exceptionnelles. Ainsi la mise au point et l'emploi de ces matériaux destinés à être exposés à des conditions sévères crée un besoin en terme de développement de méthodes de suivi non-destructif.

De ce fait, le sujet du contrôle non destructif des bétons à ultra-hautes performances gagne de l'intérêt depuis une dizaine d'années. La technique d'émission acoustique a par exemple été appliquée avec succès à des matrices de bétons à ultra-hautes performances dans le but de suivre leur fissuration et leur cicatrisation (Granger et al., 2007) puis a été étudiée pour des formulation incluant des fibres dans le cadre de la localisation des fissures (Wang et Guo, 2018) avec les limitations propres à la méthode comme la réalisation des essais lors du chargement mécanique. Les méthodes ultrasonores linéaires, telles que la mesure de vitesse d'ondes ultrasonores, ont prouvé leur intérêt et ont permis la mesure des propriétés élastiques comme cela peut-être fait classiquement pour les bétons ordinaires non fibrés (Hassan et Jones, 2012). Il est aussi intéressant de noter que la combinaison de plusieurs méthodes non-destructives est une voie intéressante pour la caractérisation de ces matériaux cimentaires (Tsioulou et al., 2017). Néanmoins, la caractérisation fine de la fissuration de ces matériaux et de leur processus d'apparition restent peu étudiée au regard du développement rapide de leur emploi pour la réalisation d'ouvrages sensibles.

Parallèlement, les méthodes acoustiques non-linéaires développées ces dernières années sur les matériaux cimentaires ordinaires permettent d'accéder à des informations supplémentaires, parfois plus précises que les méthodes linéaires et ce plus précocement. Elles ont permis notamment le suivi de l'endommagement (Antonaci et al., 2010), de la microfissuration et de sa cicatrisation

(Hilloulin et al., 2016, 2014; Zhang et al., 2012) et aussi du retrait (Kim et al., 2017).

Ainsi la localisation de la fissuration par imagerie et surtout sa caractérisation régulière et non intrusive tout au long de la durée de vie de ces ouvrages critiques en béton à ultra-hautes performances offre de nombreuses perspectives de recherche.

Objectifs :

L'interférométrie de la CODA ultrasonore non linéaire (NCWI) permet de suivre en laboratoire (Hilloulin et al., 2016, 2014; Zhang et al., 2012) et sur site (Legland et al., 2017) l'endommagement précoce de matériaux très hétérogènes comme le béton. Des travaux très récents relient les nouvelles observables NCWI, initialement uniquement obtenues expérimentalement, à des propriétés intrinsèques des zones fissurées via une modélisation numérique avec la méthode des éléments spectraux (Chen et al., 2017). Des lois reliant les dimensions de la zone fissurée, ses propriétés visco-élastiques effectives, les tailles des fissures aux observables NCWI ont été obtenues numériquement et validées expérimentalement au laboratoire sur des matériaux modèles présentant des fissures contrôlées.

Dans la continuité de ces travaux, l'objectif de la thèse est de développer et de valider une méthode d'imagerie qui, à partir des observables non linéaires NCWI, permettra de localiser et caractériser dans des milieux très hétérogènes des fissures ou des zones micro-fissurées inaccessibles aux méthodes d'imagerie linéaires. Il s'agira de localiser, dimensionner et quantifier le niveau d'endommagement de zones fissurées avec une méthode acoustiques non linéaire de type pompe sonde qui allie une onde basse fréquence qui modifie les contacts au niveau des lèvres des fissures à une onde haute fréquence, la coda, qui présente la sensibilité nécessaire pour détecter ces modifications.

Le travail de développement du problème inverse s'appuiera dans un premier temps sur des milieux très hétérogènes présentant des non-linéarités localisées parfaitement connues. Les observables numériques (éléments spectraux), et expérimentales sur des milieux modèles maîtrisés (comme une plaque en acier perforée avec des non linéarités acoustique de contact simulées par des vis), permettront de tester la pertinence et la robustesse du problème inverse retenu.

Il conviendra ensuite de développer les outils pour le dimensionnement d'un protocole expérimental optimal et opérationnel en relation avec le milieu réel retenu : le béton fibré ultra haute performance.

Profil recherché :

- Propagation d'onde (acoustique, sismique, ultrasonore)
- Problème inverse
- Traitement du signal et des données,
- Instrumentation
- Python, Matlab ou Scilab - ou autres outils pour le calcul scientifique
- Différences finies / éléments finis

Références

- Antonaci, P., Bruno, C.L.E., Gliozzi, A.S., Scalerandi, M., 2010. Monitoring evolution of compressive damage in concrete with linear and nonlinear ultrasonic methods. *Cem. Concr. Res.* 40, 1106-1113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.017>
- Chen G., Pageot D., Legland J.-B., Abraham O., Chekroun M., Tournat V., Numerical modeling of ultrasonic coda wave interferometry in a multiple scattering medium with a localized nonlinear defect, *Wave Motion*, 72, pp228-243, 2017. <https://dx.doi.org/10.1016/j.wavemoti.2017.03.004>
- Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G., Chanvillard, G., 2007. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cem. Concr. Res.* 37, 519-527. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.12.005>
- Hassan, A.M.T., Jones, S.W., 2012. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. *Constr. Build. Mater.* 35, 361-367. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.047>
- Hilloulin, B., Legland, J.-B., Lys, E., Abraham, O., Loukili, A., Grondin, F., Durand, O., Tournat, V., 2016. Monitoring of autogenous crack healing in cementitious materials by the nonlinear modulation of ultrasonic coda waves, 3D microscopy and X-ray microtomography. *Constr. Build. Mater.* 123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.138>
- Hilloulin, B., Zhang, Y., Abraham, O., Loukili, A., Grondin, F., Durand, O., Tournat, V., 2014. Small crack detection in cementitious materials using nonlinear coda wave modulation. *NDT E Int.* 68. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.08.010>
- Kim, G., Kim, J.Y., Kurtis, K.E., Jacobs, L.J., 2017. Drying shrinkage in concrete assessed by nonlinear ultrasound. *Cem. Concr. Res.* 92, 16-20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.010>
- Legland J.-B., Zhang Y., Abraham O., Durand O., Tournat V., Evaluation of crack status in a meter-size concrete structure using the ultrasonic nonlinear coda wave interferometry, *JASA*, 142, 2233, 2017. <http://dx.doi.org/10.1121/1.5007832>
- Pimienta, P., Chanvillard, G., 2005. Durability of UHPFRC specimens kept in various aggressive environments, in: *Proceedings of the 10th International Conference On Durability of Building Materials and Components LYON [France] 17-20 April 2005*.
- Tsioulou, O., Lampropoulos, A., Paschalis, S., 2017. Combined Non-Destructive Testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Constr. Build. Mater.* 131, 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.068>
- Wang, J.Y., Guo, J.Y., 2018. Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic emission techniques. *Cem. Concr. Compos.* 88, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.007>
- Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C.A., Skoczylas, F., Corvez, D., 2014. Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging. *Cem. Concr. Res.* 55, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008>
- Zhang, Y., Abraham, O., Grondin, F., Loukili, A., Tournat, V., Le Duff, A., Lascoup, B., Durand, O., 2012. Study of stress-induced velocity variation in concrete under direct tensile force and monitoring of the damage level by using thermally-compensated Coda Wave Interferometry. *Ultrasonics* 52, 1038-1045. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2012.08.011>

PhD position 2019-2022

Laboratoire : **Géophysique et Évaluation Non Destructive – Ifsttar**

PhD director : **Odile ABRAHAM (IFSTTAR)** – odile.abraham@ifsttar.fr

Co-PhD director : **Vincent TOURNAT (LAUM)** – vincent.tournat@univ-lemans.fr

Co-supervisor : **Benoît Hilloulin (ECN)** – benoit.hilloulin@ec-nantes.fr

Location : Ifsttar – Nantes

Doctorate school : **SPIGA** - Ecole Centrale de Nantes

Founding : Ifsttar

Speciality : **Acoustic, Ultrasonic, Seismic**

Application procedure → https://www.ifsttar.fr/offres-theses/index_en.php

To candidate to this subject (n°2149) → https://www.ifsttar.fr/offres-theses/sujet.php?num=2149&num_session=1

Micro-crack imaging by nonlinear coda wave interferometry

Background :

The development of structures with high added value exposed to severe environmental conditions requires the development and monitoring of innovative cement materials that are adapted to each situation. This is particularly the case for applications such as floating wind turbines, certain solar parks, new generation nuclear power stations or for the extension of the life of existing plants.

As a result, the subject of non-destructive testing of ultra-high performance concretes has been gaining interest for the past ten years. The acoustic emission technique has, for example, been successfully applied to ultra high performance concrete matrices in order to monitor their cracking and healing (Granger et al., 2007) and has been studied for formulations including fibers in the context of the location of cracks (Wang and Guo, 2018) with the limitations of the method such as carrying out tests during mechanical loading. Linear ultrasonic methods, such as ultrasonic wave velocity measurement, have proved their value and have allowed the measurement of elastic properties as can be done conventionally for ordinary non-fiber concrete (Hassan and Jones, 2012). It is also interesting to note that the combination of several non-destructive methods is an interesting way to characterize these cementitious materials (Tsioulou et al., 2017). Nevertheless, the fine characterization of the cracking of these materials and their process of appearance remain little studied with regard to the rapid development of their use for the realization of sensitive works.

At the same time, the non-linear acoustic methods developed over the last few years on ordinary cementitious materials make it possible to access additional information, sometimes more precise than linear methods, and this earlier. They made it possible to monitor the damage (Antonaci et al., 2010), the microcracking and its healing (Hilloulin et al., 2016, 2014, Zhang et al., 2012) and the withdrawal (Kim et al. al., 2017).

Thus the location of imaging cracking and especially its regular and non-intrusive characterization throughout the lifetime of these critical ultra-high performance concrete structures offers many research perspectives.

Objectives :

Nonlinear CODA wave interferometry (NCWI) tracks in laboratory (Hilloulin et al, 2016, 2014. Zhang et al, 2012.) and in situ (Legland et al, 2017) early damage of very heterogeneous materials like

concrete. Very recent work links the [new NCWI observables](#), initially obtained only experimentally, to intrinsic properties of the cracked zones via numerical modeling with the spectral element method (Chen et al., 2017). Laws connecting dimensions of the cracked area, its actual viscoelastic properties, the sizes of cracks to NCWI observables were obtained numerically and experimentally and validated in the laboratory on model materials with controlled cracks.

In continuation of this work, the aim of the thesis is to [develop and validate an imaging method that, with nonlinear NCWI observables, will locate and characterize in heterogeneous environments cracks or microcracked areas inaccessible to linear ultrasonic imaging methods](#). It will be a question of locating, dimensioning and quantifying the level of damage of cracked zones with a [non-linear pump probe acoustic method](#) which combines a low frequency wave which modifies the contacts at the level of crack lips with a high frequency wave, the coda, which has the sensitivity needed to detect these changes.

The development of the [inverse problem](#) will initially rely on highly heterogeneous media with well-known localized nonlinearities. [Numerical \(spectral elements\) and experimental work](#) on controlled media (such as a perforated steel plate with acoustic contact non-linearities simulated by screws), will test the relevance and robustness of the chosen inverse problem.

It will then be necessary to develop tools for the design of an optimal and operational experimental protocol in relation to the real environment chosen: ultra-high performance fiber-reinforced concrete.

Required Profile :

- Wave propagation (acoustic, seismic, ultrasound)
- Inverse problem
- Signal and data processing, instrumentation
- Python, Matlab or Scilab - or other tools for scientific computing
- Finite differences / finite elements